

Tesis Doctoral
Ingeniería Industrial

**METODOLOGÍA APLICADA DE
CARACTERIZACIÓN TÉRMICA
INVERSA PARA EDIFICIOS**

Autor: José Sánchez Ramos
Director: Servando Álvarez Domínguez
Co-Director: Francisco José Sánchez de la Flor

Dep. Ingeniería Energética
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

2015



**Departamento de Ingeniería Energética
Escuela Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla**



TESIS DOCTORAL

**METODOLOGÍA APLICADA DE CARACTERIZACIÓN TÉRMICA
INVERSA PARA EDIFICIOS**

por

José Sánchez Ramos

Ingeniero Industrial por la E.S.I. de Sevilla

Director: D. Servando Álvarez Domínguez

Co-Director: D. Francisco José Sánchez de la Flor

Sevilla, 2015

Tesis doctoral:

METODOLOGÍA APLICADA DE CARACTERIZACIÓN TÉRMICA INVERSA
PARA EDIFICIOS

Autor: José Sánchez Ramos

Tutores: Servando Álvarez Domínguez

Franciso J. Sánchez de la Flor

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2015

El Secretario del Tribunal

A mis padres, familia y Servando

RESUMEN

La actualidad de la energética edificatoria pasa, en cierta medida, por la integración de la monitorización y de los sistemas de gestión energética en los estudios de eficiencia energética de los mismos. La integración, bien para conseguir evaluaciones energéticas más realistas en las que se tenga en cuenta el usuario real, o para el desarrollo de soluciones innovadoras. En la tesis, esta integración se ha resuelto con la creación de un modelo simplificado, que identificado con datos experimentales, responde a la realidad medida y puede sustituirla. Una vez sustituida en forma de uno o varios modelos combinados, se demuestra que es posible dar solución a objetivos como evaluación y verificación de ahorros.

El trabajo doctoral que estas páginas se recoge tiene como objetivo el desarrollo de una metodología aplicada de caracterización térmica inversa para edificios. Los objetivos conseguidos por el trabajo aparecen descritos en el capítulo 1, objetivo de la tesis. Esta consecución aparece justificada y validada con datos experimentales en los siguientes capítulos, más concretamente en el desarrollo de 5 aplicaciones.

ÍNDICE

METODOLOGÍA APLICADA DE CARACTERIZACIÓN TÉRMICA INVERSA PARA EDIFICIOS	iii
RESUMEN	ix
ÍNDICE	xi
INDICE DE FIGURAS	15
ÍNDICE DE TABLAS	17
ÍNDICE DE ECUACIONES	19
PREFACIO	23
1. INTRODUCCIÓN	25
1.1. <i>OBJETIVO DE LA TESIS</i>	25
1.2. <i>FUNDAMENTOS</i>	27
1.2.1. Sistema.....	27
1.2.2. Modelización.....	28
1.2.3. Reducción.....	31
1.2.4. Identificación	34
1.2.5. Caracterización Inversa	39
2. POTENCIAL CIENTÍFICO Y TECNOLÓGICO	41
2.1. <i>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</i>	41
2.1.1. Modelización.....	41
2.1.2. Identificación	50
2.1.3. Experimentación.....	52
2.1.4. Diagnóstico mediante caracterización inversa	57
2.1.5. Gestión energética mediante caracterización de consumos para uso predictivo.....	60
2.1.6. Corrección/Calibración de procedimientos de cálculo.....	65
2.1.7. Evaluación y verificación de ahorros.....	79
2.2. <i>POTENCIAL CIENTÍFICO Y TECNOLÓGICO</i>	80
2.2.1. MACTIE Verificación de ahorros.....	82
2.2.2. MACTIE Caracterización de equipos y elementos	84
2.2.3. MACTIE Estudios paramétricos y rehabilitación	84
2.2.4. MACTIE Predicción de consumos.....	85
3. MODELO DE CARACTERIZACIÓN SIMPLIFICADO - MCS	86
3.1. <i>DESCRIPCIÓN Y FUNDAMENTOS</i>	87
3.2. <i>MODELIZACIÓN Y REDUCCIÓN</i>	88
3.2.1. MCS Consideraciones básicas.....	88
3.2.2. Funciones de transferencia.....	89
3.2.3. Parámetros dinámicos	98
3.2.4. Parámetros cuasiestáticos	99
3.2.5. Parámetros estáticos.....	99
3.2.6. Subdivisión del dominio Temporal.....	100
3.3. <i>MODELO DE CARACTERIZACIÓN SIMPLIFICADO</i>	103
3.3.1. Modelo Q–T	103
3.3.2. Modelo integrado de consumo.....	106
3.3.3. MCS Demanda Térmica Mensual.....	113

3.4. IDENTIFICACIÓN.....	134
3.5. VALIDACIÓN Y ACEPTACIÓN	136
3.6. EXPLOTACIÓN DE MCS	137
3.6.1. Evaluación y Verificación de ahorros.....	137
3.6.2. Gestión energética.....	138
3.6.3. Caracterización de componentes o sistemas.....	141
3.6.4. Calibración de software detallado BEPS.....	142
4. APLICACIONES MCS	145
4.1. APLICACIÓN 1 – SINHOR.....	146
4.1.1. Descripción	146
4.1.2. Modelo de caracterización MCS	149
4.1.3. Reducción	151
4.1.4. Caracterización de las excitaciones climáticas.....	155
4.1.5. Fuentes internas.....	157
4.1.6. Identificación	157
4.1.7. MCS Diario	158
4.1.8. MCS Horario	159
4.1.9. Verificación de ahorros.....	161
4.2. APLICACIÓN 2 – MECLIDE.....	165
4.2.1. Descripción y objetivos.....	166
4.2.2. Caracterización del elemento opaco interior.....	167
4.2.3. Relación Flujo y temperatura	171
4.2.4. Caracterización de pérdidas	177
4.3. APLICACIÓN 3 – CHORUS	181
4.3.1. Descripción	181
4.3.2. Síntesis de los principales estudios realizados.....	182
4.3.3. Estudio 0: caracterización climática.....	183
4.3.4. Estudio 1: elección del nivel de caracterización	185
4.3.5. Estudio 2: consumos sin patrón aparente.....	191
4.3.6. Estudio 3: consumo de calefacción.....	194
4.3.7. Estudio 4- Edificio “UNKNOWN”	195
4.3.8. Estudio 5- Edificio “BLUENET” Consumo de climatización - Nivel 3.....	199
4.3.9. Estudio 6- Edificio “BLUENET” Consumo de Fuerza	201
4.3.10. Conclusiones.....	203
4.4. APLICACIÓN 4: CORRECCIÓN/CALIBRACIÓN	205
4.4.1. Introducción	205
4.4.2. Corrección BEPS a partir de facturas	207
4.4.3. Calibración concentrada de BEPS a partir de facturas	208
4.4.4. Integración de MCS Demanda térmica Mensual y MCS	209
4.4.5. Complemento CE3	210
4.4.6. Proyecto ENCERTICUS	211
4.5. APLICACIÓN 5: TOMA DE DECISIONES.....	213
4.5.1. Introducción	213
4.5.2. Ejemplo teórico	213
4.5.3. Prediseño Edificios Residenciales – PREDIMENER.....	223
4.5.4. Toma de decisiones para rehabilitación – SBP	228
5. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS.....	234
6. REFERENCIAS	237
7. ANEXOS	249
7.1. CALIDAD E INCERTIDUMBRE.....	249
7.1.1. Introducción	249
7.1.2. Teoría del error.....	253
7.1.3. Determinación de la incertidumbre	256

7.1.4.	Presentación de resultados	258
7.2.	<i>OTRAS APLICACIONES MCS</i>	260
7.2.1.	Aplicación 1: ejemplo teórico obtención mcs	260
7.2.2.	Aplicación 2: cálculo ua de una célula experimental	271

INDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Esquema del proceso básico que define la metodología	26
Figura 1-2. Esquema de la definición de sistema en el marco de la tesis doctoral	27
Figura 1-3. Modelo RC de la transferencia de calor a través de un forjado,	29
Figura 1-4. Proceso de obtención de un modelo simplificado	31
Figura 1-5. Esquema simplificado de un proceso real	36
Figura 1-6. Esquema simplificado del conjunto anterior aplicando la metodología PEM.....	37
Figura 1-7. Esquema de identificación aplicado en las técnicas OEM	37
Figura 1-8. Visión global del proceso de caracterización	40
Figura 2-1. Esquema de la transferencia de calor a través de un cerramiento opaco	44
Figura 2-2. Modelo RC de la transferencia de calor a través de un forjado	46
Figura 2-3. Esquema de modelización en ecuaciones de estado de un sistema tipo	47
Figura 2-4. Imagen de las celdas Test de PASSYS [57], [65], [67]–[70] [59]	53
Figura 2-5. Ejemplo de aplicación del procedimiento de identificación de PASSYS [19].....	53
Figura 2-6. Fotografías del centro experimental en Puigverd (Lleida) del GREA [70].....	54
Figura 2-7. Modelo eléctrico equivalente de la transferencia térmica sobre un espacio	56
Figura 2-8. Imagen de los edificios piloto. Fuente [77]	57
Figura 2-9. Reflexiones adoptadas del material publicado por EVO.	82
Figura 2-10. Explotación de la metodología doctoral como herramienta de prediseño	84
Figura 3-1. Fracción respecto a la respuesta total del sistema de cada constante de tiempo	102
Figura 3-2. Esquema general del modelo anidado Q-T.....	104
Figura 3-3. Visión general de los componentes del consumo.	106
Figura 3-4. Diagrama de bloques del modelo integrado de consumo	106
Figura 3-5. Algoritmo de caracterización del consumo de climatización	113
Figura 3-6. Datos medidos en espacio de oficinas de la Universidad de Granada de Junio 2013.	120
Figura 3-7. Evolución de temperaturas interior y exterior típicas de la estación de calefacción.....	121
Figura 3-8. Evolución de temperaturas interior y exterior típicas de los meses intermedios.....	121
Figura 3-9. Evolución de temperaturas interior y exterior típicas de los meses intermedios.....	121
Figura 3-10. Factor de utilización para el régimen de calefacción Fuente [157].....	124
Figura 3-11. Valores para los parámetros independientes del factor de utilización [172]	125
Figura 3-12. Variación del factor de utilización. Fuente [173].....	126
Figura 3-13. Factor de utilización para el régimen de refrigeración. Fuente [157].	127
Figura 3-14. Corrección del MCS a partir de simulación para edificios terciarios (opción 2).....	128
Figura 3-15. Esquema Genérico para la identificación del modelo	134

Figura 3-16. Esquema Genérico para la identificación del modelo (opción A).....	135
Figura 3-17. Esquema Genérico para la identificación del modelo (opción B)	135
Figura 3-18. Esquema del procedimiento para la evaluación de ahorros o análisis de sensibilidad .	137
Figura 3-19. Esquema del procedimiento para la evaluación de ahorros o análisis de sensibilidad .	138
Figura 3-20. Esquema del procedimiento para la evaluación de ahorros o análisis de sensibilidad .	138
Figura 3-21. Consumo medido de Fuerza (KWh).....	139
Figura 3-22. Estudio de la predicción realizada el día 7 de Octubre para Fuerza (KWh).....	139
Figura 3-23. Estudio de la predicción realizada el día 8 de Octubre para Fuerza (KWh).....	140
Figura 7-1. Concepto de incertidumbre	253

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1–1. Cuadro de decisiones MACTIE	25
Tabla 1–2. Energía referida al modo de vibración i del autovalor i	34
Tabla 2–1. Características principales de los modelos para caracterización	43
Tabla 2–2. Experimentos de las celdas TEST. Fuente P. A. Strachan [60].....	51
Tabla 3. Características de los diferentes modelos usados en publicaciones. Fuente [114].....	65
Tabla 2–4. Criterios de aceptación de herramientas de simulación calibradas. Fuente [134]	76
Tabla 3–1. Composición y capas del muro	101
Tabla 3–2. Estimación de las constantes de tiempo del edificio	108
Tabla 3–3. Parámetros F_i (W/m^2) – Ganancias internas.....	123
Tabla 3–4. Valores aproximados para la constante principal del edificio. Fuente [173]	127
Tabla 3–5. Estimación de la capacidad térmica del edificio. Fuente [157].....	127
Tabla 4–1. Composición y capas del muro	169
Tabla 4–2. Muro expuesta a una convección idéntica por cada superficie.	170
Tabla 4–3. Muro expuesto a una convección y temperatura impuesta en la otra.	170
Tabla 4–4. Muro expuesto a dos convecciones diferentes.	171
Tabla 4–5. Valores ajustado para los coeficientes asociados a la temperatura equivalente T_{EQ}	174
Tabla 4–6. Valores de los coeficientes asociados a la temperatura superficial interior T_{SI}	174
Tabla 4–7. Valores de los coeficientes asociados a la temperatura superficial exterior T_{SE}	175
Tabla 4–8. Propiedades térmicas de las componentes del muro y de su equivalente.	175
Tabla 4–9. Tabla de resultados del análisis realizado sobre la fachada ventilada	180
Tabla 4–10. Modelo de temperatura interior en evolución libre y base de tiempo 6h.	184
Tabla 4–11. Valores del parámetro K para la estación de refrigeración y el edificio a análisis.	185
Tabla 4–12. Errores obtenidos a corto plazo en la predicción usando nivel 1.	187
Tabla 4–13. Errores de la estimación del mes completo de septiembre por los 4 niveles	190
Tabla 4–14. Errores obtenidos a corto plazo en la predicción (días)	194
Tabla 4–15. Errores obtenidos a medio plazo en la predicción (semana completa).....	194
Tabla 4–16. Errores obtenidos a corto plazo usando distintos órdenes en la predicción.....	198
Tabla 4–17. Parámetros principales de definición del edificio	213
Tabla 4–18. Parámetros energéticos de la epidermis	214
Tabla 4–19. Valores de climáticos	214
Tabla 4–20. Diferencia entre los valores climáticos convencionales y los efectivos	215
Tabla 4–21. Comparación entre el ASSE de los huecos vidriados y la cubierta.....	216

Tabla 4-22. Demanda de calefacción del edificio 1 a estudio.....	216
Tabla 4-23. Demanda de refrigeración del edificio 1 a estudio	217
Tabla 4-24. Resumen de medidas de ahorro de energía estudiadas en el edificio 1	220
Tabla 4-25. Resumen de medidas de ahorro de energía estudiadas en el edificio 2	221
Tabla 4-26. Ejemplo de tablas del PREDIMENER para calefacción.....	224
Tabla 4-27. Ejemplo de tablas del PREDIMENER para refrigeración	225
Tabla 4-28. Parámetros característicos del edificio tipo Oficinas	230
Tabla 4-29. <i>ACH debidas a infiltraciones</i> en edificio 2 - OFI.....	230
Tabla 4-30. Coeficientes correctores PSCEE edificio 2 - OFI.	231
Tabla 4-31. Resultados anuales del modelo de referencia vs MCS	231
Tabla 4-32. Comparación de resultados anuales modelo de referencia vs MCS	231
Tabla 4-33. Duración de la estación de calefacción edificio 2 – tipo Oficinas	232
Tabla 4-34. Duración de la estación de refrigeración edificio 2 – tipo Oficinas.....	232
Tabla 7-1. Valores de las constantes de tiempo	261
Tabla 7-2. Denominadores asociados a las dos constantes de tiempo significativas	262
Tabla 7-3. Numeradores analíticos para la respuesta anterior.....	262
Tabla 7-4. Resultados en bruto de la optimización.....	263
Tabla 7-5. Nuevas constantes de tiempo tras la incorporación del hueco vidriado.....	267
Tabla 7-6 Numeradores analíticos para la respuesta anterior.....	267
Tabla 7. Nuevos denominadores tras la adición del hueco vidriado	267
Tabla 7-8. Resultados en bruto de la optimización.....	268
Tabla 7-9. Resultados en bruto de la optimización (paso de tiempo 2horas)	270
Tabla 7-10. Resultados del estudio analítico de las transmitancias de la celda experimental.....	275

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1-1. Cálculo de parámetros de transferencia de calor asociados al forjado.....	30
Ecuación 1-2. 1er principio sobre el forjado. Sistema de capacidad	30
Ecuación 1-3. Solución analítica de la temperatura sobre el muro homogéneo descrito.....	30
Ecuación 1-4. Solución analítica de la temperatura sobre el muro homogéneo descrito.....	31
Ecuación 1-5. Solución analítica de la temperatura sobre el muro homogéneo descrito.....	33
Ecuación 1-6. Energía almacenada en el modo de vibración n (autovalor n).....	34
Ecuación 2-1. Balance nodo 2.....	44
Ecuación 2-2. Balance nodo 3.....	44
Ecuación 2-3. Escritura matricial simplificada	44
Ecuación 2-4. Matricial desarrollado.....	44
Ecuación 2-5. Cálculo de la ecuación característica a partir del determinante	45
Ecuación 2-6. Parámetros asociados al modelo del forjado.....	46
Ecuación 2-7. 1er principio sobre el forjado. Sistema de capacidad	46
Ecuación 2-8. Formulación matricial de la transferencia de calor en el forjado	47
Ecuación 2-9. Formulación matemática de un modelo de estados tipo.	47
Ecuación 3-1. Definición del modelo de caracterización simplificado.....	88
Ecuación 3-2. Ejemplo de particularización del MCS	89
Ecuación 3-3. Problema analítico de transferencia de calor por conducción en el cerramiento.....	89
Ecuación 3-4. Solución analítica simplificada	101
Ecuación 3-5. Directriz 1: constante enésima a tener en cuenta.....	102
Ecuación 3-6. Directriz 2: modelo simplificado en condiciones cuasi-estacionarias.....	102
Ecuación 3-7. Directriz 3: modelo simplificado en condiciones cuasi-estacionarias.....	102
Ecuación 3-8. Modelo para el consumo de climatización.	107
Ecuación 3-9. Modelo para el perfil de climatización.	107
Ecuación 3-10. MCS temperatura interior promedio durante el periodo z de no climatización.	108
Ecuación 3-11. MCS temperatura interior promedio durante el periodo z de climatización.....	108
Ecuación 3-12. Cálculo del denominador en función de la constante de tiempo del sistema.	108
Ecuación 3-13. MCS temperatura interior promedio en evolución libre sin ganancias internas.	109
Ecuación 3-14. Definición de temperatura sol-aire [°C].....	109
Ecuación 3-15. Definición del parámetro k [°C/Wh/m²].....	109
Ecuación 3-16. MCS temperatura interior promedio en evolución libre en operación normal.	109
Ecuación 3-17. Estimación de fuentes internas durante el periodo Z [J].	109
Ecuación 3-18. Balance de energía sobre todo el edificio	114

Ecuación 3-19. Disgregación del balance en su forma elemental para calefacción y refrigeración	115
Ecuación 3-20. Energía pérdida por transmisión.....	115
Ecuación 3-21. Formulación de la incertidumbre asociada al valor U del edificio	116
Ecuación 3-22. Energía pérdida debido a la ventilación e infiltración del edificio.....	116
Ecuación 3-23. Formulación de energía perdida.....	116
Ecuación 3-24. ACH equivalentes	117
Ecuación 3-25. Cálculo experimental del caudal de infiltraciones. Fuente [164]	117
Ecuación 3-26. Flujos de calor sobre la superficie exterior de un cerramiento opaco.....	118
Ecuación 3-27. Energía pérdida debido a la ventilación e infiltración del edificio.....	119
Ecuación 3-28. Acotación pérdida por transmisión.....	120
Ecuación 3-29. Área solar sur equivalente formulada	122
Ecuación 3-30. Cálculo del valor de radiación solar sur efectiva	122
Ecuación 3-31. Formulación de ganancias netas	124
Ecuación 3-32. Formulación del factor de utilización	125
Ecuación 3-33. Formulación del factor de utilización para calefacción.....	126
Ecuación 3-34. Formulación de pérdidas netas para el régimen de refrigeración	127
Ecuación 3-35. Formulación del factor de utilización para refrigeración	128
Ecuación 3-36. Formulación del modelo de calefacción en sus diferentes opciones	129
Ecuación 3-37. Pérdidas por transmisión y ventilación para el modelo de calefacción.....	129
Ecuación 3-38. Formulación de ganancias solares para el modelo de calefacción	129
Ecuación 3-39. Formulación de ganancias internas.....	129
Ecuación 3-40. Formulación del modelo de refrigeración en sus diferentes opciones.....	130
Ecuación 3-41. Pérdidas por transmisión y ventilación para el modelo de refrigeración	130
Ecuación 3-42. Formulación de ventilación nocturna para el modelo de refrigeración.....	130
Ecuación 3-43. Cálculo de la temperatura interior promedio diaria en edificios residenciales.....	132
Ecuación 3-44. Temperatura interior promedio para los periodos de no climatización.....	132
Ecuación 3-45. Factor corrector de intermitencia para GD en edificios residenciales	132
Ecuación 3-46. Grados día modificados.....	132
Ecuación 3-47. Covarianza del modelo	136
Ecuación 3-48. Formulación genérica del modelo	136
Ecuación 3-49. Varianza de los residuos	136
Ecuación 3-50. Función de pérdidas: relación entre residuos y parámetros identificados.....	136
Ecuación 4-1. MCS diario – Temperatura promedio interior [°C].....	149
Ecuación 4-2. MCS Diario Energía absorbida por el equipo HVAC [kWh]	149
Ecuación 4-3. MCS horario– Temperatura promedio interior [°C].....	150
Ecuación 4-4. MCS Horario Energía absorbida por el equipo HVAC [kWh]	150

Ecuación 4-5. Flujo de calor por transmisión en el prototipo	155
Ecuación 4-6. Flujo de calor por transmisión en el prototipo (desarrollo)	156
Ecuación 4-7. MCS Diario Identificado Temp. Interior [°C]	158
Ecuación 4-8. MCS Diario Identificado Energía Absorbida por HVAC [kWh].....	158
Ecuación 4-9. MCS Horario Identificado Temp. Interior [°C].....	160
Ecuación 4-10. MCS Horario Identificado Energía Absorbida por HVAC [kWh].....	160
Ecuación 4-11. Flujo de calor por conducción.....	168
Ecuación 4-12. Flujo de calor convectivo-radiante en la cara exterior del muro.....	168
Ecuación 4-13. Temperatura superficial del muro en función de las excitaciones	168
Ecuación 4-14. Flujo de calor convectivo-radiante.....	168
Ecuación 4-15. Particularización del modelo de caracterización simplificado.....	168
Ecuación 4-16. Particularización del modelo de caracterización simplificado.....	168
Ecuación 4-17. Flujo de calor sobre la superficie exterior.....	169
Ecuación 4-18. Relación entre los numeradores - denominadores analíticos y MCS	169
Ecuación 4-19. Ecuación del calor	170
Ecuación 4-20. Temperatura adimensional	170
Ecuación 4-21. Solución analítica.....	170
Ecuación 4-22. Formulación de denominadores	171
Ecuación 4-23. Modelo de caracterización simplificado obtenido	171
Ecuación 4-24. Modelo de caracterización simplificado obtenido – flujo de calor.....	172
Ecuación 4-25. Balance de energía global en la cámara.....	172
Ecuación 4-26. Balance de energía en la cámara particularizado	172
Ecuación 4-27. Modelo de caracterización resultante.	174
Ecuación 4-28. Variables independientes del modelo de caracterización	174
Ecuación 4-29. Flujo de calor a través del elemento	176
Ecuación 4-30. Fórmula para la corrección terciario con facturas	208
Ecuación 4-31. Corrección MCS a partir de facturas para calefacción y refrigeración	208
Ecuación 7-1. Tipología de modelo lineal	249
Ecuación 7-2. Cálculo del índice de verosimilitud alcanzado por el modelo.....	252
Ecuación 7-3. Definición de error	253
Ecuación 7-4.. Expresión normalizada de una magnitud medida	253
Ecuación 7-5. Expresión normalizada de una magnitud medida	253
Ecuación 7-6. Cálculo de la probabilidad asociada a una cierta incertidumbre en la medida	254
Ecuación 7-7. Fórmula para el cálculo de la incertidumbre típica	254
Ecuación 7-8. Expresión normalizada de una magnitud medida	255
Ecuación 7-9. Incertidumbre típica.....	256

Ecuación 7-10. Cálculo de incertidumbre por Taylor	257
Ecuación 7-11. Cálculo de la varianza según norma UNE [46] para variables correlacionadas	257
Ecuación 7-12. Fórmula para el cálculo de la covarianza de una variable	257
Ecuación 7-13. Cálculo de la varianza según norma UNE [46] para variables no correlacionadas ...	258

PREFACIO

La presente tesis doctoral describe parte de la investigación realizada, de forma continua, desde el año 2010 hasta mayo de 2015 en lo referente a la caracterización inversa de edificios. En los objetivos de la tesis del primer capítulo se detalla el alcance del trabajo doctoral.

Cabe destacar que el autor forma parte del Grupo de Termotecnia desde el año 2007. Allí compagina su trabajo como ingeniero-investigador con su vocación de docente. En este contexto se desarrolla el trabajo doctoral que se presenta, el cual se ha vinculado a algunos de los proyectos y trabajos en los que el autor ha participado, y en otros, ha sido fruto de la creencia y esfuerzo del Grupo en el tema.

Es un convencimiento que, los métodos de análisis dinámicos son técnicas para analizar los procesos dinámicos e identificar los principales parámetros que describen la física de los mismos. Éstos tienen en cuenta la evolución con el tiempo, hecho que los métodos estáticos no. Por tanto, son necesarios para tener en cuenta efectos dinámicos, como podrían ser las fluctuaciones debido a la variabilidad climática. De ahí que se haya extendido la idea de que la tecnología de la matemática dinámica es reconocida como crucial en la optimización de la eficiencia energética. Más aún al permitir estos modelos la caracterización de todo tipo de sistemas con datos experimentales. Esto es lo que supone un salto en la energética edificatoria si se aplica a edificios existentes.

En concreto, la motivación personal del doctorando se crea a través de la línea de investigación desarrollada desde que formó parte del grupo de investigación al que pertenece. De la misma se rescatan tres trabajos.

En primer lugar, el proyecto internacional PHDC [1]. Uno de los paquetes de trabajo del mismo la validación experimental de un sistema de refrigeración evaporativo, pasivo e híbrido instalado como sistema de climatización en una celda experimental, en la Escuela Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla durante los meses de Julio, Agosto y Septiembre de 2009 de los modelos simplificados obtenidos mediante las técnicas CFD. En las siguientes figuras, aparecen detalles del captador de viento instalado en la torre de impulsión, que se acoplaba al recinto a climatizar. A su vez, sobre la cara opuesta a la impulsión, se colocaron una serie de extractores que permitían variar el caudal de aire. El sistema evaporativo se basaba en micronizadores con tamaños de gotas entre 10-50 micras de diámetro. Sobre los resultados del trabajo se remite al lector a la publicación [2].

Previo a este trabajo, el propio proyecto final de carrera del doctorando (07/2007-09/2009): "PHDC: Sistemas de enfriamiento evaporativo pasivos e híbridos para edificios" [3].

Y finalmente la participación en el desarrollo de la herramienta CE3 para la certificación de edificios existentes en España. Esta última ha supuesto el convencimiento de que hay que aprovechar al máximo que el edificio "existe" y se puede medir.

El documento presenta la siguiente estructura:

- Capítulo 1, donde se definen los objetivos de la tesis y se introduce al lector en los conceptos básicos.
- Capítulo 2 es la justificación de las líneas de investigación desarrolladas en el trabajo doctoral. El capítulo se compone de una revisión desarrollada de bibliografía con una visión crítica. Esta visión es producto del intento de aprovechamiento de la literatura para solventar los

problemas que iban apareciendo en el transcurso de estos casi 5 años.

- Capítulo 3, modelo de caracterización simplificado, se desarrollada la teoría del modelo de caracterización. La exposición pretende ser clara y concisa, de tal forma que sea leible y entendible.
- Capítulo 4, Aplicaciones del MCS, es la validación de la metodología mediante el estudio de casos reales. Este capítulo representa la vinculación del trabajo doctoral con la realidad de los proyectos de investigación antes citados. En el capítulo se han elegido varios casos experimentales para validar la aplicabilidad de la metodología, y dos aplicaciones más para demostrar las posibilidades de la misma. El capítulo se complementa con la teoría desarrollada en el capítulo 3, aunque cada aplicación está autocontenida.
- Se han anexados dos epígrafes: uno de ellos sintetiza los estudios realizados para el análisis de la incertidumbre/error que estas técnicas llevan implícito, y otro con algunas aplicaciones complementarias al capítulo 4.

Finalmente las conclusiones y líneas futuras describen la continuación de este trabajo.

1. INTRODUCCIÓN

“El objetivo de una buena introducción es que el lector se contente con ella, lo entienda todo y lea el resto”

Umberto Eco

El objetivo de este capítulo es crear al lector los fundamentos y argumentos, que sientan las decisiones tomadas a lo largo de la tesis, con objeto de alcanzar las metas descritas en las líneas anteriores. A lo largo de este capítulo y en los anexos referenciados se sintetizan las reflexiones y doctrinas adquiridas de la literatura existente. La finalidad es hacer un “warm-up”, haciendo el símil deportivo “elevar las pulsaciones y la temperatura del lector” de cara a los capítulos siguientes. Aunque a corto plazo, se quiere contextualizar el potencial del trabajo obtenido.

1.1. OBJETIVO DE LA TESIS

El objetivo principal de la tesis es desarrollar una metodología aplicada de caracterización térmica inversa para edificios. Esta metodología permite obtener un paquete completo de caracterización para edificios existentes a varios niveles.

El propio objetivo se plasma en alguno de los productos que se pueden conseguir combinando cada uno de los diferentes criterios que a continuación se describen.

El primer criterio es el referido a la discretización espacial, la metodología es aplicable a un componente, a un equipo, a un espacio o a todo el edificio por completo.

El segundo criterio está referido a la discretización temporal: la metodología permite obtener productos en diferentes bases temporales, tanto a nivel de estudios transitorios como medio/largo plazo.

Y por último el tercer criterio referido a la tipología del modelo. Este nivel se divide en tres: nivel físico, nivel matemático y nivel mixto.

Las finalidades de los posibles productos de la tesis son: caracterización de componentes y equipos, corrección de BEPS, verificación de ahorros, y caracterización de consumo para gestión energética. El siguiente cuadro resume las decisiones a tomar a la hora de aplicar la metodología en función de la finalidad deseada.

MACTIE	Discretización Espacial			Discretización Temporal			Tipología del modelo		
	Componente	Espacio	Edificio	$\Delta T < 1$ hora	1 hora $< \Delta T < 1$ día	$\Delta T >$ días	Físico	Mixto	Matemático
Caracterización de componentes	X			X			X		
Verificación de ahorros		X	X		X	X		X	
Caracterización de consumo Gestión energética		X	X	X	X			X	X
Estudio paramétrico			X			X	X		
Corrección de BEPS Rehabilitación energética			X			X	X	X	

Tabla 1-1. Cuadro de decisiones MACTIE

Por ejemplo, si se realiza un prototipo experimental para probar una solución innovadora con objeto de modelarla para su incorporación a una herramienta de simulación, la metodología se aplicaría de la siguiente forma: criterio 1- componente; criterio 2- paso corto, quizás de una hora o inferior; y por último el criterio 3- herramienta de prediseño. Por consiguiente el resultado sería un modelo simplificado de caracterización inversa de esa solución innovadora, en paso corto de tiempo, y con una dependencia funcional explícita o implícita de sus parámetros de diseño.

Por último comentar, que el principal desarrollo de la metodología es la obtención de modelos simplificados de caracterización (capítulo 3), ya que constituye la base fundamental sobre la que se estructura el trabajo doctoral. El siguiente esquema refleja las principales líneas de investigación desarrolladas en la tesis, y el proceso completo de integración en la metodología de caracterización:

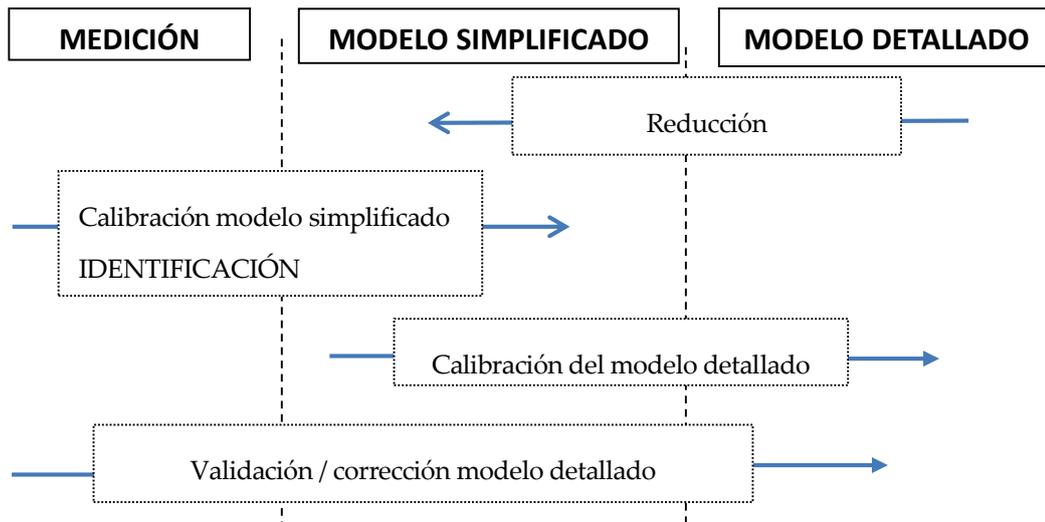


Figura 1-1. Esquema del proceso básico que define la metodología

La conexión entre los criterios anteriores y el esquema puede explicarse analizando los diferentes productos que se obtienen de la metodología.

- Un modelo simplificado a partir del conocimiento reducido de un modelo detallado.
- Conexión simple y directa del modelo simplificado y los datos experimentales a través de la identificación de sus coeficientes.
- Calibración del modelo detallado a partir del modelo simplificado identificado con datos experimentales.
- Protocolo de validación del modelo detallado a partir de datos procedentes del edificio, medidas puntuales o inventario energético. En su defecto corrección.

A continuación se describen los conceptos básicos a conocer para entender el resto del documento y de los desarrollos realizados. No obstante, se recomienda la lectura del capítulo dos para completar de contextualizar la línea de investigación que aquí se expone.

1.2. FUNDAMENTOS

1.2.1. Sistema

Para definir lo que en la tesis se entiende como sistema, se adopta la información realizada por J.M. Cejudo [4]. Un sistema es una parte de la realidad, que puede ser distinguida del resto. El resto que no es sistema se denomina ambiente. En un sistema, diferentes variables interaccionan produciendo señales observables. Las señales observables (medibles) que son de interés se denominan salidas.

Las señales que interaccionan en un sistema pueden ser de dos tipos: entradas y ruidos. Si puede ser manipulada por el experimentador o bien medibles se denominan entradas, en otro caso se denominan ruidos. Estos argumentos hacen que no siempre las entradas sean las mismas, y no siempre el ruido sea una incertidumbre no medible; todo dependerá del experimento en cuestión. Si se da un salto más, ocasionalmente, en edificios existentes el ruido puede ser de mayor relevancia en la señal de salida que las propias entradas.

El ambiente influye en el sistema pero no al revés. La definición de sistema y ambiente es arbitraria, depende del objetivo del estudio del sistema. Es generalmente posible la descomposición de un sistema en subsistemas y así sucesivamente, aplicando un principio de jerarquización. Es quien modela el que decide qué nivel de detalle requiere y por lo tanto dónde fija la frontera sistema-ambiente.

En general los sistemas evolucionan con el tiempo: las entradas, salidas y ruidos son función del tiempo. Se habla entonces de sistemas dinámicos.

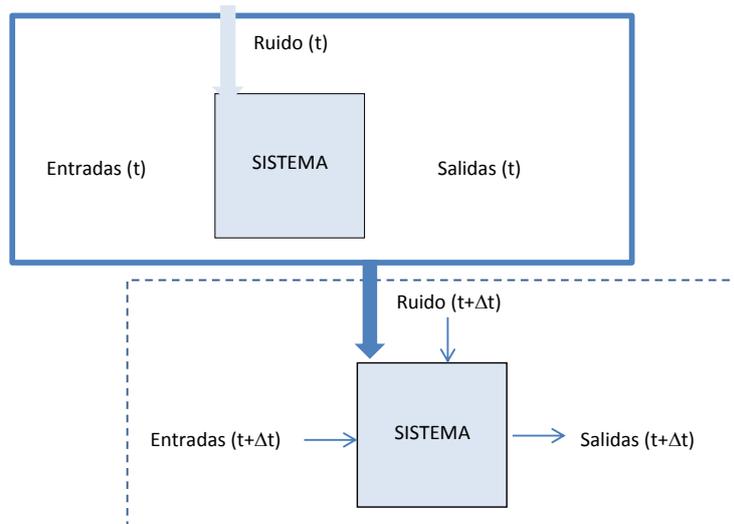


Figura 1-2. Esquema de la definición de sistema en el marco de la tesis doctoral

En la evolución de un sistema pueden considerarse, según las definiciones previas, causas (entradas y ruidos) y efectos (salida). Esta evolución dependerá lógicamente del sistema, de su situación en el momento en que actúan las entradas y ruidos. En términos precisos, la salida en un instante determinado depende, no sólo de las entradas y ruidos sino también del estado del sistema. El estado de un sistema resume la evolución de éste, de manera que conociendo las causas y el estado es posible conocer los efectos.

1.2.2. Modelización

Un modelo es una representación de un sistema. Como tal puede ser muy variada: prototipos, reproducciones a escala, representaciones gráficas o simbólicas...

El modelo debe proporcionar una representación útil del sistema. Es decir, un modelo puede ser interesante, aunque no responda a la realidad del sistema, siempre que sea útil (positivismo). Entre sus utilidades destacan: diseño, análisis y control.

La información sintetizada en este epígrafe, junto con extensos desarrollos de la misma, aparece en el trabajo de los autores [5]–[7].

Básicamente hay dos vías para la construcción matemática de modelos:

- Modelos analíticos: se obtienen a partir de las leyes básicas de la física (leyes de Newton o balances), y describen el comportamiento dinámico del sistema.
- Modelos empíricos o de identificación: Sus parámetros se obtienen a través de un proceso de identificación con datos experimentales.

En los modelos de identificación destacan las siguientes propiedades, que a su vez son las principales diferencias con los modelos analíticos (información ampliada en el epígrafe identificación):

- Su validez, en principio, está limitada al rango de datos con el que se han identificado: una cierta entrada, un punto de trabajo, proceso...
- Deben contener la esencia de la física del sistema al que caracterizan, pero los parámetros son obtenidos a través de un proceso de optimización matemática con o sin restricciones que pueden no asegurar directamente esa esencia. Dependerá fuertemente de la riqueza de los datos experimentales.
- Son fáciles de construir y usar; lo que se liga a su carácter matemático, opuesta a la esencia física, en la mayoría de los casos.

La referencia principal sobre esta temática es [7], quién distingue 3 tipologías de modelos dinámicos:

- Mentales e intuitivos: mover volante hace que gire el coche.
- Gráficos y tablas: p.ej. análisis en frecuencia con diagramas de bode.
- Modelos matemáticos: ecuaciones en diferencias y diferenciales.

Cabe destacar que esta referencia citada, una de las más destacadas sobre la temática, no trata los modelos no lineales. Tampoco la evaluación de los datos experimentales que se tienen, o la poca flexibilidad del modelo con respecto a esos datos cuando se esté identificando. Otro hecho que cabe destacar, es como no hay una teoría clara de reducción del modelo, se habla de evaluación del número de parámetros a incorporar al modelo a base de prueba error, pero no de cómo elegir ese número de partida.

A lo largo de la tesis doctoral no se va a hablar sobre los métodos no paramétricos, tipo funciones o gráficos, ya que al no estar necesariamente caracterizados por parámetros con dimensiones, carecen del sentido físico exigido al modelo para su futura extrapolación. Aún así, este tipo de técnicas son útiles para el análisis de transitorios, análisis en frecuencia, correlaciones o análisis espectral, principalmente. Lo que en edificios se puede traducir en diagnóstico.

Esto último, promueve la siguiente puntualización: a lo largo de la tesis se entiende por modelización la metodología de obtención de modelos. Existen trabajos en los que la modelización es un opuesto a la identificación: obtener ecuaciones fenomenológicas que rigen el comportamiento del sistema, mientras que la identificación será una metodología indirecta de estimación de parámetros.

1.2.2.1. Funciones de transferencia

Una función de transferencia [8] es un modelo matemático que a través de un cociente relaciona la respuesta de un sistema (modelada) y la señal de entrada o excitación (también modelada). En la teoría de control, a menudo se usan las funciones de transferencia para caracterizar las relaciones de entrada y salida de componentes o de sistemas, que se han descrito mediante ecuaciones diferenciales lineales e invariantes en el tiempo. Es por eso que la podemos definir matemáticamente como: la función de transferencia de un sistema lineal e invariante en el tiempo (LTI). Se define como el cociente entre la transformada de Laplace de la salida y la transformada de Laplace de la entrada, bajo la suposición de que las condiciones iniciales son nulas.

Considerando la temporalidad; es decir, que la excitación sobre el sistema tarda un tiempo en generar sus efectos en el sistema en cuestión y, que éste tarda otro tiempo en dar respuesta. Esta condición es vista a través de un proceso de convolución; formado por la excitación de entrada convolucionada con el sistema considerado, dando como resultado la respuesta dentro de un intervalo de tiempo. Ahora, en ese sentido (el de la convolución), se tiene que observar que la función de transferencia está formada por la deconvolución entre la señal de entrada con el sistema. Dando como resultado la descripción externa de la operación del sistema considerado. Si se analiza esto último, resulta que el proceso produce una descripción externa de la operación del sistema considerado. De forma que, el proceso de contar con la función de transferencia del sistema a través de la deconvolución, se logra de forma matricial o vectorial, considerando la pseudoinversa de la matriz o vector de entrada multiplicado por el vector de salida, para describir el comportamiento del sistema dentro de un intervalo dado.

Uno de los primeros matemáticos en describir estos modelos fue Laplace, a través de su transformación matemática. Esta transformada de Laplace suele referirse con la variable "s" a funciones continuas, en cambio la transformada "z" hace referencia a funciones discontinuas. A lo largo del siguiente capítulo se desarrolla de forma extensa el concepto y las claves de las funciones de transferencia en edificios, pilar del modelo de caracterización simplificado.

Para apoyar esta explicación se procede al desarrollo de un ejemplo: análisis de la conducción transitoria sobre un pavimento. Se ha supuesto que el pavimento es un sistema de capacidad, es decir, su temperatura es cada instante es prácticamente uniforme en todo el espesor.

La representación analógica se muestra en la figura:

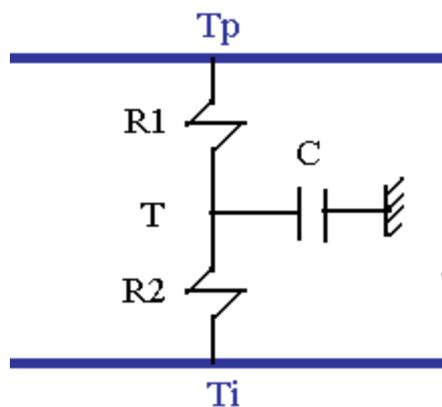


Figura 1-3. Modelo RC de la transferencia de calor a través de un forjado,

El modelo está calculado desde la superficie superior T_p hasta la temperatura superficial inferior T_i , donde:

$$R_1 = R_2 = \frac{l}{2 \cdot K}$$

$$C = \rho \cdot C_p \cdot l$$

Ecuación 1-1. Cálculo de parámetros de transferencia de calor asociados al forjado

Siendo:

l espesor del elemento

K conductividad del elemento [W/m·°C]

ρ densidad del elemento [Kg/m·°C]

C_p calor específico del elemento [J/Kg·°C]

El campo de temperaturas asociado a la representación analógica anterior, se obtiene de resolver la ecuación diferencial (modelo en ecuación diferencial del sistema).

Existen algunas referencias como [11-14], en las que se desarrollan procedimientos matemáticos para el tratamiento de los modelos RC con objeto de, redirigirlos hacia modelos de series temporales anteriores que permitan obtener modelos identificados de mayor riqueza y calidad. En energética edificatoria estos modelos suelen usarse para obtener los parámetros UA y gA a través de datos experimentales.

$$C \cdot \frac{dT}{dt} = -\frac{2}{R}T + \frac{T_p}{R} + \frac{T_i}{R}$$

Ecuación 1-2. 1er principio sobre el forjado. Sistema de capacidad

Esta ecuación puede resolverse utilizando la fórmula de Duhamel [9], dando lugar a la siguiente expresión:

$$T(t+\Delta t) = T(t) \cdot e^{-\frac{\Delta t}{\tau} - \frac{\tau}{C}} \cdot \left[e^{\frac{\Delta t}{\tau} - \frac{\tau}{C}} \cdot \frac{(1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau}})}{\frac{\Delta t}{\tau}} \right] \cdot \frac{[T_p(t) + T_i(t)]}{R} - \frac{\tau}{C} \cdot \left[\frac{(1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau}})}{\frac{\Delta t}{\tau}} - 1 \right] \cdot [T_p(t+\Delta t) - T_i(t+\Delta t)] / R$$

Ecuación 1-3. Solución analítica de la temperatura sobre el muro homogéneo descrito

Donde se ha supuesto que las excitaciones $T_p(t)$ y $T_i(t)$ varían linealmente entre el instante t y $t + \Delta t$

La constante de tiempo vale $\tau = \rho \cdot C_p \cdot l^2 / k$

El flujo de calor en la superficie superior vale:

$$q(t + \Delta t) = a_0 \cdot T_p(t + \Delta t) + a_1 \cdot T_p(t) - b_0 \cdot T_i(t + \Delta t) - b_1 \cdot T_i(t)$$

Ecuación 1-1. Solución analítica de la temperatura sobre el muro homogéneo descrito

En la que se han despreciado los términos correspondientes a los instantes anteriores ($t - \Delta t$, etc...), lo cual es suficientemente válido si el paso del tiempo (Δt) es superior a 45 minutos.

Los valores de a_0 , a_1 , b_0 y b_1 , se calculan identificando las ecuaciones y sabiendo que para verificarse el régimen, previamente se deben satisfacer las siguientes relaciones:

$$a_0 + a_1 = \frac{k}{l}$$

$$b_0 + b_1 = \frac{k}{l}$$

Las expresiones finales quedan:

$$a_0 = \frac{k}{l} \cdot \left[1 + \frac{(1 - e^{-\beta})}{1} \right]$$

$$a_1 = \frac{k}{l} - a_0$$

$$b_0 = \frac{k}{l} \cdot \left[\frac{(1 - e^{-\beta})}{1} - 1 \right]$$

$$b_1 = \frac{k}{l} - a_0$$

Ecuación 1-4. Solución analítica de la temperatura sobre el muro homogéneo descrito

Los valores resultantes han sido comparados con los de un método basado en las funciones de transferencia sobre el que no se ha hecho ningún tipo de hipótesis. La comparación muestra que la influencia de la hipótesis de sistema de capacidad, más el truncamiento del producto de convolución no origina errores superiores al 2%, por lo que el método desarrollado es perfectamente válido. Este dato es clave para el modelo de caracterización simplificado (capítulo 2). En el anexo correspondiente se proporciona más información referente a este tema.

1.2.3. Reducción

1.2.3.1. Concepto

La reducción consiste en simplificar el modelo detallado obtenido, mediante la aplicación de ciertas técnicas, hacia un modelo más reducido, sin perder la esencia ni la utilidad del mismo, por lo menos en un cierto rango, y con un cierto criterio de aceptación.

Entre otras, la principal razón para la obtención de modelos simplificados reside en el interés numérico:

- Disminución del tiempo de cálculo (n^3)
- Reducción de la capacidad de almacenamiento (n^2)

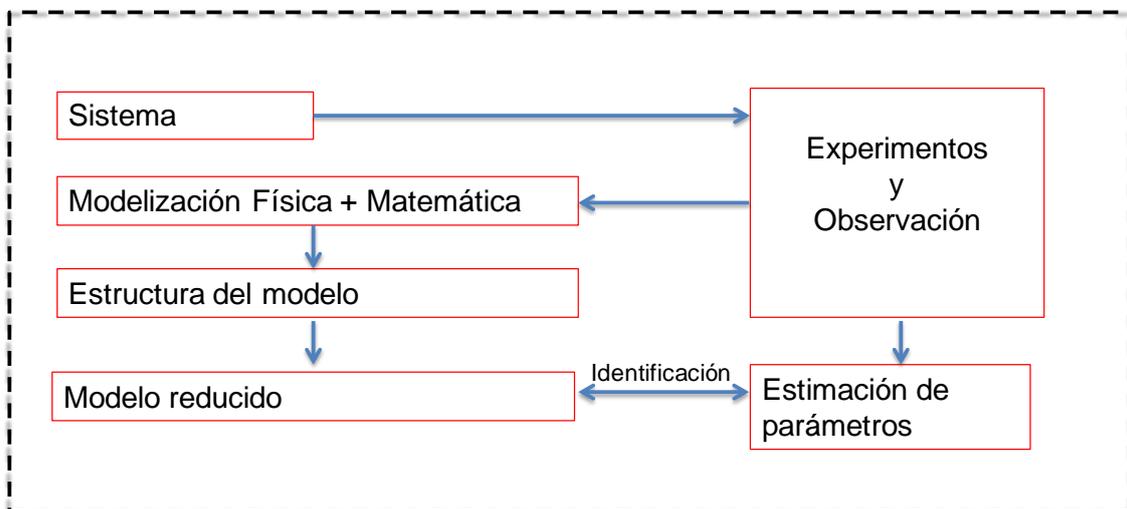


Figura 1-4. Proceso de obtención de un modelo simplificado

Las principales características que debe cumplir un modelo reducido (información extraída de Michaelesco [10]):

- Poseer las mismas propiedades de estabilidad o inestabilidad que el modelo completo
- Proporcionar una buena aproximación de unas salidas para sus correspondientes entradas
- Dar una buena aproximación de la respuesta en frecuencia
- Poseer las mismas ganancias estáticas salida-entrada que el modelo de partida
- Dar una buena aproximación del régimen transitorio

- Estar relacionado con el sistema mediante una expresión lineal o no lineal conocida de forma aproximada
- Ser lo más simple y con la menor dimensión posible.

A su vez, la técnica de reducción empleada debería tener las siguientes características:

- Ser aplicable a cualquier proceso físico
- Ayudar a escoger la dimensión reducida adecuada
- Permitir expresar el error de la reducción
- Ser lo más simple posible y conducir a cálculos numéricos con una complejidad razonable.

A continuación se va a realizar una breve revisión de los diferentes procedimientos de reducción existentes. Los diferentes planteamientos que se pueden dar son:

- Obtención de un modelo reducido mediante un desarrollo similar al del modelo completo, pero reduciendo el orden del mismo:
 - Método modales
 - Desarrollo en serie: aproximaciones de Routh o Padé
- Definir una variable que caracterice el error, y obtener el modelo reducido minimizando dicha medida (optimización matemática) a través de datos experimentales.
- Por último, para tener en cuenta la influencia de los parámetros despreciados, se pueden introducir uno o más retardos.

Los métodos basados en el desarrollo en serie no son más que, como su nombre indica, encontrar la serie de Taylor de la función de transferencia en uno o varios puntos. Reciben el nombre de Padé o Routh por las aproximaciones que se hacen de la función de transferencia bien, como suma de fracciones continuas o de momentos. La aproximación de Routh o, de Padé combinada con otro procedimiento que permita fijar los polos sin modificar las características de estabilidad (modos dominantes de Routh) son las aproximaciones más interesantes entre las incluidas en el desarrollo en Serie de Taylor.

La modelización analítica, basada en las leyes que rigen el comportamiento de un sistema, tiene como principal desventaja su complejidad, aunque lo suele convertir en una tipología de modelo de amplia aplicabilidad, mayor precisión y mayor rango de validez. Esta complejidad multiplica el coste computacional al emplear este tipo de modelos.

Son numerosos los métodos de reducción existentes, aunque quizás el más lógico y usado es la aplicación del propio conocimiento que se tenga sobre el sistema, para obtener un modelo que contemple ciertas soluciones particulares en un rango suficientemente amplio y necesario. Esta metodología de reducción se conoce como reducción física, como por ejemplo los modelos asintóticos usados en mecánica de fluidos: para situaciones particulares se desprecian términos (tiempos o dimensiones características muy pequeñas o grandes, grandes diferencias relativas entre términos de las ecuaciones...). Esta vía de reducción es muy usada a través de hipótesis, como por ejemplo cuando se desprecian las pérdidas a través de una tubería por tener una longitud muy reducida. La validez y calidad del modelo quedan marcadas por las hipótesis que se hagan. Para aclarar las diferencias conceptuales entre una modelización física y una puramente matemática, se enumeran las principales ideas asociadas a cada una.

Por otro lado, existe la posibilidad de una reducción matemática del modelo detallado. Estos métodos son más generales que los anteriores y se presentan bajo muy diferentes formas, siendo de amplia utilización en la automática. La referencia [10] muestra una buena revisión sobre métodos matemáticos de reducción. Esta tesis mencionada, describe los principales enfoques para reducir el sistema (definición de hipótesis, aproximación por serie de Taylor, criterio de mínimos cuadrados, minimax...). Quizás el más relevante es el método modal, centrado en la agregación de los modos principales de vibración, con objeto de obtener un modelo para realizar un control sobre el sistema

implementando una toma de decisiones estocástica.

De cara al trabajo realizado y expuesto en esta tesis, se destaca que el grupo de métodos está basado en tomar un desarrollo limitado de la función de transferencia. Como puede ser el caso de que lo permita el sistema, si está expresado en la base modal puede hacer una descomposición en modos dominantes (inestables y rápidos) y modos lentos, por ejemplo. Esta aproximación consiste en tomar sólo los modos dominantes. Este método es un caso particular de agregación lineal de los modos. A este primer grupo de procedimientos de desarrollo limitado, pertenecen igualmente las aproximaciones basadas en desarrollo de Taylor de la función de transferencia y retención de un número reducido de términos. Los métodos basados en desarrollos limitados no son capaces de cuantificar el error cometido en el procedimiento de reducción.

Modelización física: Leyes físicas y parámetros termofísicos observables. Complejos. Modelos blancos / grises.

Modelización matemática: Caja negra / fundamento experimental / modelización inversa / detallado+reducción=simplificado. Validez muy limitada: en un punto, para un proceso, para una entrada... Fácil de construir y fácil de usar.

1.2.3.2. Reducción a través del análisis modal

El análisis modal aparece muy referenciado en la literatura (se destaca el trabajo de A. Neveu en diferentes aplicaciones [11]–[13]) y por eso merece una especial mención. Tal y como antes se ha introducido, es una técnica utilizada para la reducción de grandes sistemas de ecuaciones diferenciales lineales con coeficientes constantes, cuya matriz ha de ser, en principio, simétrica. Por tanto, el análisis modal se enclava dentro de las técnicas de reducción, y en definitiva, se centra en el análisis de autovalores y autovectores. Por ello se extraen las principales nociones enunciadas por Sturm-Liouville [14]:

- El conjunto de autovalores es infinito
- Todos los autovalores son positivos o nulos. La nulidad corresponde al caso de sistema perfectamente aislado.
- El conjunto de autofunciones asociado a un único conjunto de autovalores, constituye un espacio vectorial, cuya dimensión suele ser uno.
- El espacio vectorial de las soluciones es ortogonal.

Cada autovalor λ_i está ligado a las constantes de tiempo τ_i del sistema por la expresión $\tau_i = 1/\alpha\lambda_i^2$. A su vez los autovectores se corresponden con los modos de vibración del sistema.

Para sintetizar la información expuesta, se va desarrollar un ejemplo sencillo sobre un muro homogéneo de una densidad de 1000 kg/m³, un calor específico de 1050 J/kg·K, conductividad de 0.4 W/m·K y espesor de 0.2 m. Este problema de flujo unidimensional tiene solución analítica (enfriamiento con temperaturas impuestas):

$$T(x, t) = \sum_{\substack{n=1 \\ \text{impar}}}^{\infty} \frac{2}{\lambda_n L} (1 - \cos \lambda_n L) \cdot e^{-\alpha \lambda_n^2 t} \cdot \text{sen} \lambda_n x$$

Ecuación 1-5. Solución analítica de la temperatura sobre el muro homogéneo descrito

Los autovalores son $\lambda_n = n \frac{\pi}{L}$ y los autovectores $\text{sen} \lambda_n x$.

Se puede comprobar, como una excitación en una cara y la respuesta en otra tiene raíces alternas, mientras que la respuesta en la misma cara de la excitación tiene raíces positivas. El significado de este hecho es la acción de atravesar el muro para manifestarse, mientras que en el caso segundo la respuesta es instantánea.

A su vez, el primer autovector da la forma del perfil de temperaturas para Fourier > 0.3

$$T(x, t) = \frac{2}{\lambda_1 L} (1 - \cos \lambda_1 L) \cdot e^{-\alpha \lambda_1^2 t} \cdot \text{sen} \lambda_1 x \quad \lambda_1 = \frac{\pi}{L}$$

Ecuación 1-2. Solución analítica de la temperatura sobre el muro homogéneo descrito

En el caso de muro homogéneo, los autovectores son independientes de las propiedades, sólo dependen del espesor y del tipo de condiciones de contorno.

La primera constante de tiempo toma un valor de 2.96 h, y esta constante de tiempo será denotada como la constante de tiempo principal del sistema.

Un resultado útil para cuantificar el interés de los diferentes modos de vibración, es calcular la energía contenida en cada uno. Para ello se aplica la siguiente fórmula:

$$E_n = \int_0^L \text{sen} \lambda_n x \, dx$$

Ecuación 1-6. Energía almacenada en el modo de vibración n (autovalor n)

Modos	Energía
1	0.1273
2	0.0424
3	0.0255
4	0.0182
5	0.0141

Tabla 1-2. Energía referida al modo de vibración i del autovalor i

Las ventajas de los métodos modales son:

- Son fácilmente aplicables a sistema con varias entradas y varias salidas.
- Las características de estabilidad o inestabilidad se conservan
- Permite relacionar los estados del sistema con los del modelo mediante una relación lineal de agregación.

Su principal inconveniente es que hay que conocer el espectro de autovalores y autovectores, lo cual es complejo desde el punto de vista numérico.

1.2.4. Identificación

La identificación de sistemas tiene diversos significados en la literatura científica. La aceptación más usada es la dada en [15] que define la identificación o modelado de un sistema como el proceso de determinar un conjunto de ecuaciones diferenciales o en diferencias, o los parámetros de tales ecuaciones, para describir un proceso físico de acuerdo con un determinado criterio, a través de mediciones.

No es necesario conocer profundamente la mecánica del sistema, e incluso es posible llevar a cabo una identificación sin conocer absolutamente nada de lo que ocurre al interior del sistema (habitual en técnicas de control [16]). En cuanto a esto último, se pueden señalar entonces dos enfoques de identificación:

Identificación de caja gris Aunque las peculiaridades de lo que ocurre al interior del sistema no son

enteramente conocidas, se tiene alguna comprensión de su mecánica interna. Este conocimiento, a priori, del sistema determina lo que se conoce como la estructura del modelo. Así, en la identificación de caja gris, se tiene previamente una estructura del modelo, y lo desconocido son los valores numéricos de los parámetros en esa estructura. La identificación se reduce entonces a tratar de hallar los valores más apropiados para esos parámetros en base a los datos medidos (entrada-salida).

Identificación de caja negra No se tiene ningún conocimiento a priori del sistema. Lo único que importa es encontrar un “mapeo” desde las mediciones de la entrada hacia las de la salida. También existe una estructura de modelo, pero esta no está predeterminada por la física del sistema, y de hecho el usuario puede probar con varias estructuras muy diferentes hasta que encuentre la que mejor se ajusta a sus propósitos. Para expresar la relación entre la entrada y la salida puede utilizarse prácticamente cualquier cosa: ecuaciones de diferencia, ecuaciones diferenciales, redes neuronales, lógica difusa, transformada wavelet, etc.

No se habla de identificación en caja blanca, porque en los sistemas presentes en edificios, bajo una experimentación real, está casi descartada la posibilidad de identificar con calidad un modelo detallado.

A veces las leyes físicas (leyes de Newton, leyes de Maxwell, leyes de Kirchoff, etc.) que rigen el comportamiento de un sistema, no son conocidas o bien lo son con una generalidad tal que, son imposibles de aplicar por la complejidad de los modelos a los que dan lugar. Cuando tras el proceso de idealización y abstracción, a través de la observación y experimentación no es posible concluir un modelo del sistema útil o cumplan los objetivos requeridos, se lleva a cabo la identificación.

Unido a lo anterior, aparece otro argumento más, si lo que se quiere modelar es un sistema del que se conoce su comportamiento ante determinadas excitaciones, se propone como objetivo inicial. Es decir, aplicar una metodología indirecta, basada en replicar determinadas entradas a un sistema y a un modelo, y conseguir salidas equivalentes. Esta vía es la conocida en el campo industrial, como ingeniería inversa.

Esta es la base conceptual de la identificación, pero aún hay que dar un paso más [17] cuando se quieren modelos que respondan a una realidad física. En este caso, se debe prestar interés por el valor que toman los parámetros, puesto que formarán parte de las propias propiedades del sistema. En esta tesis se descartan los modelos de caja negra ampliamente usados en control, y las líneas de desarrollo se enclavan en las dos tipologías restantes: caja blanca o modelos detallados, en las que el sistema es modelado con más o menos hipótesis pero de forma semejante; y caja gris o modelos simplificados, en los que los parámetros tienen una base física. Hay que destacar que ambas tipologías tendrán una validez física dependiente del valor que tomen sus parámetros.

En particular es interesante destacar [18]:

- 1) La equivalencia entre las salidas del sistema y el modelo habrá que establecerlas adecuadamente de forma inequívoca. Normalmente se define una función objetivo que cuantifica la calidad del modelo. Si se ha fijado el modelo a identificar y éste es paramétrico, la acción consiste en la determinación de los parámetros. Muchas veces lo que es sólo la estimación de parámetros se confunde con el método de identificación.
- 2) La identificación tiene como pilares fundamentales la experimentación y la observación, aunque en muchos casos sean sustituidos por la simulación con modelos detallados. De hecho, los modelos obtenidos mediante identificación, son rigurosamente válidos sólo para las entradas para las que fueron obtenidos. En la práctica no es exactamente así, puesto que los modelos implementados no son de caja negra o comportamiento, si no que incorporan el conocimiento que se tiene del sistema y responden a la física del mismo (caja gris). En todo caso, la selección y manipulación que se haga de las entradas aplicadas es muy importante (véase capítulo calidad e incertidumbre del modelo).

- 3) El análisis inverso es más complejo que el directo, ya que el problema matemático a resolver es el de la minimización de una función objetivo que en la práctica es no lineal. El concepto de función objetivo es una generalización de una función error calculada como diferencia entre los datos medidos y los calculados con una combinación cualquiera de parámetros.

A lo largo de la tesis, identificación es el proceso que incluye tanto la búsqueda de parámetros (óptimo-minimización), el tratamiento de los datos experimentales, y la validación-aceptación del modelo. En la literatura son innumerables los trabajos que tratan el tema de estimación de parámetros a través de medidas, identificación de sistemas, calibración de modelos con experimentos... independientemente del sistema físico al que se aplique, pero teniendo en común la importancia de conocer completamente el sistema que se quiere identificar, como mínimo para realizar experimentos de calidad, y de tratar los datos obtenidos con mesura y conocimiento. De ahí que, a lo largo de las siguientes páginas, se hable experimentación y calidad e incertidumbre de datos.

Tal y como se ha dicho al comienzo del capítulo, la estructura y redacción de estas páginas pretende esbozar al lector los conocimientos y la línea argumentada llevada a cabo para la elección, tanto del tipo de modelo para los sistemas a tratar, como la técnica de identificación que forman parte del paquete de caracterización. Por ello, se destacan ahora dos criterios que forman parte de los pilares de la identificación térmica en edificios para modelos paramétricos [19], [20], aunque existe muchos más [21], usados en campos diferentes a la edificación.

Método de predicción de error

También denominado PEM, es el implementado por CTSM [22] , y está basado en modelos matemáticos de búsqueda de parámetros por minimización entre la diferencia del modelo con respecto a la señal de salida para ciertas excitaciones desde un estado base (t-1). Este proceso suele ser complicado por lo que se recurre a una resolución numérica iterativa.

El método del error de predicción es un método general que agrupa varios métodos particulares conocidos, como son el ARX, ARMAX, BJ, OE, entre otros. Todos estos métodos no son más que casos particulares del PEM. El objetivo no es más que encontrar el mejor modelo que estima la salida del sistema conociendo los datos pasados [23]. Para aclarar la información expuesta se recurren a las siguientes figuras.

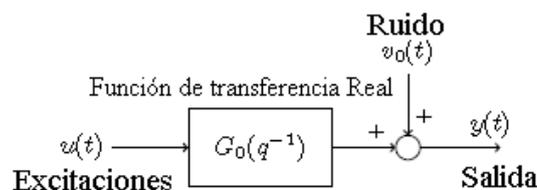


Figura 1-5. Esquema simplificado de un proceso real

Este esquema pretende describir el comportamiento real y medido del sistema que, ante unas excitaciones, produce una determinada salida asumiendo un cierto ruido. La metodología PEM, crea la siguiente similitud:

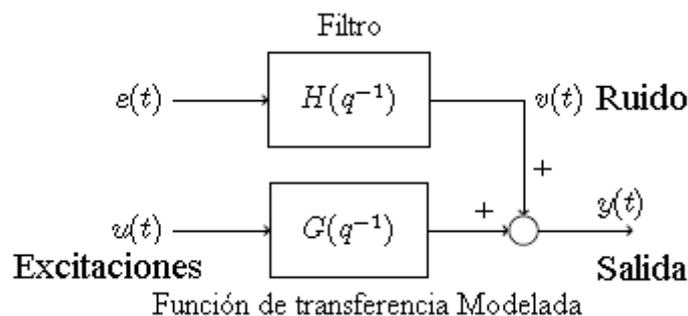


Figura 1-6. Esquema simplificado del conjunto anterior aplicando la metodología PEM

La salida medida es función del modelo aplicado a las excitaciones y de un filtrado realizado a los residuales del mismo para convertirse en una señal de ruido, en la que se enclava no solo el ruido real, sino toda la incertidumbre del modelo.

El PEM trata entonces de minimizar los errores de predicción, los cuales hay que estimar (estadística) [20].

Sus principales cualidades de cara al proceso de identificación en térmica de edificios son:

- Más sensible a la variación de los parámetros a altas frecuencias
- Demasiado optimista a bajas frecuencias régimen permanente
- Aparecen fuertes perturbaciones si los residuales están correlacionados.

Las técnicas de identificación de sistemas han ido evolucionando de forma bastante rápida, procurando atender la demanda de modelos cada vez más precisos. Gran parte de la literatura consultada sobre identificación de sistemas, trata de cómo hacer estructuras de modelación dinámica por identificación en modelos polinómicos con los métodos de predicción del error (PEM). Obtener modelos con las técnicas PEM es muy difícil en el caso de sistemas multivariables de alto orden (con un gran número de entradas, salidas y estados).

Cuando el ruido no es blanco (no tiene como valor medio un número cercano a cero), la estimación de parámetros suele ser errónea. Para evitar este problema se suele recurrir a aumentar la base temporal, mejorar los errores en las medidas, y razonar las variables y los parámetros elegidos en el modelo a través del conocimiento de la física del sistema.

En las aplicaciones realizadas en las celdas PASSYS aparecieron diferencias no uniformes entre el modelo y las mediciones, las cuales fueron corregidas con el uso de factores correctores.

Método del error de salida

También denotado con OEM [19]–[21], [23], [24] implementado en LORD, se basa en modelos deterministas de búsqueda de parámetros por minimización del error entre el valor ofrecido por el modelo y el medido bajo las mismas excitaciones.

Es la técnica más usada para la estimación de parámetros en sistemas dinámicos estables [25], [26]. Y es válida para sistemas lineales y no lineales.

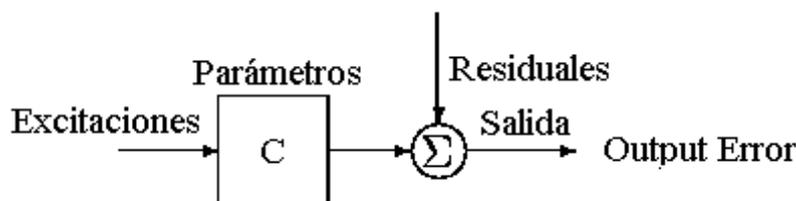


Figura 1-7. Esquema de identificación aplicado en las técnicas OEM

Sus principales cualidades de cara al proceso de identificación en térmica de edificios son:

- Más sensible a bajas frecuencias que el anterior
- Intervalos de confianza muy optimistas si los residuales están correlacionados
- Debido a la propia inercia del modelo, existe una distribución correlacionada de errores con respecto a los valores que toma el modelo.
- Ofrece la posibilidad del empleo de factores correctores en el algoritmo de minimización.

- Permite una identificación directa mientras se toman las medidas. Este hecho permite salvar problemas de “feedback” cuando es desconocido.
- Da un orden de magnitud para el ruido blanco a esperar.

En esta técnica es habitual el uso de factores correctores, aunque no existen referencias que demuestren la necesidad de establecer pesos a los diferentes parámetros de cara al proceso de optimización.

No existe una solución clara para el uso de una u otra técnica, incluso tras los extensivos análisis realizados en los proyectos PASSYS o relacionados, no se ofrece una solución ni un protocolo de actuación. Como conclusión, esbozada del análisis bibliográfico realizado y extraída sobre todo de las referencias [27]–[29], aparece la técnica “trial and error”, es decir, prueba y error, bien a través de experimentación, bien a través de simulación, bien a través de técnicas de evaluación. Tal y como se quería demostrar no existe una técnica clara para la identificación de parámetros.

En cuanto a modelos RC [30] y redes neuronales [31], [32], se exponen en diversos trabajos que la identificación de las resistencias tienen en valor medio un error del 18%, bastante menos si se analizan los resultados que obtendría una herramienta como DOE-2. A su vez, en la capacitancia se habla de un 70% de diferencia entre el valor obtenido directamente de las especificaciones del edificio y del valor identificado.

Los métodos de identificación por predicción del error son usados cuando son realizables pruebas para la validación del modelo y existe un óptimo. Este tipo de técnicas son útiles para encontrar dependencias funcionales entre parámetros, aunque se requieren datos experimentales de alta calidad [33]. En cambio, la minimización del error de salida no es tan restrictivo, sobre todo porque los métodos predictivos tienen interés cuando se cumple la primera premisa, se puede realizar una validación total fuera de las condiciones medidas para asegurar que la predicción que hace el modelo es aceptable.

La modelización analítica y la identificación no son técnicas excluyentes sino complementarias:

- Los modelos obtenidos vía identificación tienen un rango de validez limitado. Cuánta más física se haya introducido y más riqueza experimental, mayor será el rango de validez de este.
- Muchas veces los parámetros del modelo no tienen significado físico cuando se obtienen de un proceso de optimización, por lo que el factor matemático entra en juego en el proceso.
- Los modelos que se identifican serán más simples que los obtenidos de forma analítica.
- La elección del modelo y su orden puede ser un problema difícil de resolver, incluso si se procede con un método iterativo de prueba y error, el cual puede nunca acabar.
- La calidad de los datos procedentes de la experimentación y observación es vital en la aplicación de un método de identificación. En la modelización física sin embargo, una vez conocidos los parámetros termofísicos que definen al sistema, se depende menos de la experimentación y observación.

Los siguientes 6 puntos pueden ser representativos de las dificultades a solventar durante el proceso de identificación:

- Diseño del experimento. Quizás no es la primera fase, pero es clave ya que las mediciones que se hagan serán las entradas del proceso, por eso los errores en esta fase deben ser minimizados al máximo.
- Duración del experimento. Unido a la etapa anterior aparece la cantidad de datos requeridos, junto con los experimentos particulares a realizar. Esta parte aparece destacada para poder señalar la idea de que el modelo identificado es ciertamente válido en el rango de datos experimentales usado para la elección del valor de sus parámetros.

- Pre-proceso. Evaluar los datos medidos previamente a su uso en el proceso de identificación. Esta evaluación se puede hacer de forma gráfica o a partir del cálculo de variables estadísticas de juicio.
- Análisis. Elegido el modelo y su estructura, se arranca el proceso de identificación. Para ello se debe seleccionar la herramienta informática, la vía de ajuste predicción o error de salida, determinista o estocástico, mínimos cuadrados o máxima igualdad.
- Post-proceso de resultados. Es la validación del modelo para ser usado según su propósito. Se recomienda el procedimiento descrito por [34] del que se extraen las siguientes ideas.
 - Residuales pequeños y ruido blanco
 - Mismas tendencias y coherencia con otros datos
 - Validación interna: validación cruzada, el modelo proporciona buenos resultados con otros datos no usados en la identificación
 - Validación externa: el modelo responde con su realidad
 - Estabilidad: se cumple el régimen permanente, y posibles cambios en las variables de entrada se traducen en perturbaciones en la salida dentro de un orden de magnitud apropiado.
 - Identificable: el número de parámetros y los grados de libertad son apropiados de acuerdo al número de datos que se disponen.
 - Simplicidad: mínimo número de parámetros necesario.
- Feedback: aceptación del modelo de acuerdo a su finalidad. Sentido común y conocimiento de la realidad modelada son clave en esta fase.

Especial atención hay que tener cuando a partir de los parámetros identificados se busca una similitud o conversión hacia los parámetros físicos. Es probable que esta no exista, o puede que no sea trivial la formulación matemática requerida.

1.2.5. Caracterización Inversa

Se entiende por caracterización en esta tesis el proceso integrado completo con el que se obtiene un modelo identificado, que recibirá el nombre de caracterización. A modo de ejemplo, de la caracterización se obtiene un modelo simplificado o detallado cuyos parámetros tienen valores elegidos a través de mediciones, de forma directa o indirecta, como se ha explicado en el epígrafe “objetivo de la metodología”.

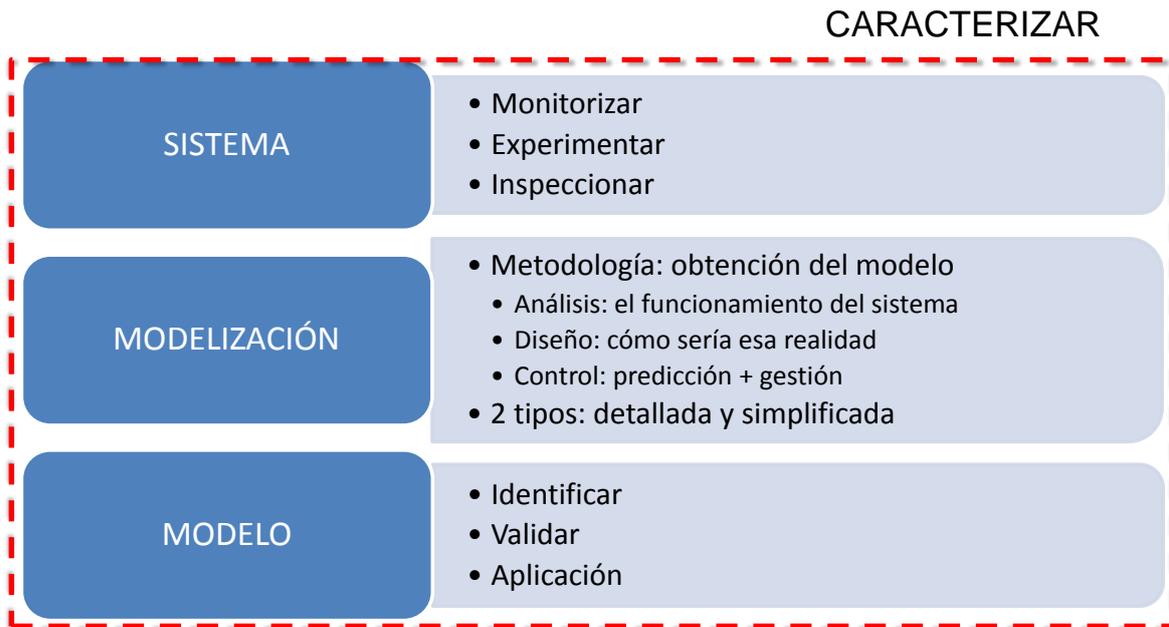


Figura 1-8. Visión global del proceso de caracterización

A lo largo de la tesis se distinguen dos tipologías de modelos: detallados y simplificados. La tesis desarrolla una metodología para la obtención de modelos simplificados, haciendo referencia a los modelos detallados como los implementados en la herramienta [35].

Por acuñar el significado que ofrecen las enciclopedias, la caracterización de materiales se refiere al establecimiento de las características de un material determinado a partir del estudio de sus propiedades físicas, químicas, estructurales, etc. Pero en el campo en el que se extiende la tesis, se trata más de una caracterización inversa o ingeniería inversa, es decir, en algún momento el proceso se alimenta de datos experimentales y se calibra/deduce un modelo o sus parámetros (identificar).

La ingeniería inversa es el proceso de descubrir los principios tecnológicos de un dispositivo, objeto o sistema, a través del razonamiento deductivo de su estructura, función y operación (experimentación). Chifofsky [36] la definía como “el análisis de un sistema para identificar sus componentes y dependencias que existen entre ellos, para extraer y crear abstracciones de dicho sistema e información de su diseño”. Esta definición está motivada por los inicios de este tipo de técnicas, cuando la misión era desentrañar los misterios y secretos de diseños o patentes, bien como espionaje o bien como usuarios/propietarios de un cierto sistema del que no se conocía ningún dato. Es este último argumento el que a día de hoy se ha extendido en la industria para evaluar comportamientos inesperados, planes de rehabilitación.

En conclusión, la caracterización con el adjetivo inversa es a lo largo de la tesis el gran hito satisfecho.

2. POTENCIAL CIENTÍFICO Y TECNOLÓGICO

En este capítulo se sintetiza la búsqueda bibliográfica realizada con la finalidad de dar solución a los objetivos establecidos en el trabajo doctoral y conocer los puntos débiles de los trabajos publicados para focalizar el esfuerzo de la metodología expuesta.

La estructura del capítulo es clara, primero un resumen personal de la literatura más relevante consultada en todos los tópicos involucrados en la tesis, tanto a nivel estado del arte desarrollado como bibliografía usada; y por último el potencial científico y tecnológico que conlleva la tesis.

2.1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1.1. Modelización

Un modelo es una representación de un sistema. Como tal puede ser muy variada: prototipos, reproducciones a escala, representaciones gráficas o simbólicas...

El modelo debe proporcionar una representación útil del sistema. Es decir, un modelo puede ser interesante, aunque no responda a la realidad del sistema, siempre que sea útil (positivismo). Entre sus utilidades destacan: diseño, análisis y control.

La información sintetizada en este epígrafe, junto con extensos desarrollos de la misma, aparece en el trabajo de los autores [5]–[7].

Básicamente hay dos vías para la construcción matemática de modelos:

- Modelos analíticos: se obtienen a partir de las leyes básicas de la física (leyes de Newton o balances), y describen el comportamiento dinámico del sistema.
- Modelos empíricos o de identificación: Sus parámetros se obtienen a través de un proceso de identificación con datos experimentales.

En los modelos de identificación destacan las siguientes propiedades, que a su vez son las principales diferencias con los modelos analíticos (información ampliada en el epígrafe identificación):

- Su validez, en principio, está limitada al rango de datos con el que se han identificado: una cierta entrada, un punto de trabajo, proceso...
- Deben contener la esencia de la física del sistema al que caracterizan, pero los parámetros son obtenidos a través de un proceso de optimización matemática con o sin restricciones que pueden no asegurar directamente esa esencia. Dependerá fuertemente de la riqueza de los datos experimentales.
- Son fáciles de construir y usar; lo que se liga a su carácter matemático, opuesta a la esencia física, en la mayoría de los casos.

La principal referencia [7] sobre esta temática, quién distingue 3 tipologías de modelos dinámicos:

- Mentales e intuitivos: mover volante hace que gire el coche.
- Gráficos y tablas: bode.

- Modelos matemáticos: ecuaciones en diferencias y diferenciales.

Cabe destacar que esta referencia citada, una de las más destacadas sobre la temática, no trata los modelos no lineales. Tampoco la evaluación de los datos experimentales que se tienen, o la poca flexibilidad del modelo con respecto a esos datos cuando se esté identificando. Otro hecho que cabe destacar, es como no hay una teoría clara de reducción del modelo, se habla de evaluación del número de parámetros a incorporar al modelo a base de prueba error, pero no de cómo elegir ese número de partida.

A lo largo de la tesis doctoral no se va a hablar sobre los métodos no paramétricos, tipo funciones o gráficos, ya que al no estar necesariamente caracterizados por parámetros con dimensiones, carecen del sentido físico exigido al modelo para su futura extrapolación. Aún así, este tipo de técnicas son útiles para el análisis de transitorios, análisis en frecuencia, correlaciones o análisis espectral, principalmente. Lo que en edificios se puede traducir en diagnóstico.

Esto último, promueve la siguiente puntualización: a lo largo de la tesis se entiende por modelización la metodología de obtención de modelos. Existen trabajos en los que la modelización es un opuesto a la identificación: obtener ecuaciones fenomenológicas que rigen el comportamiento del sistema, mientras que la identificación será una metodología indirecta de estimación de parámetros.

En el anexo se puede revisar más información sobre las diferentes posibilidades de modelización analizadas, con objeto de elegir la más apropiada de acuerdo a los objetivos buscados. En este caso, el uso de funciones de transferencia.

Del trabajo doctoral [4] se extrae la información referente a la clasificación de modelos que es adoptada en la tesis:

CRITERIO DE CLASIFICACIÓN	TIPO DE MODELO
Dependencia del tiempo	Estáticos Dinámicos
Número de variables de entrada y salida	Monovariantes Multivariantes
Existencia de parámetros	Paramétricos No paramétricos
Existencia de variables de estado	De representación interna (variables estado) De representación externa (entrada-salida)
Dependencia espacial	Parámetros concentrados Parámetros distribuidos
Variación temporal de los parámetros	Invariantes Variantes
Aplicación del principio de superposición	Lineal No lineal

Existencia de variables aleatorios	Deterministas Estocásticos
Valores de la variable tiempo	Continuos Discretos
Dependencia de la salida	Dominio temporal Dominio frecuencial

Tabla 2-1. Características principales de los modelos para caracterización

No existen reglas universales para la creación de modelos, y por este motivo, cada sistema tiene sus propias particularizaciones, y por tanto diversas metodologías de obtención de modelos. En conclusión, un modelo o metodología útil para un sistema no tiene porqué serlo para otro. En la tesis se ha puesto como requerimiento lo contrario: amplio rango de aplicabilidad para tipología de modelización encontrada (capítulo 2). A pesar de lo dicho, existen principios básicos que deben ser tenidos en cuenta:

- 1 **Invarianza:** Lo que caracteriza a un sistema es la relación entre las variables que en él interaccionan. El modelo deberá recoger por lo tanto las invarianzas que existen en el sistema ante diferentes condiciones de observación.
- 2 **Causalidad:** en los sistemas conocidos existe siempre una relación causa-efecto de manera que las causas preceden a los efectos. La variable dependiente $y(t)$ de un modelo dependerá de las entradas $u(t')$ siendo $t' < t$.
- 3 **Simplicidad:** Un modelo debe cumplir el principio que puede denominarse de “parsimoniosidad”, cuyo enunciado, basado en el sentido común, diría: “no usar parámetros adicionales para describir el comportamiento dinámico de un sistema si no son necesarios”. En todo caso, es lógico pensar que si un modelo contiene muchos parámetros puede asaltarnos la duda de si el ajuste de la salida del sistema se consigue gracias a las posibilidades de ajuste de los numerosos parámetros del modelo, en vez de por que se ha captado lo esencial del funcionamiento del sistema, como ocurriría si el número de parámetros fuera mínimo. El problema es muchas veces saber cuál es el menor número de parámetros y cuáles, para representar correctamente un determinado sistema.
- 4 **Resolubilidad:** tanto si se trata de un modelo de variables de estado como de descripción externa, debe ser posible expresar los estados o/y la salida en función del tiempo. De poco sirve un modelo en el que la salida no pueda ser obtenida.

Existen una serie de principios que no han sido recogidos en este resumen por no afectar directamente a los modelos objeto de la tesis, pero que pueden encontrarse en [3] como son idealización, abstracción, jerarquía, analogía o iteración, entre otros.

Los modelos matemáticos más recurridos en identificación son [8,9]:

- Ecuaciones diferenciales

Son los más habituales. Consisten en la modelización analítica convencional en forma diferencial.

Por ejemplo si se modela la conducción unidimensional sobre un muro, se obtiene el siguiente planteamiento del modelo:

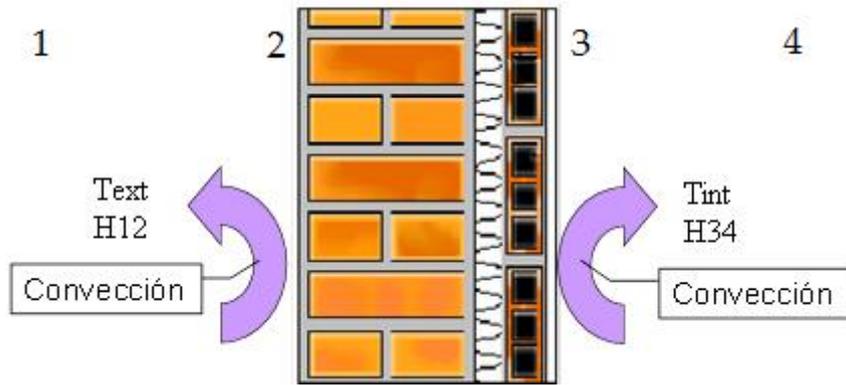


Figura 2-1. Esquema de la transferencia de calor a través de un cerramiento opaco

En la imagen se tiene a la derecha convección a T_{ext} con una conductancia H_{12} , a la izquierda conductancia H_{34} a T_{int} .

$$C_2 \frac{\partial T_{SE}}{\partial t} = H_{12} \cdot (T_{SE} - T_{EXT}) + H_{23} \cdot (T_{SE} - T_{SI})$$

Ecuación 2-1. Balance nodo 2

$$C_3 \frac{\partial T_{SI}}{\partial t} = H_{23} \cdot (T_{SI} - T_{SE}) + H_{34} \cdot (T_{SI} - T_{INT})$$

Ecuación 2-2. Balance nodo 3

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \dot{T} \quad \frac{1}{R[\frac{W}{K}]} = H[\frac{K}{W}]$$

Y este podría ser un ejemplo de una modelización física a partir de un modelo diferencial.

- Análisis modal

Es proceso útil para determinar las frecuencias naturales. Suele combinarse con la resolución a través de elementos finitos debido al elevado número de nodos. Su simplificación (reducción) en los principales modos de vibración (constantes de tiempo), la particularización del modelo a través de sus condiciones de contorno... lleva al tratamiento en forma de ecuaciones diferenciales. Esta información es ampliada en el epígrafe "Reducción", aun así sobre el ejemplo anterior se expone la forma de trabajar general para su análisis modal:

$$\dot{T} = C^{-1} \cdot K \cdot T + C^{-1} \cdot D \cdot U$$

Ecuación 2-3. Escritura matricial simplificada

$$T = \begin{bmatrix} T_{SE} \\ T_{SI} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{H_{12}+H_{23}}{C_2} & \frac{-H_{23}}{C_2} \\ \frac{-H_{23}}{C_3} & \frac{H_{23}+H_{34}}{C_3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T_{SE} \\ T_{SI} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{-H_{12}}{C_2} & 0 \\ 0 & \frac{-H_{34}}{C_3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T_{EXT} \\ T_{INT} \end{bmatrix}$$

Ecuación 2-4. Matricial desarrollado

$$\det(C^{-1} \cdot K - \lambda \cdot I) = 0$$

$$\det \begin{bmatrix} \frac{H_{12}+H_{23}}{C_2} - \lambda & \frac{-H_{23}}{C_2} \\ \frac{-H_{23}}{C_3} & \frac{H_{23}+H_{34}}{C_3} - \lambda \end{bmatrix} = 0$$

$$\left[\left(\frac{H_{12} + H_{23}}{C_2} \right) \cdot \left(\frac{H_{34} + H_{23}}{C_1} \right) \cdot \lambda^2 - \left(\frac{H_{23}^2}{C_1 \cdot C_2} \right) \right] = 0$$

Ecuación 2-5. Cálculo de la ecuación característica a partir del determinante

Una vez calculados los autovalores λ se calculan los autovectores, y a partir de ellos se realiza el estudio modal.

- Series temporales (ARMA)

En estadística, son conocidos como modelos autorregresivos de media móvil (en inglés AutoRegressive Moving Average models, abreviados ARMA), también llamados Modelos Box-Jenkins, y suelen aplicarse a series temporales de datos [37]. Dada una serie temporal de datos X_t , el modelo ARMA es una herramienta para entender y, aún más, para predecir futuros valores de la serie. El modelo está formado por dos partes, una parte autorregresiva (AR) y otra de media móvil (MA). El modelo se conoce con el nombre de modelo ARMA (p,q), donde p es el orden de la parte autorregresiva y q es el orden de la parte de media móvil.

Puesto que existe una variable X_t con los valores pasados, se asume que, si el error está controlado, el modelo es lineal, salvo que se especifique lo contrario. Si la dependencia no es lineal, entonces el modelo se llama específicamente modelo de media móvil no lineal (NMA), modelo autorregresivo no lineal (NAR) o modelo autorregresivo de media móvil no lineal (NARMA).

Los modelos autorregresivos de media móvil pueden generalizarse con otros métodos. Véanse también los modelos ARCH (modelos de heterocedasticidad condicional autorregresivos) y los modelos autorregresivos integrados de medias móviles ARIMA. Si se tienen que ajustar múltiples series temporales, entonces se puede ajustar un modelo vectorial ARIMA (VARIMA). Si las series temporales en cuestión, muestran una memoria lejana, entonces es apropiado un modelo ARIMA fraccional (FARIMA, a veces denominado ARFIMA). De pensar que los datos presentan estacionalidad, entonces debe usarse un modelo SARIMA.

De cara a las propiedades expuestas en la tesis, los modelos ARMA son modelos lineales e invariantes en el tiempo, a su vez se enclavan en la tipología de entrada-salida, dadas unas excitaciones se calcula la salida del modelo. A modo de conclusión, esta tipología de modelos son útiles para trabajos puramente numéricos donde la solución analítica no existe o es muy complicada, y tal y como se ha visto existe muchas variantes que maximizan su aprovechamiento.

- Modelos RC

Los modelos RC son un buen punto de inicio en la modelización edificatorio, al considerarse modelos simplificados. Consisten en crear el sistema eléctrico equivalente a un sistemas de ecuaciones diferencias de grado uno, de esta forma se puede entender estos modelos como una rescritura de las ecuaciones diferencias comentadas con anterioridad.

Estos modelos ofrecen por tanto, una interpretación física de forma directa, con el inconveniente de que las ecuaciones se vuelven rápidamente no manejables y con demasiados parámetros. Para apoyar esta explicación se procede al desarrollo de un ejemplo, análisis de la conducción transitoria sobre un pavimento:

Se ha supuesto que el pavimento es un sistema de capacidad, es decir, su temperatura es cada instante es prácticamente uniforme en todo el espesor.

La representación analógica se muestra en la figura:

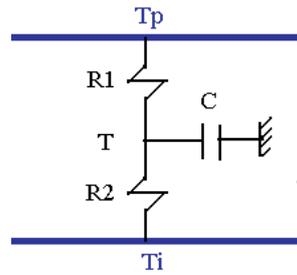


Figura 2-2. Modelo RC de la transferencia de calor a través de un forjado

En este modelo se calcula la transferencia de calor desde la superficie superior T_p hasta la temperatura superficial inferior T_i . En el modelo los parámetros son:

$$R_1 = R_2 = \frac{l}{2 \cdot K}$$

$$C = \rho \cdot C_p \cdot l$$

Ecuación 2-6. Parámetros asociados al modelo del forjado

Siendo:

l espesor del elemento

K conductividad del elemento [W/m·°C]

ρ densidad del elemento [Kg/m·°C]

C_p calor específico del elemento [J/Kg·°C]

El campo de temperaturas asociado a la representación analógica anterior, se obtiene de resolver la ecuación diferencial (modelo en ecuación diferencial del sistema).

$$C \cdot \frac{dT}{dt} = -\frac{2}{R}T + \frac{T_p}{R} + \frac{T_i}{R}$$

Ecuación 2-7. 1er principio sobre el forjado. Sistema de capacidad

Existen algunas referencias como [28], [38]–[40], en las que se desarrollan procedimientos matemáticos para el tratamiento de los modelos RC con objeto de, redirigirlos hacia modelos de series temporales anteriores que permitan obtener modelos identificados de mayor riqueza y calidad. En energética edificatoria estos modelos suelen usarse para obtener los parámetros UA y gA a través de datos experimentales.

- Modelos de estado

El estado de un sistema dinámico [8] es el conjunto más pequeño de sus variables (denominadas variables de estado) tal que, el conocimiento de esas variables en $t=t_0$, juntamente con la entrada para $t > t_0$ determinan totalmente el comportamiento del sistema para cualquier tiempo $t > t_0$. Por tanto se puede describir un sistema dinámico, consistente en un número finito de elementos concentrados, por ecuaciones diferenciales ordinarias, en las que el tiempo es la variable independiente. Si además se utiliza la notación vectorial-matricial, se puede expresar una ecuación diferencial de enésimo orden por una ecuación diferencial vectorial-matricial de primer orden con estos modelos. Por consiguiente, si n elementos del vector constituyen un juego de variables de estado, se denomina ecuación de estado a la ecuación diferencial vectorial-matricial.

Si se analiza el ejemplo del muro que se ha mantenido a lo largo del hilo argumental de este epígrafe, se puede ver que la ecuación de estado ligada al conjunto de ecuaciones diferenciales es la siguiente:

$$\dot{T} = C^{-1} \cdot K \cdot T + C^{-1} \cdot D \cdot U$$

$$T = \begin{bmatrix} T_{SE} \\ T_{SI} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{H_{12}+H_{23}}{C_2} & \frac{-H_{23}}{C_2} \\ \frac{-H_{23}}{C_3} & \frac{H_{23}+H_{34}}{C_3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T_{SE} \\ T_{SI} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{-H_{12}}{C_2} & 0 \\ 0 & \frac{-H_{34}}{C_3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T_{EXT} \\ T_{INT} \end{bmatrix}$$

Ecuación 2-8. Formulación matricial de la transferencia de calor en el forjado

La gran utilidad de este tipo de modelización es obtener un modo compacto y conveniente para analizar el sistema, sobre todo cuando se tienen múltiples entradas y salidas. Cuando sucede esto último la transformada de Laplace se complicaría, y el análisis en frecuencia es muy limitado, por lo que son los modelos de estado los más aconsejables.

Por tanto, a modo de síntesis, los modelos de estados dominan los problemas esquematizados en la siguiente figura:

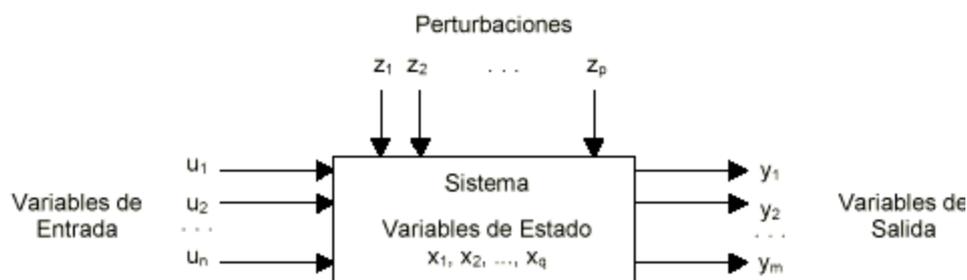


Figura 2-3. Esquema de modelización en ecuaciones de estado de un sistema tipo

Donde el modelo tendría una forma como la que aparece en la parte inferior, resultando fácil de manejar y operar.

$$[Y(s)] = [G(s)] \cdot [U(s)]$$

$$\begin{bmatrix} Y_1(s) \\ Y_2(s) \\ \vdots \\ Y_q(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) & \dots & G_{1p}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) & \dots & G_{2p}(s) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{q1}(s) & G_{q2}(s) & \dots & G_{qp}(s) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_1(s) \\ U_2(s) \\ \vdots \\ U_p(s) \end{bmatrix}$$

Ecuación 2-9. Formulación matemática de un modelo de estados tipo.

Es importante destacar como la tipología de modelo de estado, es una interacción entre las antes comentadas, y muchas veces suele aparecer como modelos de estado moda por ejemplo. A la par son muy usados cuando se requiere analizar la respuesta de un sistema desde una situación de equilibrio (estado 1) hasta un estado 2; por ejemplo evaluación de ciertas excitaciones.

- Modelos en el dominio de la frecuencia

El dominio de la frecuencia es un término usado para describir el análisis de funciones matemáticas o señales en frecuencia. La tipología de este tipo de modelos más usada son los gráficos, donde se muestra la evolución de las componentes de la señal según la frecuencia en la que oscilan, dentro de un rango determinado. Una representación frecuencial incluye también, la información sobre el desplazamiento de fase que debe ser aplicado a cada frecuencia para poder recombinar las componentes frecuenciales y poder construir de nuevo la señal original (resultado de la respuesta en

infinitas frecuencias).

El dominio de la frecuencia está relacionado con las series de Fourier y la transformada de Fourier, las cuales permiten descomponer una señal periódica en un número finito o infinito de frecuencias. En este punto no se va a profundizar en los conceptos de este tipo de modelización, ya que la tesis trabaja en el dominio del tiempo, aún así se destaca que es una línea de investigación de enorme actividad en el campo de la teoría de la señal y las comunicaciones, y que existe varios trabajos de bastante relevancia en los pilares de esta tesis [4], [41].

Es quizás, menos intuitivo que el dominio del tiempo, por eso de que controlar, incrementar o decrementar una frecuencia no es algo natural. Normalmente en este tipo de estudios se usan dos tipos de señales: señales de frecuencia constante y señales de frecuencia incremental. Y a menudo tienden al empleo de números complejos.

En la literatura, este tipo de modelos aparecen o bien de forma gráfica o en funciones frecuenciales (Laplace o Zeta). Es más habitual destacarlos de forma gráfica, y de ahí que aparezcan varias tipologías de gráficos, como puede ser los diagramas polares, diagrama de Nyquist, diagramas de Black, diagramas de Black Nichols, y diagramas de Bode.

En técnica edificatoria, esta vía de modelización es útil a nivel de desarrollo detallado o analítico, puesto que el modelo para identificación tiene algunas deficiencias difíciles de solventar, la más grave es la necesidad de experimentar un edificio real con excitaciones a la carta para poder disponer de un espectro amplio en las frecuencias excitadoras.

- Redes neuronales

El fundamento de las redes neuronales [42] y de los sistemas expertos es la inteligencia artificial, la cuál se puede definir como la comprensión desde el punto de vista informático del comportamiento inteligente. En una red neuronal se persigue reproducir el esquema neuronal, tanto en sus unidades de proceso (neuronas), como en sus conexiones y modo de establecerlas. En cambio, un sistema experto es una lista de reglas memorizadas y una capacidad de inferir conclusiones a través de las mismas, que traslada la experiencia del creador del sistema hasta el software.

En general se puede afirmar que los "sistemas expertos" han sido empleados con éxito en problemas que puede ser estrictamente definidos mediante reglas. Pero cuando los datos de entrada son complejos e inciertos, o las reglas no son fácilmente formulables, la solución es aplicar una red neuronal. De esta forma se consigue un mejor rendimiento cuando hay incertidumbre o datos incompletos en el conocimiento empleado.

Los sistemas expertos emulan el comportamiento de un experto en un dominio concreto y en ocasiones son usados por los propios expertos para facilitar su trabajo, con la idea de mejorar la calidad y rapidez en las respuestas, lo que se traduce en una mejora de la productividad del experto. En otras palabras, un SE es uno de los medios más potentes y flexibles para obtener soluciones a una variedad de problemas que a menudo no pueden ser tratados por otros métodos más tradicionales. Esta es la razón de que su uso esté proliferando en muchos sectores, donde sus aplicaciones están demostrando ser críticas en el proceso de apoyo a la toma de decisiones y resolución de problemas. Otra razón es la mejora de una labor profesional; un sistema experto tiende a una ganancia económica con un orden de magnitud de diez veces.

Las redes de neuronas artificiales (denominadas habitualmente como RNA o en inglés como: "ANN") son un paradigma de aprendizaje y procesamiento automático inspirado en la forma en que funciona el sistema nervioso de los animales. Se trata de un sistema de interconexión de neuronas en una red que colabora para producir un estímulo de salida. En inteligencia artificial es frecuente referirse a ellas como redes de neuronas o redes neuronales.

Las técnicas de inteligencia artificial datan de los años 60, cuando aparecen las primeras redes

neuronales artificiales basadas en las conectividades entre un conjunto de nodos y su capacidad de aprendizaje, emulando el comportamiento del cerebro humano, y el de los primeros sistemas borrosos que basan su funcionamiento en la existencia de funciones de pertenencia y en un conjunto de reglas para imitar el lenguaje natural. Las primeras redes neuronales han dado lugar en la actualidad a software más avanzados basados en técnicas estadísticas y en procesamiento de señal. Por el contrario, los sistemas borrosos siguen teniendo una gran aceptación, sobre todo en Japón, tomando de las redes neuronales la capacidad de aprendizaje y dando lugar a sistemas neuro-borrosos con los cuales se han desarrollado multitud de sistemas de control y sistemas expertos de gran complejidad.

La aplicación de este tipo de técnicas a sistemas de control que emulan el comportamiento humano es muy intuitivo y ha tenido mucho éxito. En la actualidad existen complejos paquetes de desarrollo de sistemas neuro-borroso que facilitan la labor de diseño.

A su vez, una red neuronal se compone de unidades llamadas neuronas. Cada neurona recibe una serie de entradas a través de interconexiones y emite una salida. Esta salida viene dada por tres funciones:

1. Una función de propagación (también conocida como función de excitación), que por lo general consiste en el sumatorio de cada entrada multiplicada por el peso de su interconexión (valor neto). Si el peso es positivo, la conexión se denomina excitatoria; si es negativo, se denomina inhibitoria.
2. Una función de activación, que modifica a la anterior. Puede no existir, siendo en este caso la salida la misma función de propagación.
3. Una función de transferencia, que se aplica al valor devuelto por la función de activación. Se utiliza para acotar la salida de la neurona y generalmente viene dada por la interpretación que queramos darle a dichas salidas. Algunas de las más utilizadas son la función sigmoidea (para obtener valores en el intervalo $[0,1]$) y la tangente hiperbólica (para obtener valores en el intervalo $[-1,1]$).

El desarrollo de las redes neuronales ha permitido su aplicación para reducir el consumo energético de los edificios [31], [43]–[47].

A su vez, un referente en la materia [48], ya hablaba en 1991 de que el nivel de incertidumbre admitido ascendía al 20% en el coeficiente global de transferencia identificando datos procedentes de DOE-2 (modelo de referencia), y casi del 70% en la capacitancia térmica. A su vez, excitando a un modelo $1R+1C$ (modelo de referencia) con una temperatura seno, la red neuronal estimaba una capacitancia del 5% inferior a la impuesta en el modelo RC. Bajo este mismo ejemplo, se conseguía una distribución de diferencias en la resistencia térmica de entre 1-5%, sin incluir ningún tipo de ruido en la señal de entrada.

Un edificio inteligente maximiza la eficiencia del servicio al mínimo coste [49]. Las redes neuronales se han demostrado como un método eficaz para predecir el consumo eléctrico de edificios, a partir, de la medición durante largos periodos de tiempo (años) de lo que ocurre en el edificio. La ventaja de este método es que se eliminan las dificultades asociadas a problemas multivariable, con relaciones complejas, y con una identificación repleta de dificultades. Como desventaja, que para que el sistema adquiera inteligencia necesita una medición previa muy extensa y continuada. Otra desventaja, es que en la mayoría de los casos no existe una física en el interior de estas redes, por lo que son modelos puramente, de caja negra muy compleja, tal y como destaca el trabajo [45].

Se estima que en los Estados Unidos los fallos en los sistemas de climatización pueden representar un aumento del 30% en el consumo energético [50], por tanto la detección de fallos y la diagnosis en los sistemas es muy importante. Asimismo, es importante la detección de fallos en las actuaciones sobre la epidermis –adecuación de la apertura y cierre de las ventanas, adecuación del funcionamiento de los sistemas control solar- dado que se ha comprobado en numerosos estudios que estos parámetros

tienen mucha influencia en la demanda de energía de los edificios. Estos argumentos motivan los siguientes trabajos sintetizados.

El método desarrollado por Yu y van Paasen [51] demuestra que es posible identificar fallos de ambos tipos –sistemas y epidermis. Se observa como la red neuronal es capaz de distinguir el fallo de operación a partir de las diferencias apreciables entre las medidas reales de consumo de energía y el consumo previsto por el modelo.

2.1.2. Identificación

En la aplicación de un método de identificación, son necesarios desde un conocimiento lo más complejo posible del sistema a identificar, hasta la utilización de herramientas generales de tratamiento de datos relacionadas con la estadística, teoría de comunicación, control... (conocimiento puramente matemático); más la realización de experimentos de calidad. Entendiendo la dificultad de la acción de identificar, en este epígrafe se engloban los trabajos más representativos sobre modelización de cara a una identificación, desarrollos informáticos, experimentación que alimenta a procesos de identificación...

La Comisión Europea ha creado una red conocida como DYNASTEE, consolidada y reconocida como expertos en las técnicas de identificación de sistemas dinámicos, que además realizaba una fuerte labor de diseminación organizando multitud de eventos. DYNASTEE es un acrónimo de “DYNAMIC Analysis, Simulation and Testing applied to the Energy and Environmental performance of buildings”. Es una agrupación informal de organizaciones activamente implicadas en la aplicación de herramientas y metodologías dinámicas relacionadas con la temática. DYNASTEE, que opera a través de INIVE EEIG [52] y promueve la proliferación de estas técnicas [Directiva Europea sobre Comportamiento energético de edificios EPBD]. Esta red se ha convertido en un referente mundial en lo referido a identificación de modelos dinámicos para edificios. En las siguientes líneas se sintetiza la información útil ligada a esta red, desde el punto de vista de participantes y miembros.

INIVE EEIG, siglas que vienen de “International Network for Information on Ventilation and Energy Performance” fue creada en 2011 como una agrupación de interés económico europeo. La principal razón de fundación fue la puesta en marcha de una excelente red del conocimiento y diseminación. En el presente tiene 11 miembros: BBRI, CETIAT, CIMNE, CSTB, ERG, ENTPE, IBP, SINTEF, NKUA, TMT US y TNO). INIVE busca facilitar una estructura de colaboración a base de proyectos entre entidades. El mejor ejemplo de esta colaboración es la red DYNASTEE-PASLINK, que ya se ha comentado, y que forma parte de las actividades de INIVE.

DYNASTEE tiene sus antecedentes en la organización de centros conocida como PASLINK EEIG [53]–[55], cuya finalidad era dar apoyo a actividades y proyectos europeos relacionados con la evaluación del comportamiento energético de edificios, más concretamente en su evaluación mediante experimentación real.

Analizando la información existente de PASSYS/PASLINK [29], [56]–[59] sobre experimentación al aire libre, se puede concluir que se centraron en el análisis de sistemas solares pasivos. Desde sus orígenes, se puede sintetizar que PASLINK ha indagado en el testeo de componentes, la aplicación de técnicas de identificación, creación de estándares, protocolos de escalamiento y replicación a través de la simulación como mecanismo de mayor utilidad. Esta información queda en parte recogida de forma sintetizada en [60] por P.A. Strachan, quien estuvo activamente implicado en los proyectos PASSLINK.

Resumen de casos estudiados en PASSLINK			
<i>Componente</i>	<i>Caso estudiado</i>	<i>Organización</i>	<i>Relevante</i>

Sistema pasivo solar en fachada sur	Cristal avanzado Hueco Fachada	BBRI TNO Universidad de Cottbus (Alemania)	Aplicación común TASK 13 IEA Monitorización
Fachada ventilada	Entrada de aire	BRE (Escocia)	Análisis del comportamiento de la ventilación
Invernadero solar acoplado a la celda	Fachada	Universidad de Strathclyde (Glasgow)	Calibración y modelización
Elementos de cristal	Fachada	EMPA (Suiza)	Fachada Este
Componentes de cubierta	Cubierta	CRES (Grecia)	Modelización e integración total
Fotovoltaico	Fachada ventilada	VTT (Finlandia)	Componente comercial
Equipos de calefacción	Fachada	Universidad de Cottbus (Alemania)	Proyecto industrial
ACS	Colectores	CIEMAT (Almería)	Implementación y monitorización

Tabla 2–2. Experimentos de las celdas TEST. Fuente P. A. Strachan [60]

Lo que aclaran estos trabajos y los últimos desarrollos conocidos, desde la posición como miembros de INIVE EEIG y participantes en DYNASTEE, es que las celdas del proyecto EC PASSYS son un origen europeo (1985) a las líneas de investigación “outdoor testing, analysis and modeling of building components”. El paso que se demanda para su aplicación en edificios convencionales y existentes, es la solución al requerimiento de una enorme y especializada instrumentación al control minucioso de los experimentos requerida en este tipo de celdas (baja tolerancia a una mínima incertidumbre), la cual es inviable para su aplicación a nivel de actuaciones de rehabilitación o de verificación para empresas de servicios energéticos.

De ahí que, la primera conclusión de la revisión bibliográfica relacionada con la identificación es que la aplicabilidad de los trabajos PASSYS es muy limitada para edificios existentes, es decir, sentaron una base conceptual para lo que ahora se demanda: aplicación de la identificación de modelos dinámicos en edificios reales y operativos. Este objetivo, leyendo las conclusiones de los trabajos de la red, es casi una panacea, alimentada por las competiciones que se realizan para estimar los parámetros estáticos de una celda TEST ensayada, partiendo todos los usuarios de los mismos datos. El resultado de esta competición es que aparece una desviación con respecto al valor real del 30%, en algunos casos.

Otro producto de PASLINK fueron los procedimientos de experimentación [26,49,51]: estos procedimientos de experimentación reciben el nombre de IQ-TEST y están basados en el “round robin test” [40], [61], es decir, en la replicabilidad/normalización de los ensayos sobre estas celdas.

En proyectos sucesivos que se encajaban dentro del marco del EC PASSYS, se hicieron progresos en lo referente a procedimientos de medición, calibración y análisis de datos, de cara a una estandarización de calidad del uso de este tipo de celdas para la evaluación de componentes. Relacionado con este hecho se destacan [58], [62], que siguen con la misma filosofía de aplicación a nivel prototipos, pero encaminados hacia el desarrollo de nuevos productos.

La línea de desarrollo actual de este equipo con respecto a lo acometido en PASLINK, además de las evaluaciones realizadas en régimen permanente, en la mayoría de las ocasiones eliminando el efecto del clima real, se pretende profundizar en el análisis dinámico de edificios reales con climas reales. Los últimos resultados que figuran de este proyecto [53], [55], [57], se centran en la calibración de la instrumentación y de las células test, así como el procesado y análisis de los datos medidos.

A modo de ejemplo del comentario anterior, se destaca el trabajo presentado en el workshop de Bruselas por miembros de DYNASTEE, participantes en PASLINK, y del grupo CIEMAT [63]. Este trabajo, extraído de los resultados del proyecto PSE-ARFRISOL, tiene como objetivo la calibración de modelos dinámicos a partir de la medición de edificios existentes en detalle. El objetivo es calibrar los parámetros de definición del caso en la herramienta de simulación a partir de la monitorización en detalle de los edificios. Los resultados de este trabajo muestran que es una línea de investigación posible si se dispone de una monitorización en detalle del edificio, pero que queda condicionada a la calibración del edificio en unas condiciones muy específicas de operación.

En la línea del trabajo anterior pero sobre celdas TEST, se destaca la publicación de P. Strachan [64]. En ella se presentan la comparativa entre la realidad medida y los resultados del modelo identificado. En este caso los resultados son bastante mejores y la simplicidad del modelo evidente, pero sobre una célula TEST.

La conclusión es clara. El material existente responde en un 95% a la problemática de identificación que aparece en celdas TEST, y sienta los pilares para la futura identificación de modelos en edificios existentes. Existen más ejemplos que servirían de argumentación a esta conclusión, pero se ha elegido el único procedente de miembros de la red DYNASTEE, que además participaron en los proyectos PASLINK, por constituir un referente para el trabajo realizado a lo largo de esta tesis.

2.1.3. Experimentación

2.1.3.1. Prototipos

En este punto se van a destacar los trabajos de experimentación enfocados hacia una identificación, realizados sobre prototipos a escala o celdas test.

En primer lugar, aparecen las celdas diseñadas y usadas durante el EU PASSYS y los proyectos PASLINK, ya que, y tal como se ha destacado con anterioridad, son el referente de este tipo de experimentación en Europa. Existen 38 celdas en 13 lugares diferentes de Europa. En los últimos años las utilidades de estas celdas han sido mejoradas para producir una mayor calidad de datos, y por consiguiente, un mejor análisis dinámico de datos. En la siguiente figura se muestran dos celdas con los sensores climáticos en la fachada sur. Las celdas pueden trabajar en condiciones reales tanto de refrigeración como de calefacción, gracias a los equipos de climatización instalados.

En la actualidad existen nuevas aplicaciones experimentales con las celdas test del proyecto PASSYS [56]. Durante el desarrollo del proyecto PASSYS se llegó a la conclusión de que las células PASSYS y el método de análisis de datos llevado a cabo eran muy lentos y costosos. El calor que entraba a través de la envolvente de la habitación de ensayos no era fácilmente controlable. Posteriormente dio comienzo el proyecto Europeo PASLINK. El proyecto PASLINK tenía como objetivo modificar las células de ensayo PASSYS de forma que el tiempo de los ensayos disminuyera y la calidad de los resultados mejorara. Durante este proyecto se persiguió el objetivo de diseñar procedimientos

estandarizados para la caracterización de nuevos componentes, a través de su coeficiente global de transferencia UA y su ganancia solar g [57]. Entre las nuevas publicaciones relacionadas con la experimentación de estas celdas destaca [65], no por la calidad de sus resultados, sino por la restauración llevada a cabo sobre las celdas originarias del proyecto, con bastante éxito, incluso con una nueva instrumentación.

Existen más trabajos en los que se adaptan estas celdas [66], en lo que prácticamente es la referencia más actual a todos los trabajos de PASSLINK EEIG.

De forma sintetizada, las celdas destacan por estar bien aisladas y tener unas dimensiones de 8x2.7x2.7 m, en dos espacios, donde solo uno es considerado de experimentación de 5x2.7x2.7m. La fachada sur es intercambiable junto con la cubierta de la celda, con objeto de poder evaluar los diferentes componentes.



Figura 2-4. Imagen de las celdas Test de PASSYS [57], [65], [67]–[70] [59]

Existe una cierta incertidumbre en los valores obtenidos de estos parámetros a través de la identificación. Algunos autores hablan de un criterio de aceptación de hasta un 30%. Por lo que la comparación entre el valor obtenido por varios métodos puede ser muy dispar y además si el modelo empleado es diferente.

De PASSYS también se destaca el método de identificación asumido [54], [56], [71] [49,51,61], del cual se destaca por su carácter iterativo.

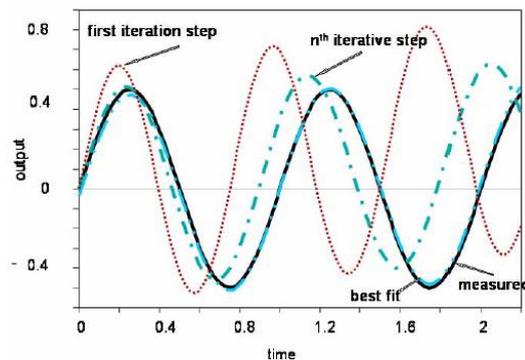


Figura 2-5. Ejemplo de aplicación del procedimiento de identificación de PASSYS [19]

La gráfica anterior se ha captado para mostrar como en cada iteración la calidad del ajuste mejora sensiblemente.

En el capítulo 4, se describen ensayos experimentales realizados bajo el trabajo de la tesis sobre celdas TEST del grupo GREA dirigido por Luisa F. Cabeza, del que se destacan algunas referencias sobre sus cubículos de ensayo [70], [72], [73] A diferencia de las celdas de PASSYS, estos cubículos son

construidos según el objetivo. Por ejemplo, existen cubículos construidos con adobe para comparar su comportamiento con cubículos construidos según CTE. Principalmente, destacan las aplicaciones de acumulación de energía mediante materiales de cambio de fase, tanto a nivel impregnación como incorporación en elementos estructurales. La referencia para esta última información es la tesis de uno de los miembros del GREA [70], [72]–[74].



Figura 2-6. Fotografías del centro experimental en Puigverd (Lleida) del GREA [70]

En el artículo [65] de John Littler, discute la necesidad de los modelos y prototipos a escala. Como desventajas, que no son transportables y no permiten el “juego” a diseñadores, ya que un cambio sobre el prototipo es un prototipo nuevo en la mayoría de los casos. De este artículo se extrae la información de algunos ensayos experimentales realizados sobre celdas, de los que aparece muy poca información en la literatura: los realizados en Los Alamos, que se identifican con la corriente americana de estas técnicas; y algunos ensayos particulares publicados por universidades europeas, como puede ser el realizado por la Politécnica de Londres [75].

Solo se destaca el trabajo realizado en las celdas construidas en Los Alamos (1.25x1.25x3 m), del que no existen apenas publicaciones en revistas indexadas, pero si en multitud de conferencias o jornadas en América. A modo de síntesis, el trabajo realizado en Los Alamos (1975-1985) tuvo tres pilares: evaluación de componentes de elementos especiales (muros trombe, refrigeración evaporativa, adición de materiales de cambio de fase en muros, vidrios especiales, nighcooling...), calibración y evaluación del código de simulación PASOLE (simulación de sistemas solares pasivos), y análisis de la técnica de transvase de energía.

En su publicación J. Littler [69] enumera las que para él son las áreas apropiadas para investigar usando prototipos. En síntesis son el desarrollo de componentes y la resolución de problemas aislados, por ejemplo parámetros que influyen en el confort térmico, efecto del viento en las infiltraciones...

Finalmente, de la lectura de esta publicación y de algunas vinculadas se puede ver como los investigadores de LASL (Los Alamos) continuaron la línea en colaboración con universidades e instituciones de USA, entre las que destaca MIT, la Universidad de Colorado y de Denver. Esta línea de investigación era bastante parecida a la corriente europea antes comentada. Por ejemplo uno de los principales objetivos de LASL fue crear un protocolo de repetitividad de este tipo de ensayos (REPEAT), igual que en PASSYS.

2.1.3.2. Edificios reales

En la actualidad, la monitorización de parámetros térmicos de edificios se utiliza fundamentalmente para tres fines:

- La evaluación energética del mismo, donde podemos incluir objetivos normativos como la certificación energética, conjuntamente ligada a proyectos ESCO o rehabilitación energética.
- La diagnosis del edificio, donde podemos incluir objetivos de reducción de consumo energético debido a fallos en la operación de los sistemas –consignas inadecuadas, errores de operación, fallos de dispositivos de control...-, o de la epidermis –p.ej. ventilación contraproducente por apertura de ventanas-.
- El control de los sistemas en tiempo real, donde se pueden incluir tanto el control de los sistemas de climatización propiamente dichos, como el control del edificio como conjunto – sistemas de iluminación (apagado/encendido de luces), apertura o cierre automático de ventanas...-

Estos fines principales no son independientes, sino que a menudo se interrelacionan entre sí. De tal forma que no es difícil encontrar ejemplos de sistemas de monitorización instalados para diagnosticar los sistemas térmicos del edificio, que posteriormente se utilizan para el control de los mismos.

Este marco que rodea a la monitorización térmica de edificios, se aleja en su finalidad del concebido en esta tesis. No obstante, una de las exigencias impuestas al proceso de identificación que se aborda en los capítulos restantes, es que las necesidades de monitorización sean coherentes con los fines objetivados y deseables (coste de monitorización). Es decir, la metodología debe ser aplicable, y por tanto la monitorización que es un proceso costoso y complicado, debe ser viable. Esta información es desarrollada en el epígrafe inferior “Aplicabilidad”, no obstante, aquí se desarrolla la situación actual de la monitorización y experimentación energética en edificios destacable de la literatura consultada.

En Gran Bretaña se ha estimado que el 70% de las viviendas de 2050 existen a día de hoy. El cálculo experimental del valor U tiene un papel importante en las decisiones de rehabilitación de los edificios.

Un ejemplo es la experimentación llevada a cabo por la Universidad de Caledonian (Glasgow, Escocia), midiendo durante el otoño de 2007 a 2008 [68], con el objetivo de asesorar una política de mejora de la eficiencia energética para edificios tradicionales. En esta experimentación se usaron fluxómetros Hukseflux HFP01 y sensores de temperatura de aire y superficiales. Los fluxómetros tenían un diámetro de 80mm y 5mm de espesor. Se destaca del experimento que el resultado variaba considerablemente si en lugar de usar adhesivos para fijar los fluxómetros, se realizaban pequeñas muescas recubiertas de un material conductor. Recomiendan la realización de este tipo de experimentos en el periodo de calefacción para maximizar la diferencia de temperatura interior y exterior, y reducir el efecto solar.

Puesto que el objetivo es caracterizar la tendencia del sistema en régimen permanente a partir de una monitorización en transitorio, se debe repetir el experimento durante dos semanas como mínimo. En la siguiente figura se muestra el valor calculado de U y su incertidumbre estimada (el error RMS medido y el intervalo de confianza). Se observa la influencia de la duración del periodo de monitorización y como la incertidumbre obtenida alcanza el 13%. A la par se compara con los resultados esbozados por LORD.

La primera conclusión es que las técnicas de análisis dinámico permiten optimizar el periodo de optimización para evitar experimentos infructuosos y evaluar el efecto de la inercia.

En las publicaciones relativas al presente año 2014, destacan las siguientes:

1. [67] “Dynamic integrated method based on regression and averages, applied to estimate the thermal parameters of a room in an occupied office building in Madrid”

A partir de los datos de la monitorización de un edificio en Madrid durante dos años, se ha aplicado un proceso de correlación para los parámetros en régimen permanente, aunque los efectos dinámicos se han tenido en cuenta. El modelo está basado en un balance de energía dinámico, en una base de tiempo integrada superior a un día. Ya que una de las conclusiones del trabajo es que los promedios diarios son insuficientes para el análisis que se persigue. Además comentan que la incorporación de la ocupación y de la posición de las aperturas mejora notablemente el modelo. En el resumen destacan que obtienen el valor del UA global del edificio con una incertidumbre del 10%. Destaca en el trabajo que los modelos son estáticos, y para ello se deben ir a bases integradas. No obstante, consigue una buena aproximación de los parámetros estáticos más importantes que caracterizan el comportamiento energético de ese despacho.

2. [76] "Identification of thermal characteristics of a building"

Este trabajo sorprende por hacer un modelo totalmente estadístico pero con relaciones matemáticas en sus coeficientes que ligan las propiedades físicas del sistema. No obstante, para llegar a él, parte de una modelización simplificada a través de la analogía eléctrica, como muestra la siguiente imagen:

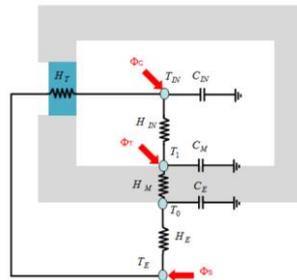


Figura 2-7. Modelo eléctrico equivalente de la transferencia térmica sobre un espacio

Y la modelización del modelo de temperatura interior $T_{IN}(t)$, para que responda a la variable medida $T_{MES}(t)$, incorpora un ruido modelado como una normal de Gauss.

$$T_{mes}(t) = T_{IN}(t) + \xi\sigma$$

El resto de resultados no son interesantes, salvo el artificio de colocar un término del ruido para que juegue de comodín en la estimación, cuando lo que se pretende es crear un modelo que contenga la física y además calibrarlo con los parámetros estáticos y dinámicos que atienden a la misma.

3. [77] "Robustness of a regression approach, aimed for calibration of whole building energy simulation tools"

Este trabajo comparte los fundamentos del trabajo descrito en el punto 1. Pero en este caso se mide un edificio completo, y al igual que antes se pretenden identificar los parámetros energéticos que lo caracterizan. Se habla de un modelo dinámico, en el que se desprecia el efecto dinámico y se convierte en un modelo estático. Esto último, casi era de esperar al ver la siguiente imagen:



Figura 2-8. Imagen de los edificios piloto. Fuente [77]

La radiación global horizontal máxima, en los días del experimento alcanza 300 W/m^2 , por lo que con una temperatura exterior muy por debajo de la de consigna, el edificio se encuentra funcionando en unas condiciones cuasi-estáticas desde el primer día de monitorización. Sin embargo, los autores realizan una identificación de parámetros de una forma muy clara y convincente.

2.1.4. Diagnóstico mediante caracterización inversa

Consiste en tomar "comparadores" o "benchmarks" de los procesos energéticos del sistema con el propósito de transferir el conocimiento de las mejores prácticas y su aplicación.

La importancia del benchmarking no se encuentra en la detallada mecánica de la comparación, sino en el impacto que pueden tener estas comparaciones sobre los comportamientos. Se puede considerar como un proceso útil de cara a lograr el impulso necesario para realizar mejoras y cambios.

Existen muchos autores con publicaciones sobre diagnóstico térmico, sobre todo en la década de los 90 y previa, aunque se destaca el trabajo de A. Rabl [78] por su visión tan real del panorama. En la síntesis que realiza A. Rabl, destaca que se deben de aceptar, en edificios ocupados, errores en la identificación del 20% en el valor del coeficiente global de transmisión de la epidermis, 50% en el área solar, y 50% en la constante de tiempo dominante del sistema.

A Rabl en [78] destaca que los modelos actuales de firma energética mejoran sustancialmente si se añade la variable ocupación al mismo, aunque se destaca que para que el modelo conserve su filosofía y el ajuste sea perfeccionado, conviene que la adición de esta nueva variable se haga sobre el modelo ajustado sin ocupación.

Las referencias más destacadas, de cara a los objetivos de la tesis, y en el marco de la firma energética son:

- [79] propone un método experimental para obtener la firma energética mediante regresión robusta.
- [80] en su tesis extiende y formaliza un método de firma energética para la calibración rápida del consumo energético de los usos de calefacción y refrigeración en edificios comerciales.

A su vez, [81] desarrollan una metodología para el diagnóstico energético de edificios y la aplican en los 6 campus de la Universidad de Perugia. En dicho estudio se analizaron los datos de consumo de energía durante un periodo de 5 años lo cual permitió generar una predicción del consumo en función del uso de los edificios, y en función de índices específicos de área y número de usuarios. Se obtuvo una correlación entre el consumo eléctrico mensual y la temperatura ambiente que puso de manifiesto deficiencias en las plantas de calefacción y refrigeración. A raíz del trabajo, también se detectaron deficiencias en el aislamiento térmico. Como trabajos futuros se prevé la instalación de sistemas de monitorización on-line que permita la diagnosis en tiempo real. Como vemos en este aspecto de

desarrollos futuros se introduce el siguiente objetivo.

[51] un modelo de red neuronal difusa (“Fuzzy Neural Network” o “FNN”) para la diagnosis energética de los edificios. Este modelo se construye en base a datos medidos donde el funcionamiento del edificio está libre de fallos. Posteriormente, el modelo se valida mediante la introducción de un caso medido donde durante un periodo de tiempo se abrieron las ventanas. El resultado del trabajo fue óptimo ya que la red neuronal detectó la medida con funcionamiento inadecuado.

[82] del Lawrence Berkeley Laboratory desarrollaron un sistema de monitorización de la información y diagnóstico aplicado a la mejora de la operación de los edificios. Este desarrollo consiste en un conjunto de sensores, sistema de adquisición de datos y programas de visualización que permiten el acceso remoto vía web y que se pueden utilizar para identificar problemas de control y fallos en los equipos. El periodo de amortización del sistema es de 5 años. Como conclusión, se afirma que los operadores tienen que dedicar bastante tiempo al aprendizaje del funcionamiento del sistema, esto tiene como contraprestación que el sistema les permite hacer un uso mucho más eficiente de los sistemas de control del edificio, y les proporciona una gran rapidez en la detección de fallos.

[83] demuestran que es posible tratar de forma conjunta los sistemas de control y monitorización de los equipos para la detección de fallos. Dicho sistema de detección de fallos se basa en un diagnóstico on-line (ODT) que consiste en comparar los datos registrados con un modelo estadístico. En el artículo referenciado se aplicó el modelo de detección de fallos a una unidad de tratamiento de aire (UTA). Dada la dificultad de generar fallos naturales, se introdujeron fallos artificiales para chequear el modelo.

Existe un método denominado PRISM, que permite estimar predicciones del consumo a través de la temperatura exterior y ha sido confirmado en numerosos estudios, del que destaca [84]. Por ser un procedimiento enclavado en las metodologías de firma energética no se entra en más detalle, simplemente se comenta.

Una forma de utilizar la firma energética de un edificio para detectar fallos de funcionamiento, consiste en analizar los cambios producidos en la misma. La técnica CUSUM consiste en identificar cambios sistemáticos en el patrón de consumo, dicha técnica está descrita recientemente en [85] y consiste básicamente en:

- Calcular la firma energética del edificio
- Encontrar desviaciones a partir de la firma de cada mes
- Calcular la suma acumulativa de dichas desviaciones (CUMulative SUM -> CUSUM).

Las variaciones aleatorias (o errores de medidas) tienden a cancelarse entre sí cuando se acumulan, sin embargo las variaciones sistemáticas debidas a fallos hacen que la suma acumulada se vaya incrementando progresivamente.

Otra forma de encontrar fallos mediante la firma energética consiste en la comparación de la firma energética de distintos años. De tal forma que, si el edificio y los sistemas que se utilizan en él se operan de forma consistente, todos los puntos, independientemente del año, deberían estar cerca de la línea que define la firma energética del edificio. Si se actúa sobre el edificio, bien sea de forma voluntaria – para reducir su consumo energético-, o bien involuntaria –operación no consistente, errores en el control o ausencia del mismo- aparece una nueva firma energética. La siguiente gráfica muestra dos líneas separadas para el mismo edificio en dos años distintos, esto puede indicar un control deficiente.

Por otra parte, la presencia de bucles y cortes pueden ser debidos a un mal control solar, o a un mal control de los sistemas. Esto pone de manifiesto que, con este método se pueden identificar fallos no sólo en los equipos sino en los parámetros que afectan a la epidermis edificatoria.

Empiezan a aparecer numerosas plataformas para la gestión de la eficiencia energética, tanto a nivel doméstico como a nivel industrial. Destacamos Google PowerMeter. EnergyCap, Chellow, Trendil,

Ecofactor y PeoplePower. En muchos de los casos, estas plataformas se limitan a proporcionar aplicaciones de seguimiento y validación de facturas. En otras, como Power Meter, se incorporan medidores de consumo que permiten una información en tiempo real de los consumos. Una de las más avanzadas es la de Tendril, que permite la monitorización inalámbrica de la temperatura y de los consumos en viviendas. Estas medidas se complementan con elementos de corte de conexión también de gestión inalámbrica y diferentes programas de monitorización, y planificación y control del gasto energético. En cualquier caso, estas plataformas se encuentran en estados preliminares de desarrollo y tienen limitadas capacidades de monitorización y control.

Si bien las técnicas de mejora de la eficiencia energética que se proponen son, en alguna medida, convencionales en el sentido de que se trata de productos desarrollados industrialmente y disponibles en el mercado por un amplio abanico de fabricantes, la presente propuesta presenta dos elementos diferenciales: a) la adaptabilidad de las mejoras al edificio en cuestión y b) el tratamiento integrado y la optimización de la operación de los nuevos componentes en combinación con los existentes.

En relación con el primer punto, hay que hacer notar la necesidad de definir protocolos que ayuden y guíen el proceso de toma de decisiones y elección de las medidas de mejora que son más interesantes para cada edificio en cada clima dentro de un contexto de viabilidad técnica y económica.

El primer problema que se encuentra es que para cada edificio existen en principio un gran número de propuestas de intervención que serían necesario explorar. Ligado a lo anterior, está el hecho de que el interés de cada propuesta de intervención está en muchos casos vinculado al dimensionado e integración correcta de las mismas. Además, existen otros condicionantes tales como falta de datos sobre la situación inicial del edificio, poco tiempo disponible y escasa experiencia de los técnicos intervinientes, entre otros.

La presente propuesta incluye un procedimiento de pre-cuantificación de medidas de mejora que está especialmente adaptado al contexto anteriormente descrito. La inclusión de pre-cuantificación de medidas de mejora, para ayudar a la toma de decisiones relativa a la optimización de la energética edificatoria, está siendo objeto de estudio en varios países y en particular está siendo aplicada a la mejora de los edificios existentes. Una buena recopilación del estado del arte en este tema se recoge en el documento "Process to make up recommendations" de K. Engelund y H. Erhorn de mayo 2008, formando parte de la Acción Integrada para la EPBD.

La inspección de este documento pone en evidencia la necesidad de establecer un primer filtro automatizado que permita identificar las medidas potencialmente aplicables a un edificio concreto. Las primeras herramientas de este tipo son muy inocentes (propuestas de medidas de mejora automáticas están disponibles en software oficiales de Francia (ADEME), de Bélgica (Agencia flamenca de la energía) y del Reino Unido (BRE)).

El protocolo propuesto permitirá que se acometan para los sectores edificatorios identificados proyectos de rehabilitación sostenible de mediana y gran escala consistentes con las políticas energéticas y medioambientales que desarrollen las distintas administraciones centrales y autonómicas entre ellas la andaluza.

La principal referencia de estas técnicas usado en la tesis doctoral, es el proyecto EUROCLASS en el que participó el Grupo de Termotecnia en 1999 [86], por la cercanía y abundancia de información recabada durante el trabajo elaborado. En este proyecto se desarrolló una metodología determinista y experimental para caracterizar el consumo energético de edificios residenciales. A la par, esta metodología permite ser adaptada a las peculiaridades de las políticas energéticas de cada país. De forma sintetizada, se basa en la aplicación de curvas de distribución en frecuencia de los diferentes usos; así cuando se tienen datos monitorizados las curvas pueden ser corregidas al escenario medido.

2.1.4.1. Control de sistemas

Dentro de la diagnosis aparece otra vertiente y uso de estas técnicas, como es la gestión y el control energético de las instalaciones. [87]–[89] describe en este artículo cómo los avances tecnológicos en adquisición de datos en tiempo real, transferencia de datos y potencia computacional están proporcionando mayores capacidades al control asistido por simulación en tiempo real y detección y diagnosis on-line (FDD). A su vez, el trabajo [88], [90] describe el desarrollo de un prototipo de controlador asistido por simulación, en el cual se utiliza un programa de simulación térmica de edificios -en concreto el ESP-r, desarrollado por el mismo autor- para la toma de decisiones relativas al control. Se incluyen los resultados para un experimento a escala real sobre varias habitaciones de un edificio.

Los resultados de realizar una campaña de monitorización son indicadores del consumo energético. En términos globales se puede distinguir entre dos tipos de campañas de monitorización:

- Campañas cortas, alrededor de dos semanas de duración.
- Campañas largas, entre 6 y 10 semanas de duración.

El tipo de campaña condicionará los objetivos que se puedan obtener con los datos recogidos en las mismas.

En el caso de campañas cortas, se pueden realizar el cálculo del factor de pérdidas “heat-loss factor” si las facturas se emiten con una frecuencia adecuada y si se dispone de variables climáticas.

En el caso de campañas largas, existen diversas formas de obtener el factor de pérdidas del edificio, pero dichas formas difieren mucho en el precio e incluso algunas pueden requerir que sus ocupantes lo abandonen por un tiempo. El principal objetivo de la metodología MEP (“Monitored Energy Protocol”) consiste en evaluar el factor de pérdidas mientras se continúa con el uso habitual del edificio.

2.1.5. **Gestión energética mediante caracterización de consumos para uso predictivo**

La predicción del consumo energético tiene gran importancia en la optimización de la gestión energética, pero que se convierte en una pieza necesaria si se quiere realizar un almacenamiento de energía. En esta línea en la que se desarrolla esta revisión: qué tendencias de modelización se están y se han usado para la predicción de consumos en tiempo real.

Al-Homoud [91] examinó dos métodos simplificados:

- Método GD: se analiza un solo índice, grados día, este método de estado estacionario es el adecuado para estimar el consumo energético de pequeños edificios.
- Método de la frecuencia de temperatura: puede ser utilizado para modelar grandes edificios.

Reichmuth [92] intentaron utilizar temperaturas medias mensuales para predecir el consumo de energía mensual, lo cual resulta más preciso que lo comentado anteriormente. En cambio Lamberts [93] predijo la calefacción y refrigeración de carga anual de edificios no residenciales basados simplemente en variables climáticas, incluyendo promedios de temperaturas mensuales, máxima, mínima, presión, nubosidad y humedad relativa. Sus resultados mostraron buena precisión. Además de las condiciones climáticas, la construcción es otra característica importante pero compleja en la determinación de la eficiencia energética y por eso comentan que no han sido capaces de implementarla en el modelo. Una versión más simplificada es la que presentan Yao y Steemers [94], quienes desarrollaron un método simple de predicción de perfiles de consumo de energía diaria para el diseño de un sistema de energía renovable para edificios residenciales. El total del consumo de

energía del edificio se define como la suma de varios componentes, para cada componente se empleó un método de modelado específico. Por ejemplo para modelar los aparatos eléctricos se usa el promedio final de consumo de grandes cantidades de datos estadísticos, mientras que para la modelización de la demanda es aplicado un modelo físico simplificado. A su vez Barnaby y Spitler [95] propusieron un método de factor de carga. Las contribuciones de carga de varias fuentes se evalúan por separado y luego se suman. En la línea simplificada destacan Wang y Xu [96], capaces de simplificar las características físicas de los edificios para poner en práctica la predicción. Y por último Yik [97] utiliza herramientas detalladas de simulación para obtener los perfiles de carga de enfriamiento para diferentes tipos de edificios.

Los métodos estadísticos, a diferencia de los anteriores, se desarrollan a partir de datos históricos, lo que significa que antes de la formación de los modelos, tenemos que recopilar datos históricos suficientes. Y esto es así porque son métodos empíricos.

Bauer y Scartezzini [98] propusieron un método de regresión para manejar cálculos de calefacción y refrigeración al mismo tiempo. Dhar [99] propuso modelado de calefacción y refrigeración en edificios comerciales con la temperatura de bulbo seco del aire como única variable. Un nuevo modelo de la serie de Fourier basado en la temperatura fue propuesta para representar la dependencia no lineal de las cargas de calefacción y refrigeración en el tiempo y la temperatura. Si la humedad y los datos solares están disponibles, sugirieron utilizar el modelo de la serie de Fourier generalizada, ya que tiene mayor capacidad de predicción. Ma [100] usó modelos de regresión lineal y autoregresión simple para predecir el consumo mensual de energía. En el trabajo de Chow [101] el modelo de regresión fue desarrollado con 1 día 1 semana y 3 meses lo que lleva un error en la predicción del consumo de energía anual de 100% 30% y 6%. Estos resultados muestran que la longitud del periodo de medición influye en gran medida en los modelos de regresión dependientes de la temperatura. En cuanto a la predicción del índice de energía, Lam utiliza el principio de análisis de componentes (PAC) para desarrollar un índice climático Z con respecto a la radiación solar global, temperatura seca y húmeda. Encontraron que Z tiene la misma tendencia que la carga de enfriamiento simulado y el uso de energía del edificio. Esta tendencia se obtuvo por un análisis de regresión lineal. El modelo fue desarrollado sobre la base de datos de 1979 a 2007. Kimbara [102] desarrollaron ARIMA para poner en práctica la predicción. El modelo se obtuvo por primera vez con los últimos datos de carga, y luego se utilizó para predecir los perfiles de carga para el día siguiente. Newsham [103] ponen un especial énfasis en la ocupación, que aparentemente puede aumentar la precisión del modelo.

Usando redes neurales los autores destacan a Ekici y Aksoy [104], que utilizan el mismo modelo para predecir la carga de calefacción en tres edificios. En este trabajo los conjuntos de datos de entrenamiento y de prueba se calcularon usando el método de las diferencias finitas de estado transitorio de la conducción de calor unidimensional. A su vez Yokoyama [105] ha utilizado una red neuronal de propagación hacia atrás para predecir la demanda de refrigeración en un edificio. Fue propuesto un método de optimización global para la identificación de los parámetros del modelo. Y por último Kreider [106] usa una red neuronal recurrente con los datos de consumo de energía por hora para predecir las necesidades de calefacción y refrigeración, sabiendo sólo el tiempo y la hora.

En esta línea se destaca el trabajo [107], donde aparecen varias ideas clave:

- Desarrollo de modelos basados en ANN (Artificial Neural Networks) y CBR (Case-Based Reasoning) para predecir el consumo de electricidad por hora de un edificio institucional. La evolución del error de los modelos ANN y CBR muestra diferentes tendencias: cuando el horizonte temporal aumenta de 1 a 6 horas, el error de los modelos de ANN disminuye de 8.48 a 7.3% (disminución de error de aproximadamente el 16%), sin embargo, en CBR, aumenta de 13.37 a 13.65% (2%). Esto sugiere que los modelos de ANN son más precisos a mayores plazos de predicción, mientras que CBR es menos sensible a la longitud del horizonte de predicción ya que mantiene su error bastante constante.

- PCA (Principal Component Analysis) es usado para seleccionar las entradas significativas. PCA se usó para seleccionar las variables significativas: entre las 22 variables de entrada son seleccionadas las 10 más importantes. A pesar de esta reducción del tamaño del vector de entradas, no hubo diferencia significativa en el rendimiento de los modelos desarrollados con todas las entradas y la de los modelos que utilizan sólo las entradas seleccionadas por PCA. En la mayoría de los casos, los modelos simplificados que utilizan un número reducido de entradas, seleccionados por el procedimiento PCA fueron ligeramente más precisos. Esto sugiere que, desde el punto de vista del modelado predictivo, las variables que no se consideran importantes, no sólo no llevan información útil para el conjunto de entrada, sino que también añaden ruido y variabilidad innecesaria.
- Mediciones sobre el edificio y el pronóstico del tiempo se utilizan para desarrollar y validar este enfoque. La calidad de los datos es fundamental para un desarrollo exitoso del modelo, y una pobre calidad de los datos tendrá un impacto negativo sobre la exactitud del modelo. Los valores atípicos se consideran como mediciones que no son representativas de la tendencia general de los datos; son causados principalmente por errores de medición, o cambios bruscos de un régimen de funcionamiento normal. (0.9% de los datos se consideraron como atípicos). También se eliminaron las observaciones por hora que contienen valores perdidos, y el conjunto de datos de modelado final contenía 11844 observaciones. Se distinguen perfiles de consumo de días laborables y no laborables, durante las horas no laborables el edificio consumo considerablemente menos electricidad, y tiene un perfil de consumo con menos variabilidad que el correspondiente a las horas de trabajo.
- Predicción realizada en base horaria con un horizonte de una a seis horas.
- Según el estudio realizado en este caso, ANN supera constantemente a los modelos CBR(13%), con error máximo de 7.3%, aun así, ambos modelos tienen errores dentro de los límites recomendados por ASHRAE.(30% límite error para predicciones horarias)

En esta línea aparece el trabajo de Monfet et al. [108] donde se evalúa las características del consumo de energía de HVAC&R con el objetivo de establecer una idea común para el análisis de la eficiencia energética en edificios. Para ello desarrolla una metodología de evaluación de energía y un programa de simulación simple que puede ser utilizado por ingenieros para evaluar la eficacia y los beneficios económicos de los sistemas HVAC&R. El producto es una metodología obtenida vía simulación para ligar el consumo del edificio a la diagnosis y monitorización de sus sistemas de climatización.

El artículo [109] presenta un enfoque diferente para predecir la demanda energética de edificios comerciales usando CBR (case-based reasoning). El enfoque propuesto se evalúa a partir de datos monitorizados en un edificio de oficinas de inmuebles ubicados en Varennes, Québec. La demanda de energía se prevé cada hora para las siguientes 3 horas, utilizando las previsiones meteorológicas. Los resultados muestran que durante la ocupación, 7: 00-18: 00, el coeficiente de varianza de la raíz cuadrada media-error (CV-RMSE) está por debajo de 13,2%, el error de sesgo medio normalizado (NMBE) está por debajo de 5,8% y el error de raíz cuadrada media (RMSE) es inferior a 14 kW. Cuando se calculan los criterios estadísticos para todas las horas del día, la CV-RMSE es del 12,1%, el NMBE es del 1,0% y el RMSE es de 11 kW. El estudio de caso demuestra que CBR puede ser utilizado para la predicción de la demanda de energía y podría ser implementado en la creación de sistemas de operación.

En la misma línea aparecen varias publicaciones de ASHRAE [106], [110]–[112] de los años 1994-1998 relacionadas con el tema. Estas publicaciones están ligadas a dos competiciones organizadas por ASHRAE con objeto de realizar una predicción de consumo sobre un edificio comercial. El objetivo de la primera competición fue identificar los métodos más precisos para predecir el uso de energía diaria en base a una cantidad limitada de datos medidos, mediante el uso de modelos empíricos. Se les proporcionó a los concursantes los datos necesarios: consumo eléctrico de todo el edificio, consumo de agua fría y caliente y datos ambientales. Los tres modelos destacados son los siguientes:

- Bayesiannon-linear model
- Feed-forward multilayer perceptron
- Neural network with pre- and post-processing

Los resultados de los tres modelos tuvieron un CV-RMSE y MBE de 20,5% y 14,6% respectivamente.

La segunda competición requiere el desarrollo del modelo más eficaz para simular “energy baselines” con el propósito de evaluar el ahorro de energía. El ganador usa una combinación de 10 redes neuronales con dos capas ocultas de 25 unidades cada una, usando datos de consumos anteriores y posteriores a la mejora del edificio ejemplo, así como, archivo de datos meteorológico y calendario de fecha y hora.

El segundo y tercer clasificado utilizan:

- Non-neural-net-based y mul-tiple regressions
- Bayesian non-linear
- regression with multiple hyper-parameters, después de la eliminación de valores atípicos.

Para los tres modelos, la CV-RMSE y la MBE estaban por debajo de 0,20 y 0,35, que corresponde al 20% y el 35% en porcentaje, respectivamente.

Las conclusiones de estos trabajos vinculados a ASHRAE:

- CBR es una técnica de predicción de energía de manera instantánea para las siguientes horas, para ello utiliza experiencias pasadas, representada como “casos”. Los casos se acumulan y almacenan en una biblioteca de casos. CBR intenta casar el “caso actual” con los casos del pasado, obteniendo así la predicción.
- La exactitud de la predicción depende en gran medida de la calidad de datos de entrada, así como el modelo de predicción que describe la interacción entre diversos factores de entrada independientes y la energía de salida. Además, debido a la naturaleza dinámica de la demanda de energía, un modelo de predicción adaptativo debe ser capaz de ajustar automáticamente la relación no lineal entre la entrada y la salida.
- Las redes neuronales artificiales han demostrado ser uno de los mejores métodos para la predicción de la demanda de energía a corto plazo. CBR fue elegido como método debido a ventajas significativas con respecto a ANN: Actualización más fácil, debido a que sólo necesita incluir “nuevos casos” a la biblioteca creada.
- Las soluciones propuestas por un CBR son más fáciles de entender, ya que el razonamiento depende de los casos recuperados, sin embargo una ANN actúa como una “caja negra” y proporciona un resultado sin ninguna justificación.

- Un sistema CBR puede manejar una gran cantidad de características por caso, pero una ANN puede tener dificultades para ello. Un sistema CBR también puede manejar la información faltante. La falta de información en el problema actual o en los casos almacenados en la biblioteca de casos no impide que el CBR de respuestas. Sin embargo, una RNA requiere un conjunto de entrenamiento que es completa y la entrada al sistema también tiene que ser completa.

Tras la revisión bibliográfica en esta temática realizada, y confirmada por referencias como [113], se puede concluir que los ocho algoritmos predictivos más usados son:

- (MLR) Multiple Linear Regression
- (ARIMA) Autoregressive integrated moving average
- (SUR) Support vector regression
- (RF) Random forests
- (MLP) Multi-Layer perceptron
- (BT) Boosting tree
- (MARS) Multivariate adaptative regression splines
- (KNN) K-near-est neighbors

Dichos algoritmos han sido seleccionados por popularidad y diversidad. La diversidad del conjunto maximiza el rendimiento del mismo. Para mostrar los resultados se analizan los datos de consumo de energía de un edificio de Hong Kong. Se toman un año de datos recogidos en intervalos de 15 minutos. La precisión porcentual del modelo conjunto es de 2.32% de error absoluto en la predicción del consumo de energía y de 2.85% en la demanda de potencia máxima del día siguiente.

Cada modelo tiene sus propias ventajas en ciertos casos de aplicaciones. El modelo de ingeniería muestra grandes variaciones. Es un modelo muy elaborado que puede ser aplicado para cálculos muy precisos. Por el contrario, mediante la adopción de algunas estrategias de simplificación, puede convertirse en un modelo ligero y es fácil de desarrollar, manteniendo la precisión. Un inconveniente de este modelo es su dificultad de realización en la práctica por su alta complejidad y falta de información de entrada.

Los modelos basados en redes neurales y en máquinas vectoriales son buenos en la solución de problemas no lineales, haciéndolos muy aplicables en la predicción de energía. Pueden dar una predicción bastante precisa siempre y cuando el modelo de ajuste esté bien realizado. Las desventajas de estos modelos es que requieren de datos de consumo histórico suficientes y son complejos.

No existe una vía de modelización única para la predicción de consumos, ya que cada modelo presenta sus ventajas y desventajas. Sin embargo, la línea con más auge es la basada en las redes neurales. La siguiente tabla muestra una comparativa entre los modelos encontrados en las publicaciones:

Modelo	Complejidad	Facilidad	Aplicabilidad	Entradas	Precisión
Detallado	Muy alta	no	baja	Detalladas	Muy alta
Simplificado	alta	si	alta	Simplificadas	Alta
Estadísticos	razonable	si	Muy alta	Histórico	Razonable

RNA		no	alta	Histórico	Alta
Redes neuronales					
SVM	Muy alta	no	baja	Histórico	Muy alta
Vectoriales					

Tabla 3. Características de los diferentes modelos usados en publicaciones. Fuente [114].

Otro dato importante es que la integración eficiente de grandes fracciones de energía renovable en los edificios requerirá un control predictivo y preciso, argumento que apoya el desarrollo de estas técnicas dinámicas.

Es importante destacar la diferencia que aparece en el concepto de servicios con medición “Smart” e “Intelligent”, ya que a priori ambos destacan la inteligencia del control realizado, pero existen diferencias:

- “Smart” ha sido usado en servicios eléctricos de agua y gas, considerando una lectura regular y detallada que crea una comunicación del gestor y de la utilidad (uso final) con una monitorización y lectura automatizada.
- “Intelligent”, en adición a lo anterior, analiza estas observaciones e identifica decisiones o sucesos que permiten la optimización del servicio. A su par, existe una comunicación entre el gestor y el usuario final en las dos direcciones.

2.1.6. Corrección/Calibración de procedimientos de cálculo

Una de las líneas con mayor resurgir entre las publicaciones encontradas, es el desarrollo de herramientas de simulación [69] con objeto de, en muchas ocasiones, reemplazar la experimentación real, la cual tiene asociadas algunas dificultades y debilidades como pueden ser:

- Validez: tanto de hipótesis, valores por defecto, interacción con el usuario...
- Finalidad: normativa o reglamentaria, de diseño, evaluación... ya que cada una responderá a unos requisitos para el programa.

Existen procedimientos de aceptación de los resultados ofrecidos por los programas entre los que destaca IEA21 [115] y ASHRAE [116]. Actualmente, se ha dado un salto más demandando a las herramientas de simulación una validación-calibración a través de experimentos reales. Esta última idea es desarrollada como otro producto de la tesis en el capítulo 4 a modo de la metodología integrada.

La modelización dinámica en muchas ocasiones hace uso de series temporales excitadas con los datos del edificio y climáticos. Esta aplicación puede proporcionar un procedimiento objetivo y automático, que bien implementado e identificado, ofrece una caracterización cierta del comportamiento energético del edificio. El broche de este producto, y a la par la finalidad perseguida por este trabajo doctoral es la integración del procedimiento en un sistema global, es decir, en un modelo detallado que encierre al resto del edificio y sistemas.

Modelos dinámicos adecuadamente calibrados son una futura necesidad para la siguiente generación de gestores energéticos. Estos modelos pueden incluir todo tipo de medidas de ahorro de energía vinculadas a un control inteligente, como pueden ser el enfriamiento nocturno, temperatura de consigna variable en el tiempo, compensación solar...

A su vez la Agencia Internacional de la Energía IEA en su Task 34/43 incluye una metodología para

la validación de programas, que puede ser vista como algo general y carente de la practicidad necesaria como para ser aplicada para comparar programas y datos medidos en edificios reales.

Una primera posibilidad sería el uso de herramientas de simulación como DOE-2 [35], EnergyPlus [117], que son eficaces y precisas pero en la práctica presentan dificultades. Dado que estas herramientas se basan en principios físicos para lograr una simulación precisa se requieren detalles de la construcción y parámetros ambientales como datos de entrada. Por un lado, estos parámetros no están disponibles o son difíciles de conocer realmente en edificios existentes. Por estas razones, algunos investigadores han propuesto modelos simples para ofrecer alternativas a ciertas aplicaciones. Con esta motivación se realiza la revisión de publicaciones para conocer las tendencias en cuanto a modelos simplificados y a la corrección/calibración a partir de medidas reales de los procedimientos de cálculo del comportamiento energético de edificios.

Las conclusiones adelantadas de esta revisión son:

- No existen publicaciones en las que se consigan una calibración completa de una herramienta de simulación en paso corto, por ejemplo a nivel horario. Entendido completa como la calibración de parámetros estáticos y dinámicos de un edificio.
- Los desarrollos más destacados dan solución a que las herramientas detalladas tengan el mismo valor de los parámetros estáticos (transmisión por epidermis y ventilación) que los medidos.
- Los resultados a nivel mensual o estacional de la validación que muestran presentan errores promedio superiores al 20%. Pero a nivel horario pueden llegar a errores del 100%, lo que hace pensar que los efectos dinámicos de arranques y paradas no están bien calibrados.
- Tampoco se ha visto ninguna publicación en la que se detallen resultados sobre el efecto de las ganancias solares y los parámetros de calibración.
- Se destaca que las publicaciones que usan datos medidos con un tiempo de muestreo inferior al día recuerden a modelos estocásticos, frente al resto de trabajos que usan datos mensuales o de facturas. Estos últimos representan más del 85% de las publicaciones revisadas, siendo lógico pensar que si los datos medidos que se disponen son de una base de tiempo mensual o mayor, la herramienta o modelo a calibrar debería tener el mismo paso de tiempo para eliminar el ruido de los efectos dinámicos no conocidos.

Esta revisión, previa al desarrollo del procedimiento, justifican como el modelo mensual puede ser usado como elemento intermedio entre la realidad medida y la herramienta de simulación detallada en paso corto. De esta forma, conociendo como los parámetros de definición del caso detallado se ven reflejados en el modelo mensual, se puede intentar una calibración a partir de la identificación del modelo mensual; o incluso, conformarse con el modelo mensual corregido/calibrado como herramienta final. Esto último proporciona una buena solución cuando los datos medidos son escasos o con suficiente incertidumbre.

En la tesis se identifica por calibración la modificación de los parámetros de entrada del procedimiento para que los resultados sean parecidos a la realidad medida. En cambio la corrección es la definición de leyes o factores correctores que modifiquen los resultados del procedimiento con objeto de que coincidan con los medidos.

2.1.6.1. Corrección – Calibración

Una de las líneas con mayor auge entre las publicaciones encontradas, es el desarrollo de herramientas de simulación [118] con objeto de, en muchas ocasiones, remplazar la experimentación real, la cual tiene asociadas algunas dificultades y debilidades como pueden ser:

- Validez: tanto de hipótesis, valores por defecto, interacción con el usuario...

- Finalidad: normativa o reglamentaria, de diseño, evaluación... ya que cada una responderá a unos requisitos para el programa.

Existen procedimientos de aceptación de los resultados ofrecidos por los programas entre los que destaca IEA21 [115] y ASHRAE [116]. Actualmente, se ha dado un salto más, demandando a las herramientas de simulación una validación-calibración a través de experimentos reales.

La modelización dinámica se puede usar a través de series temporales con los datos del edificio y climáticos para proporcionar un procedimiento objetivo y automático que genera valores del comportamiento energético del edificio. La integración del procedimiento en un sistema global permite además, la creación de una inteligencia de toma de decisiones.

Modelos dinámicos adecuadamente calibrados son una futura necesidad para la siguiente generación de gestores energéticos. Estos modelos pueden incluir todo tipo de medidas de ahorro de energía vinculadas a un control inteligente, como pueden ser el enfriamiento nocturno, temperatura de consigna variable en el tiempo, compensación solar, etc. A su vez, la Agencia Internacional de la Energía IEA en su Task 34/43 incluye una metodología para la validación de programas, pero no indica el procedimiento de actuación para la corrección de los resultados de las herramientas de simulación (diferencias con los datos reales) o la calibración de la herramienta a partir de la modificación de sus datos de entrada e hipótesis.

A modo de síntesis, las finalidades prácticas de las herramientas de simulación son:

- Certificación energética de edificios a través de medidas.
- Mejora del control y gestión de edificios.
- Implementación de medidas de ahorro y aprovechamiento de energías renovables: empresas de servicios energéticos
- Diagnóstico detallado para rehabilitación energética de edificios.

Siguiendo con el uso del protocolo IPMVP, esta línea de desarrollo aumenta el nivel de caracterización demandado. Ahora cada edificio tiene que ser evaluado en su totalidad y detalle a partir de su definición y simulación (en un software calibrado (IPMVP, opción D)). Este software es el CE3, creado por el Grupo de Termotecnia para la simulación simplificada de edificios existentes.

La revisión de publicaciones demuestra el vacío que existe en esta temática, por la dificultad inherente a la misma. Además se le suma otro hecho: para calibrar una herramienta se necesita medir en detalle y durante un largo periodo de tiempo tantas variables como se quiera precisar en la calibración, es decir, los grados de libertad con los que se podrán minimizar las diferencias entre los resultados de la herramienta y la realidad, dependen del número de mediciones que haga. Es por esto, que una calibración es complicada y costosa. Esta dificultad añadida al proceso de calibración, hace que pueda ser un impedimento para la fase de diseño del proyecto de rehabilitación, cuando se dispone de un tiempo limitado y unos datos escasos del edificio.

Lo comentado queda probado en el protocolo IPMVP, cuando recomienda el uso de herramientas calibradas para la verificación de ahorros, es decir, una vez aceptado el proyecto de rehabilitación, se instala el sistema de monitorización requerido, se monitoriza la situación de partida del edificio sin mejoras (el tiempo requerido y las variables requeridas para la calibración), y una vez calibrada la herramienta se implementan las medidas de mejora.

La calibración requiere el manejo y desarrollo de modelos estadísticos de pre-procesamiento de los datos, además de una medición racional del caso; de ahí su dificultad. El programa calibrado minimiza el error de los resultados con la situación real del edificio, por lo que se conoce tanto la situación de partida como los diferentes escenarios mejorados.

Como conclusión arrojada, es que se requiere poder corregir la herramienta, es decir, a partir de los datos existentes del edificio (probablemente facturas y parámetros de diseño), poder crear una

metodología o herramienta que permita modificar los resultados de la simulación. No se han encontrado ejemplos válidos, fiables y de calidad de aplicaciones de esta idea en la revisión realizada ya que, ante todo, se debe garantizar que la corrección se realiza conservando la física de lo acontecido en el periodo de datos tenido en cuenta: normalización por clima y uso.

Una aplicación real sobre un edificio particular es presentada por Yiqun Pan [119]. Este procedimiento destaca por su sencillez, ya que los parámetros de definición del edificio y sus sistemas se han establecido de acuerdo a la mejor información obtenible del mismo (medición, catálogo o proyecto). Ahora bien, la calibración es estadística, es decir, revisa los datos de entrada, los manipula, modifica el modelo y sus hipótesis de cálculo, hasta que acepta el mismo. Este procedimiento no sería válido de cara a verificar ahorros, es por eso que esta línea de investigación “calibración de software de simulación energética de edificios” tiene pocos resultados válidos, al ser un material fundamental para las empresas de servicios energéticos.

A la par, es necesario por tanto, establecer un mecanismo de ajuste que permita establecer una relación entre los consumos pronosticados y los reales, a fin de poder proporcionar al usuario un nivel de ahorro tanto energético como económico en concordancia con sus hábitos de consumo reales.

En los últimos años se han publicado ciertas referencias como:

- Shengwei et al. [120] muestra un procedimiento simplificado para la disgregación de facturas energéticas y el análisis de las mismas. Este método está muy limitado para el edificio analizado, aunque da una orientación del trabajo a realizar, ya que para limitar la incertidumbre se alimenta de datos medidos de los sistemas de climatización. Un trabajo parecido alimentado por estadísticas, es el que aparece en los proyectos EURECO “DEmand-Side Management. End-use metering campaign in 400 households of the European Community. Assessment of the Potential Electricity Savings”; y el proyecto “SECH-SPAHOUSEC. Análisis del consumo energético del sector residencial en España. Informe Final”, los cuales finalizaron antes de 2005 para el primero, y 2010 el segundo. El caso que aborda el proyecto dista del presentado porque considera datos de edificios reales en años anteriores al actual, por lo que el procedimiento debe alimentarse de un número cierto y acotado de datos, para reducir la incertidumbre real (por ejemplo, datos medidos en la actualidad).
- Aaron Smith et al. [121] desarrolla un procedimiento con la misma esencia que el anterior, pero de cara a calibrar una herramienta de simulación horaria en EnergyPlus. Este trabajo, tiene cierta relación con la tarea a desarrollar en el proyecto, pero no ofrece una metodología extrapolable, ya que elabora un procedimiento de corrección de ciertos parámetros de definición del caso, pero sin un criterio justificado y razonado que permita identificarlo como una metodología extrapolable.

Existen algunas revisiones, como [118] que demuestran que aunque existen bastante publicaciones en las que se realizan estos trabajos, se refieren a casos particulares o muy generales, en muchas ocasiones realizadas en el tiempo presente (medidas reales vs datos de facturas), que no son extrapolables a valores históricos, en los que se requiere un protocolo robusto y seguro (garantizar ahorros).

La corrección se basa en un modelo de caracterización en base mensual o estacional conservando la física de los fenómenos de transferencia de energía presentes y desagregando al máximo detalle cada uno de ellos, no es una labor sencilla y tampoco nueva. Es más, las tendencias normativas de cara a la evaluación de la demanda energética de los edificios en los años 90 en Europa estaban dominadas por el uso y desarrollo de modelos en base mensual o estacional, mientras que en EEUU dominaban los

modelos en base horaria.

Haciendo uso de esta reflexión, se lleva a cabo una revisión de las publicaciones existentes en la temática de 2010 hasta la actualidad, ya que los trabajos aparecidos con anterioridad de cierto calado aparecen plasmados en procedimientos normativos, elementos divulgativos Europeos...

El primer trabajo destacado es una revisión de las diferentes técnicas para predecir el consumo de los edificios [114], del cual se destacan las siguientes conclusiones:

- Revisa los modelos recientes propuestos para resolver este problema, incluyendo modelos detallados y simplificados obtenidos por métodos de ingeniería, estadísticos y redes artificiales.

Comparative analysis of the commonly used methods for the prediction of building energy consumption.

Methods	Model complexity	Easy to use	Running speed	Inputs needed	Accuracy
Elaborate eng.	Fairly high	No	Low	Detailed	Fairly high
Simplified eng.	High	Yes	High	Simplified	High
Statistical	Fair	Yes	Fairly high	Historical data	Fair
ANNs	High	No	High	Historical data	High
SVMs	Fairly high	No	Low	Historical data	Fairly high

Figura 2-1. Comparativa de métodos usados para la predicción del consumo de energía de edificios. Fuente [114]

La tendencia del autor es decantarse por las redes neuronales y las máquinas de soporte vectorial alimentadas con datos históricos del edificio. Aunque las principales conclusiones que son interesantes extraer son:

- Al describir los modelos detallados comenta la necesidad de calibrarlos de cara a aumentar la precisión de los resultados obtenidos. Por lo que se entiende y se comparte esa reflexión, salvo obligación no merece la pena el nivel exigido de definición del edificio y sus sistemas en los modelos detallados si después no se realiza una adecuación del procedimiento con respecto a los datos reales.
- Señala la dificultad de calibrar un modelo detallado como DOE-2 [35], consultando algunas de las referencias más destacadas y actuales en la materia. Es más, tras un procedimiento complicado y trabajoso, es posible obtener una calibración de un caso para un edificio real, pero la extrapolación de cualquier resultado del mismo a otro edificio es de baja calidad.
- Tras la revisión realizada con el título “procedimiento de ingeniería”, donde engloba todos los procedimientos fundamentados en la física del fenómeno a modelar, aboga por la obtención de modelos simplificados corregibles con datos experimentales y obtenidos a partir de una amplia base de datos de simulaciones.
- Se confirma en su revisión que los métodos estadísticos, neuronales o vectoriales requieren de un gran volumen de datos para asegurar la aceptación de los resultados que proporcionen.

En esta línea aparecen algunos trabajos que se mencionan a lo largo de este capítulo, ya que destacan por los productos intermedios que desarrollan más que por la modelización mostrada. No obstante, el trabajo realizado por Joseph Virgone [122], es un ejemplo de la metodología requerida para la obtención de este tipo de modelos: comparte muchos de los parámetros requeridos por el modelo expuesto en este capítulo, desarrolla una batería de simulaciones con casi 300 casos en TRNSYS, y su base temporal es el mes. En la esencia del fenómeno a modelar no existen estas dependencias en régimen permanente, salvo si quiere hacer una aproximación en serie. De este trabajo hay que decir que solo es válido para calefacción, que obtiene errores inferiores al 5% a nivel anual, pero a nivel mensual puede llegar al 20%. El punto más desfavorable del trabajo de cara a su extrapolación a las zonas climáticas de España y del resto de países del mediterráneo, es que para su obtención la

temperatura exterior ha oscilado entre 0 y 18°C, siendo la consigna de 19°C, y con niveles de radiación muy bajos.

El ahorro energético y económico que finalmente se origina tras poner en práctica una medida concreta de mejora de la eficiencia energética en un edificio dependerá entre otros factores del punto de partida inicial, es decir, del nivel de consumo existente previo a la mejora. La herramienta de certificación energética de edificios existentes calcula unos consumos teóricos para cada vivienda o edificio en unas condiciones generales y para unas condiciones climáticas de referencia.

En general, existirán diferencias entre estos consumos teóricos y los consumos que se producen en la realidad. Estas diferencias se deben, entre otros, a los siguientes factores [1]:

- Diferencias climáticas entre el año en el que se recogen los datos de consumo real y el año tipo considerado para la simulación.
- Diferencias constructivas entre la situación real (generalmente desconocida) y la supuesta para la simulación.
- Diferencias operacionales y funcionales que se presentan en la situación real.

En 1995 el “U.S. Department of Energy (DOE)” [123] midió en edificios comerciales energía final consumida con objetivo de tener una base de datos de intensidad en función de las diferentes tipologías. En su caso normalizaron los consumos en función del clima y del tamaño del edificio. Para tener una base útil se midieron 150 edificios. Los resultados son muy dispares en lo referido a las correlaciones conseguidas, pero aportan unos órdenes de magnitud positivos.

Se podrían destacar varios trabajos, entre ellos y relacionado con actuaciones a nivel distrito o entidades como hoteles, en los que se recogen las facturas mensuales. Esta posteriormente se correlaciona con el clima y las dimensiones del hotel, asumiendo algunos escenarios de uso y ocupación.

La revisión bibliográfica desvela la dedicación de los investigadores en Hong Kong sobre el tratamiento estadístico de estos datos. Destaca el trabajo de [101], donde se recolectaron facturas, se recogieron estadísticas de servicios y usos, así como el registro de operación de los edificios. Los trabajos comparan edificios entre sí, pero no normalizan y relacionan variables con esos consumos, simplemente realizan un trabajo de discusión. En cambio [124], correlacionan los consumos con la evolución de temperatura exterior, con objeto de intentar predecir los consumos en otras épocas del tiempo. Cabe destacar algunos indicadores que obtienen sobre la eficiencia de transporte de agua y de acondicionamiento de espacios, para un número delimitado de casos. En ambos trabajos se expresa la necesidad de aumentar la base de datos. Esto es crucial para disponer de resultados concluyentes, aunque las dificultades y costes asociados lo convierten en un proceso inviable.

El artículo más destacado en cuanto a la normalización de facturas con el clima es [125]. En este caso se recogieron datos de 5 grupos de oficinas, con objeto de establecer valores normalizados a los que aplicar un proceso de “benchmarking”. Para ello se crearon correlaciones de la intensidad de consumo (kWh/m²) en función del número de horas de operación y clima. Como única deficiencia es que, aunque disponían de una cantidad de datos abundante, existían algunos puntos de incertidumbre como eran: el número de personas, el nivel de ganancias internas, parámetros sociales... es por esto que en un momento dado, establecen tres escenarios para agrupar los edificios, y crear tres modelos de normalización.

Un referente de estas técnicas, es el proyecto EUROCLASS en el que participó el Grupo de Termotecnia en 1999 (S. Álvarez, F.J. Sánchez, EUROCLASS: Development of an european methodology to experimentally assess and clasify existing residential buildings based on their actual

energy consumption, The Rating Methodology. Contract nº XVII / 41031/Z/99-330 (1999)), por la cercanía y abundancia de información recabada durante el trabajo elaborado. En este proyecto se desarrolló una metodología determinista y experimental para caracterizar el consumo energético de edificios residenciales. A la par, esta metodología permite ser adaptada a las peculiaridades de las políticas energéticas de cada país. De forma sintetizada, se basa en la aplicación de curvas de distribución en frecuencia de los diferentes usos; así cuando se tienen datos monitorizados las curvas pueden ser corregidas al escenario medido.

Por consiguiente, el estudio de algunos de los trabajos anteriores, hace ver que existe bastante desconocimiento en las técnicas de normalización, y por eso aparecen algunas contradicciones y decisiones discutibles. Por todo ello, para poder llegar a un ajuste lo más cercano posible a la realidad y de mayor aplicabilidad a estos casos particulares, se requiere la creación de un procedimiento de normalización general. Ahora bien, lograr este fin implica disponer de datos que permitan conocer suficientemente el consumo real en cada uno de los casos (consumos en años anteriores, hábitos de consumo, características detalladas del edificio, etc), es por esto que se procederán con una batería de centenares de miles de simulaciones para crear los fundamentos del procedimiento de normalización, que se validaría con datos reales y mediciones puntuales.

Una referencia bastante actual es el estándar ANSI/BPI-2400 [126], en la que se describe un procedimiento para el tratamiento de facturas eléctricas de viviendas, y poder disgregarlas en el consumo de climatización. Está particularizado para viviendas y no tiene en cuenta el efecto del uso ni de las paradas. Básicamente, a modo de metodología, un procedimiento para una normalización climática de los consumos de las facturas.

2.1.6.2. Referencias destacadas

2.1.6.2.1. Ref. 1: [127], [128]

De entre las referencias encontradas destacan las referidas como un ejemplo de creación de modelos simplificados que se incorporan en herramientas de simulación detalladas en paso horario. En ellas los autores calibran un modelo para caracterizar la ventilación natural en una herramienta de simulación horaria mediante datos experimentales. No obstante, para ese objetivo manipulan los principales parámetros del edificio, pero hacen hincapié en que persiguen que el modelo caracterice la ventilación natural. El trabajo se destaca porque apoya de un caso a estudio con datos experimentales. El edificio es la biblioteca de la “National University of Ireland” construida en 2009.

En el trabajo se destacan las siguientes ideas:

- Se dispone de información detallada de la construcción y de los equipos.
- Se tiene un sistema de monitorización y gestión del edificio en el que se registran las temperaturas de los espacios, los niveles de CO₂, el consumo eléctrico y el consumo energético para calefacción. Además el consumo eléctrico aparece disgregado.

La información más destacable aparece descrita en la metodología de calibración mediante el siguiente esquema:

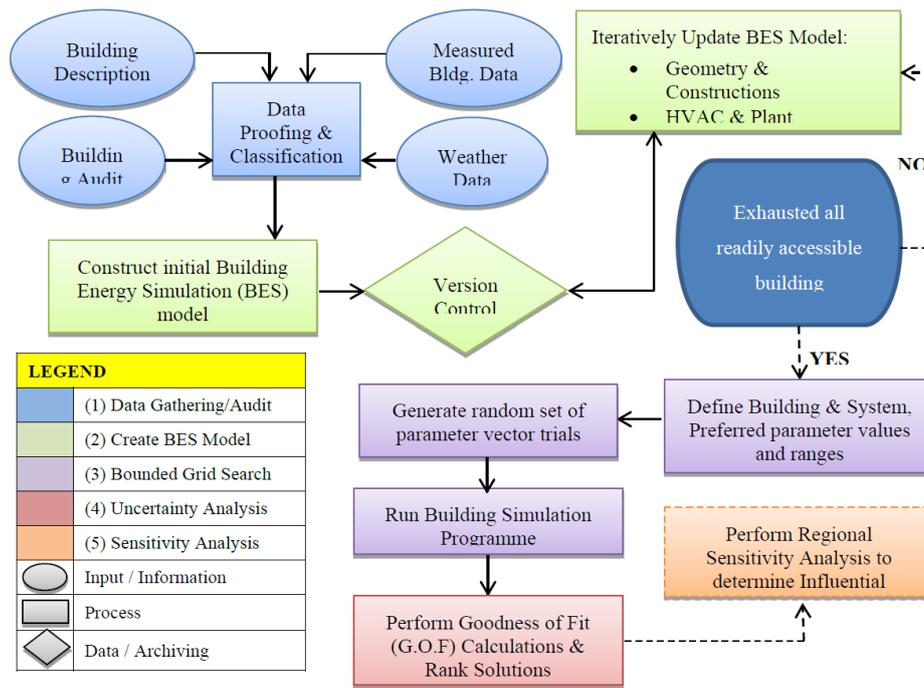


Figura 2-2. Esquema de la metodología [127], [128]

La metodología consiste en encontrar el mejor valor para los parámetros de definición del edificio y sus sistemas. El proceso de optimización requiere la realización de pasadas masivas, la definición de parámetros clave, la estimación de valores iniciales y rangos de variación, la caracterización experimental del mayor número de parámetros...

Sorprende negativamente que en el procedimiento se introduzcan datos reales del edificio de una serie de meses en uso real con la incertidumbre del usuario, datos climáticos sin la medición de la radiación directa; y positivamente, que se realicen auditorías exhaustivas para caracterizar los equipos, tanto de iluminación como de climatización.

Este trabajo representa la línea de calibración de herramientas más extendida, la cuál presenta su principal defecto en el fuerte nivel de invariancia que puede presentar el modelo, ya que se busca minimizar las diferencias entre los consumos mensuales de energía final de la herramienta y de los valores medidos; pero para ello se proporcionan pesos por ejemplo a la influencia de la temperatura interior de las diferencias estancias en la función objetivo, o por ejemplo, a una de las capas de aislamiento del cerramiento y de la epidermis.

2.1.6.2.2. Ref. 2: BESTEST-EX [129], [130]

En esta ponencia se presenta una síntesis de la línea de investigación que tiene el "National Renewable Energy Laboratory" en la materia. Sorprende que se usen a la vez mediciones horarias y datos de consumo de facturas con objeto de ajustar los parámetros de entrada de una herramienta de simulación. Aparece comentada la herramienta BESTEST-EX como el gestor de llamada a DOE2-2 para realizar el proceso de calibración. La descripción oficial de esta herramienta es la siguiente: "The Building Energy Simulation Test for Existing Homes (BESTEST-EX) is a method for testing home energy audit software and associated calibration methods. BESTEST-EX is one of the tools supporting energy analysis software development, created by NREL on behalf of the U.S. Department of Energy (DOE)."

El trabajo comparte el procedimiento con el anterior, aunque destaca que los datos medidos proceden de facturas en base mensual y en el trabajo anterior se tenían datos horarios. Los aspectos principales son:

- Se persigue calibrar una herramienta de simulación detallada a partir de datos de facturas mensuales de viviendas. Estos datos se desglosan y tratan con la herramienta BESTEST-EX.
- Las variables de calibración son: aislamiento de cubierta, aislamiento de cerramientos, temperaturas de consignas, parámetros radiantes de vidrios, infiltraciones, renovaciones hora, hermeticidad y aislamiento de conductos.
- Comenta que se pueden dar combinaciones entre parámetros válidas, pero no desarrolla esta información.
- De los anteriores elige los 6 parámetros más importantes, como variables independientes; el resto queda fijado al mejor valor que se tiene. Varía estos parámetros dentro de su rango hasta obtener un buen ajuste entre el modelo y los consumos de las facturas.
- Usa el motor de cálculo de DOE2-2, y la herramienta BEopt del mismo desarrollador para el proceso de optimización. [35]
- La clave de este procedimiento es el tratamiento que BESTEST-EX le hace a las facturas para conseguir los valores mensuales del consumo de climatización.
- Los resultados más destacables:

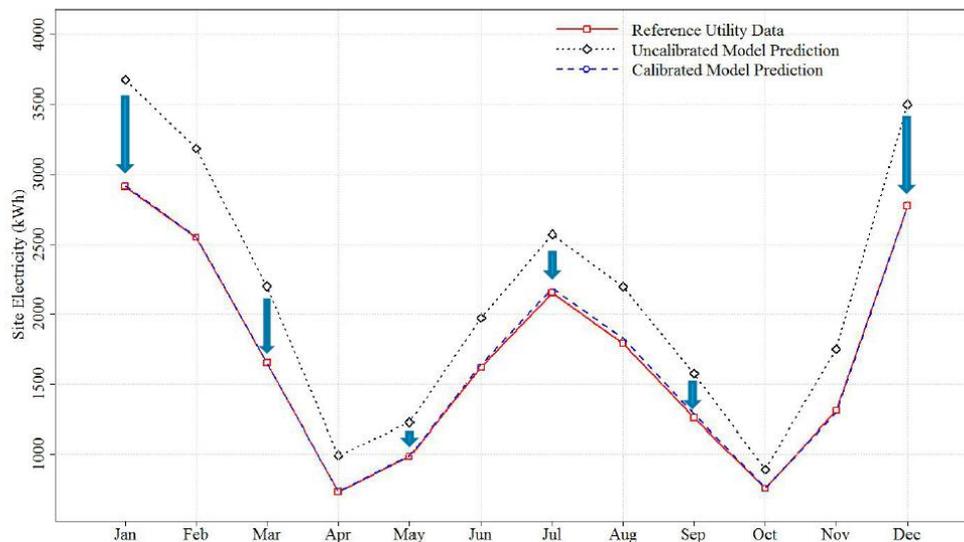


Figura 2-3. Resultados calibración según metodología BEST-EX [129], [130].

En rojo los resultados de referencia, en línea discontinua pequeña la predicción no calibrada; y en azul coincidente con la referencia el modelo calibrado. Véase que los resultados mostrados son a nivel mensual.

Los errores anuales oscilan en el 10% para el modelo calibrado contra los resultados de facturas. Es decir, asumiendo como modelo de referencia lo mejor que nos ofrece la herramienta de desglose y diagnóstico de facturas que nos presentan BESTEST-EX, el modelo calibrado presenta a nivel anual un error máximo de un 10%.

Finalmente, la justificación de la necesidad de una herramienta calibrada:

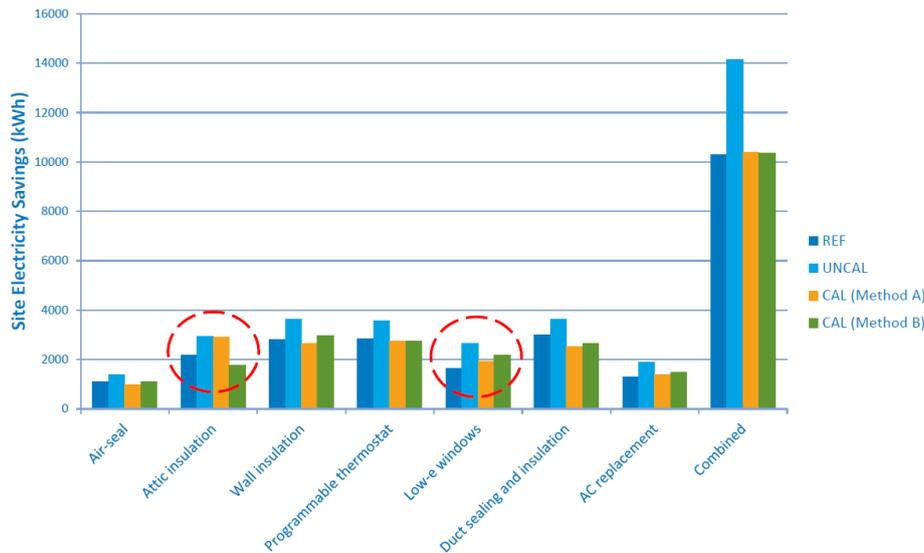


Figura 2-4. Resultados calibración según metodología BEST-EX [129], [130]. Estimación de ahorros.

La estimación de ahorros a partir de la herramienta no calibrada aparece en azul (oscuro para refrigeración y claro para calefacción); en naranja y verde la estimación de ahorros usando la herramienta calibrada. Se puede ver como la comparación entre el azul claro o celeste y el verde-naranja presenta errores sistemáticos en la evaluación de medidas de ahorros.

2.1.6.2.3. Ref. 3: AHSRAE-1051RP [14]-[16]

El proyecto de investigación ASHRAE 1051-RP ha generado un método para mejorar el proceso de calibración de herramientas de simulación energética de edificios a partir de datos mensuales reales del propio edificio, básicamente consumos energéticos.

Este trabajo tiene como objetivo elaborar una serie de guías a partir de trabajos de investigación que permitan dirigir al usuario hacia las mejores herramientas, técnicas, utilidades y procedimientos para calibrar herramientas de simulación de forma robusta y eficiente a partir de datos medidos del edificio.

Este trabajo se ve iniciado en 2006 con las primeras publicaciones del señor Agami, y que de forma muy sintetizada se resumen en:

1. Definir los parámetros y horarios del edificio de mayor influencia en las variables objetivo.
2. Definición del procedimiento de optimización fundamentado en el método de Monte Carlo, y basado en cientos de simulaciones del edificio. El objetivo es analizar el comportamiento heurístico de cada variable: análisis de sensibilidad.
3. Analizar las posibles soluciones y establecer posibles escenarios de combinación de los mismos.
4. Usar las soluciones anteriores para determinar la incertidumbre del procedimiento de cara a la incertidumbre admitida en la herramienta calibrada.

De las publicaciones recientes, destaca que en la introducción las referencias citadas son inferiores a 2005, por lo que aunque las publicaciones son de 2011 no ha sido actualizada esa revisión bibliográfica.

En las publicaciones recientes se puede ver cómo la base de casos analizada es bastante amplia, tanto en edificios como en climas. Cómo aceptan una desviación media de un 22% en el consumo y estiman que tienen un 10% promedio a nivel demanda. Destacan en sus conclusiones que han analizado edificios grandes como hospitales y hoteles de forma exhaustiva, que pretenden crear “wizard” para

simplificar este trabajo, y que es fundamental realizar un auditoría exhaustiva con campañas de medición que den detalle para eliminar incertidumbre en el máximo número de parámetros que se pueda.

Destaca que hay que retener las 20 mejores soluciones del proceso de optimización, que el error en la predicción de ahorros puede oscilar entre un 50%-20% y sobre todo y más importante, que si los datos proceden de facturas (la realidad medida) que hay que tratar, se puede tener una incertidumbre típica asociada a los mismos que oscilará entre un 15% y un 30%.

Los resultados mensuales que aparecen en el ejemplo tienen errores inferiores al 10%. Pero a diferencia de otros trabajos, este si ofrece resultados intermedios detallados, por ejemplo las variables elegidas como clave para arrancar el análisis de sensibilidad. Es más, el trabajo de ASHRAE ofrece directamente una selección de variables críticas en función de tipología de edificios. La siguiente tabla muestra las variables elegidas para edificios típicos de oficinas.

Table 2. List of Influential Parameters for the Typical Office Building Category (from Reddy et al. [2006])

	Description	Code	Variable Type*	Unit
Load schedules (rooms)	Lighting schedule	OffLgt	D	NA
	Equipment schedule	OffEqpt	D	NA
	Auxiliary equipment schedule	AuxEqpt	D	NA
Systems schedule (zones)	Space heating temperature schedule	OffHtT	D	NA
	Space cooling temperature schedule	OffCIT	D	NA
Envelope loads	Window shading coeff.	SC	C	Fraction
	Window U-factor	Uwindow	C	Btu·h/°F·ft ²
	Wall U-factor	Uwall	C	Btu·h/°F·ft ²
Internal loads (rooms)	Lighting power density	LPD	C	W/ft ²
	Equipment power density	EPD	C	W/ft ²
Systems variables	Supply fan power/flow	SFP	C	kW/cfm
	Energy efficiency ratio	EIR	C	Fraction
	Minimum supply airflow	MinSA	C	Fraction
	Minimum outside air	MinOA	C	Fraction
Auxiliary electrical loads	Auxiliary electrical loads—non-HVAC effect	AuxElec	C	kW

Figura 2-5. Captura de las variables elegidas como importantes para el análisis de sensibilidad de AHSRAE-1051RP [14]

De estas variables, tras el análisis de sensibilidad, resulta que las fundamentales son las tres que abajo aparecen.

Identifiable Parameters	Reference Values	Low Bound	High Bound	Final Calibration Values	Initial Guess Values
Uwall	0.640	0.055	0.800	0.655	0.400
EIR	0.450	0.359	0.650	0.463	0.400
MinSA	0.650	0.300	1.000	0.612	0.400

Figura 2-6. Captura de las variables a identificar para la calibración mediante AHSRAE-1051RP [14]

Resultados finales de la calibración del ejemplo desarrollado. Tabla 6

Obtenidos estos puntos, y fijados el resto a su mejor definición por el usuario, se consigue que la

herramienta tenga un error relativo inferior al 10% en la estimación de consumos del edificio cuando se excita con las mismas condiciones climáticas.

La caracterización de las excitaciones climáticas es un punto discutido por todos los autores, pero no con el detalle suficiente como para presuponer otra cosa que un tratamiento lógico de las mismas, es decir, generar los archivos climáticos con los que se alimenta el programa usando herramientas como Meteonorm.

2.1.6.2.4. Ref. 4: Trial example of AHSRAE-1051 [134]

Tal y como Aventura el nombre, este trabajo describe una aplicación del proyecto de ASHRAE 1051-RP. Para ello se monitoriza un edificio de 120000 m², con sistemas a 4 tubos y en un clima frío. Se lleva a cabo el protocolo a nivel mensual para todos los consumos del edificio. El inventario energético se realiza a partir de ASHRAE Guideline 14.

Destaca que se atreven a comentar resultados horarios, y que el modelo presenta discrepancia en los valores horarios y diarios, sobre todo en la energía demandada sobre el primario. Esto último es de esperar cuando se realiza una calibración de parámetros de entrada solo a través de la variable final de consumo, muchas veces obtenida a partir del dato de facturas. Este trabajo deja ver que hay que profundizar más en las variables objetivos para calibrar la herramienta.

2.1.6.2.5. Ref. 5: "A Review of methods to match building energy simulation models to measured data" [135]

Este trabajo es una revisión bibliográfica en la que colaboran los centros de NUI Galway en Irlanda y la Universidad de California (Berkeley). La revisión tiene bastantes pinceladas prácticas, justificando la necesidad de herramientas calibradas y el análisis de costes que hay que hacer entre lo que se gana al conseguirla y lo que hay que gastar en monitorización/trabajo para obtenerla.

Hay una reflexión importante en la propia introducción del trabajo, y es que una herramienta detallada se compone de miles de modelos, empíricos o analíticos, que tienen hipótesis o simplificaciones para hacerlos operativos. Bien, pues esto es importante de cara a la propia calibración, ya que los autores destacan que para poder calibrar una herramienta se debe ser totalmente dueño del código de la misma, tanto de sus parámetros de entrada como de sus hipótesis o simplificaciones.

ASHRAE Guideline 14 [136], IPMVP [137] y FEMP [138] son las tres principales referencias sobre evaluación y verificación de ahorro. Pues en este trabajo se extrae de las correspondientes estándar los criterios de aceptación de los procedimientos corregidos/calibrados. Estos criterios son en función de dos parámetros estadísticos: el primero el MBE, o error relativo medio, y el segundo el CVRMSE o coeficiente de variación del error cuadrático medio, es decir, la dispersión de nube de puntos cuando representamos el gráfico valor medido vs resultado de simulación correlada.

Criterios de aceptación	Resultados Mensuales		Resultados Horarios	
	MBE	CVRMSE	MBE	CVRMSE
ASHRAE [136]	5	15	10	30
IPMVP [137]	20	-	5	20
FEMP [138]	5	15	10	30

Tabla 2-4. Criterios de aceptación de herramientas de simulación calibradas. Fuente [134]

Otro tema tratado y destacable son las fuentes clásicas de incertidumbre en el modelo de simulación:

- Desconocimiento de parámetros de definición del edificios y sus sistemas, tales como horarios, geometría, material...
- Incertidumbre del propio modelo asociada a sus simplificaciones e hipótesis.
- Errores en la propia resolución del modelo.
- Incertidumbre en la caracterización de las condiciones externas del edificio, tanto a nivel meteorológico como de comportamiento del usuario.

Y lo más relevante, previo a la simulación es importante identificar y cuantificar la influencia de estas fuentes de incertidumbre en la predicción que hace el modelo, ya que muchos modelos disparatados pueden dar la misma solución.

El trabajo presenta contenido de interés y sintetizado sobre los fundamentos de la calibración de herramientas de simulación.

De las conclusiones destaca la primera, en la que se hace una exposición de la dificultad que tiene la calibración de una herramienta detallada, además del volumen de experiencia y conocimiento que se debe de tener para evitar que algo se olvide. El resto ofrece los focos de trabajo que hay que solventar si se quiere hacer un proceso de calibración de calidad.

2.1.6.2.6. Ref. 6: "Model calibration for building energy efficiency simulation" [139]

Sobre un edificio de uso para investigación de 4500 m² en tres plantas (Universidad de College Cork en Irlanda). El sistema de climatización es hidrónico mediante una bomba de calor geotérmica con apoyo solar para la producción de agua caliente y un auxiliar de caldera de gas. La herramienta de simulación es EnergyPlus versión 8.0, usando el Google SketchUp.

A diferencia de los trabajos presentados hasta ahora, la calibración se hace por niveles, es decir, se calibran componentes del modelo por separado porque se tienen mediciones aisladas de los mismos, por ejemplo se conocen todos los caudales de agua circulantes por el edificio, la cantidad de energía producida por el sistema solar, disipada/absorbida en el suelo, consumos de cada elemento activo... además la auditoría energética que se describe tiene bastante detalle y es apoyada con campañas de medición. La metodología es común a lo comentado pero de forma manual, es decir, realizan simulaciones muy controladas y bastante focalizadas en los parámetros que eligen. Esta vía está muy influenciada a los conocimientos del autor, y sobre todo puede no caracterizar con calidad los efectos cruzados o las posibles combinaciones de parámetros (soluciones mixtas).

El orden con el que se llevan a cabo estos niveles no aparece justificado. Existen errores horarios máximos del 40%, pero en valor promedio son inferiores al 15%. El error cuadrático presenta un valor medio superior al 20%. En temperaturas interiores si hay un error sistemático de 1.5 grados, que alcanza máximos de 20°C.

Cuando realiza la estimación de ahorros, asume como "baseline" la situación de referencia medida, e implementa en la herramienta la medida para comparar el resultado de la herramienta con la situación de referencia. Esa comparación es la que se considera ahorro en este trabajo.

De las conclusiones, la más destacable es la preocupación que los autores presentan por no poder cambiar los modelos de control de la herramienta, y es por ello que en el consumo eléctrico medido contra el estimado aparecen grandes diferencias. Es más, cuando presentan el rendimiento estimado con el medido, se tiene una diferencia a veces superior a 1 punto de COP.

2.1.6.2.7. Ref. 7: "Stochastic modeling of overtime occupancy and its application in building energy simulation and calibration" [140]

Este trabajo ejemplariza una temática que no ha sido tratada en estas aplicaciones hasta el mismo, y es la influencia de las horas extras en los consumos medidos, y no contemplados en las herramientas de simulación.

Como dato medido, habla de oscilaciones entre 10-20% de horas de trabajo medidas y no contempladas en los horarios convencionales de edificios. Es más, además se comenta que la operación normal del edificio no contempla las tareas de limpieza y mantenimiento del mismo. Todas estas horas sumadas a lo largo del mes suponen un consumo, que no tenido en cuenta en una herramienta de tratamiento de facturas, supone un error de alta importancia.

Resulta destacable que de las gráficas con datos medidos que presenta el trabajo sobre los niveles de ocupación, no se ven patrones claros de ocupación diaria, y tampoco niveles de ocupación constantes en función del mes y el día de la semana. Esto se ve arrastrado en la propia definición del caso en el programa de simulación.

La solución que exponen los autores es caracterizar las variaciones de ocupación con respecto al patrón definido a partir de funciones probabilísticas como la exponencial.

Sobre los resultados de la calibración, destacar que existen errores superiores al 50% en las horas de arranque. No son destacables a nivel horario, ya que se tienen errores en los arranques, no obstante a nivel mensual si son aceptables. La calibración que se ha hecho es definir al máximo detalle las fuentes internas del edificio, y realizar una auditoría en detalle del edificio para definirlo con la mayor calidad posible.

2.1.6.2.8. Estándares metodológicos

1. **“ANSI/BPI-2400-S-2012 – Standard Practice for Standardized Qualification of Whole-House Energy Savings Predictions by Calibration to Energy Use History”**

- Procedimientos que establecen los requerimientos a los datos de facturas y el protocolo de normalización climática.
- Criterios de aceptación de modelos calibrados
- Restricciones a los parámetros de entrada y de ajuste

2. **“ANSI/RESNET-Calibration Test Method”**

- Vinculada a una de las referencias usadas en el documento, del NREL.
- Objetivo: desarrollar las directrices a emplear por los desarrolladores de herramientas de simulación para testear y mejorar los métodos de calibración.

3. **“ASHRAE 1051-RP”** [131], [132], [134]

- Define las líneas generales de un procedimiento para la calibración de herramientas de simulación usando datos de consumos medidos. En su desarrollo participa el Dr. Agami Reddy.
- Este estándar tiene cierta repercusión en las últimas publicaciones relacionadas con la materia, como se ha discutido con anterioridad.
- Publicaciones relacionadas con su desarrollo:
 - 1. Reddy, T.A., I. Maor and C. Ponjapornpon, 2006, “Calibrating Detailed Building Energy Simulation Programs with Measured Data- Part II: Application to Three Case Study Office Buildings”, HVAC&R Research Journal, accepted, March
 - 2. Reddy, T.A., I. Maor and C. Ponjapornpon, 2006, “Calibrating Detailed Building Energy Simulation Programs with Measured Data- Part I: General Methodology”, HVAC&R Research Journal, accepted, March.
 - 3. Sun, J. and Reddy, T.A., “Calibration of Building Energy Simulation Programs using the Analytic Optimization Approach”, HVAC&R Research Journal, vol.12, no.1, pp.177-196, January

- 4. Reddy, T.A., 2006. "Literature Review on Calibration of Building Energy Simulation Programs: Uses, Problems, Procedures, Uncertainty and Tools", ASHRAE Transactions, vol 112(1), January.

2.1.7. Evaluación y verificación de ahorros

En la Unión Europea se ha dado el primer paso con el siguiente compromiso "Eficiencia energética: alcanzar el objetivo del 20 %". Las autoridades europeas se comprometieron a reducir para 2020 el consumo de energía primaria en un 20 % respecto a las proyecciones previstas. Aumentar la eficiencia energética es la forma más rentable de reducir el consumo de energía manteniendo a la vez un nivel equivalente de actividad económica. Ese aumento también sirve para tratar los desafíos energéticos clave, a saber, el cambio climático, la seguridad energética y la competitividad.

El objetivo de la Unión Europea de reducir el consumo de energía en un 20% para 2020, requiere una significativa inversión en eficiencia energética, sobre todo en los próximos años, que además de significativa tiene que ser ágil. Por estos motivos, el crecimiento de las compañías de servicios energéticos en edificios jugará un papel fundamental, al favorecer la competencia de entidades privadas en el aumento de la eficiencia energética no por obligatoriedad si no por el ahorro energético, traducido a ganancias monetarias, acercando la meta del 20% comunitario.

La problemática que se encuentra una Empresa de Servicios Energéticos – ESE (ESCO en inglés), desde que recibe el edificio a estudio hasta que oferta el proyecto de ejecución, es que debe ser capaz de solventar los siguientes problemas, principalmente:

- Diagnóstico del comportamiento energético de la situación de partida del edificio a partir de datos de facturación, personal de mantenimiento del edificio, y monitorización/medición existente o nueva.
- Evaluación de los posibles proyectos de ahorro de energía mediante la determinación de comportamiento energético del edificio y sus sistemas.
- Análisis económico de la solución propuesta, con las garantías requeridas, que se traducen en la monitorización/medición necesaria.
- Proyecto ejecución de las diferentes actuaciones

Sobre medición y verificación de ahorros, destacan por encima del resto las publicaciones de las organizaciones EVO y ASHRAE, siendo la primera líder en divulgación.

El objetivo de EVO "Organization for Evaluation and Verification" es: desarrollar y promover el uso de protocolos, métodos y herramientas estandarizados, para cuantificar y gestionar los riesgos y beneficios asociados a aquellos negocios basados en la eficiencia energética, energías renovables y el agua. Estos argumentos son desarrollados en un protocolo con el nombre IPMVP [137] "International Performance Measurement and Verification Protocol", que a lo largo del epígrafe es sintetizado para demostrar la situación actual de estas técnicas.

A su vez, en ASHRAE "American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers", en su estándar [136] y en el informe final del proyecto 1050 [90], se describen unas líneas generales para la medida y verificación de ahorros de energía en edificios. Como se analiza más abajo, en ellas se hace patente la necesidad de establecer un método capaz de predecir el consumo de energía de un cierto edificio bajo unas condiciones determinadas.

Ambas referencias, junto con algunas bastante descriptivas de la aplicabilidad de estas técnicas como son: [141]-[145]; constituyen el "esqueleto" de las reflexiones que aquí aparecen.

Medición y verificación conjuntan un proceso que, tiene como objetivo, la determinación del ahorro que se produce al hacer una mejora en un sistema mediante su monitorización. En forma de idea es medir-ahorrar-medir-garantizar; que significa mido (o inventario energético) para ver cómo puedo ahorrar, actúo e instalo una monitorización adecuada, y garantizo los ahorros que he predicho.

Haciendo un zoom, medición es entendida como la monitorización de las variables energéticas necesarias, como para predecir, controlar y diagnosticar; más el tratamiento y análisis de los datos.

2.2. POTENCIAL CIENTÍFICO Y TECNOLÓGICO

Hasta ahora la aplicación de estas técnicas de caracterización térmica a base de medición e identificación, se engloba en dos grandes vertientes: el desarrollo de herramientas informáticas y la diagnosis del edificio. Por eso, el epígrafe se va a dividir en tres puntos, correspondientes a las dos vertientes comentadas, y a la que se prevé como la siguiente era en térmica de edificios: rehabilitación energética.

Hablar de aplicabilidad y quizás en su fundamento, diseminación, lleva de nuevo hacia DYNASTEE como clave en la Unión Europa. Su eslogan es: la identificación dinámica de sistemas por medio de modelos es necesaria, y que para ello se debe de crear un ambiente multidisciplinar que compagine la sabiduría de estadísticos y matemáticos sobre sus temáticas con el conocimiento de la física de los procesos de los ingenieros. Además, la promoción y aplicación de esta tecnología está ligada a los objetivos del "EPB Directive", de los que se destacan:

- DIRECTIVE 1989/106/CE. Construction Products Directive (or CPD).
- WHITE PAPER 1997/599/ COM. Energy for the future: Renewable sources of Energy – White Paper for a Community Strategy and Action Plan.
- GREEN PAPER 2000/769/ COM. Towards a European strategy for the security of energy supply.
- KYOTO Protocol; 1997. <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf>
- DIRECTIVE 1996/57/EC. Energy efficiency requirements for household electric refrigerators, freezers and combinations thereof.
- DIRECTIVE 2001/77/EC. Promotion of electricity produced from Renewable Energy Sources in the internal electricity market.
- DIRECTIVE 92/75/EC. Energy labelling of household washing machines.
- DIRECTIVE 2002/91/EC. Energy Performance of Buildings (or EPB).

Para describir el contexto del pasado cercano, presente y futuro, que ha rodeado a estas técnicas, se extrae la información más actual de la publicación realizada por DYNASTEE [146]

2005

Es en esta etapa cuando las políticas europeas comienzan a adaptarse para tener en cuenta el cambio climático, intentando estimular el uso de las energías renovables con el objetivo de reducir el consumo de energía un 12% en 2010. Esta línea comenzó en 1989 con el desarrollo de estándares y planes nacionales que persiguen el White Paper. Las temáticas de eficiencia energética, tecnologías, objetivos energéticos, comportamiento energético de edificios, biocombustibles, cogeneración etc... tomaron sus objetivos junto con el aprovechamiento energético y el diseño sostenible de los edificios, incluyendo DYNASTEE como la red que está preparando el cambio para los próximos años.

El parámetro principal de interés en el área de la energética de los edificios es la transmitancia y la apertura solar. La finalidad de la identificación es la identificación física de esos parámetros para optimizar los cerramientos o el uso de la energía solar. El análisis mediante métodos dinámicos, permite analizar el proceso dinámico teniendo en cuenta los efectos que los métodos estáticos no pueden caracterizar. Encontrar el valor óptimo de estos parámetros pasa por realizar experimentos que sean capaces de alcanzar las propiedades del régimen permanente.

La aplicación de las técnicas de identificación a edificios o sus componentes requiere un alto nivel de conocimiento físico y matemático del proceso. Este factor se combina con la calidad de datos, las características de esta monitorización y la medición climática. Debido a esto aparecen resultados muy dispares en función del usuario, de los modelos y del software usado. Entre los años 1994-1996 se celebraron varias competiciones internacionales sobre identificación de sistemas demostrando lo antes comentado: casi todos los competidores obtuvieron diferentes resultados con los mismos datos de entrada. La red PASLINK pretendió consolidarse, fortalecer estas líneas de investigación, y agrupar a los mayores expertos en estas técnicas de identificación. Por esto se organizaron publicaciones y grupos de trabajo para llevar a cabo el salto de este material científico a los edificios existentes: aplicabilidad.

Dentro de esta temática se distinguen tres áreas:

- Componentes: puentes térmicos, huecos, aislamiento, muros. Las condiciones experimentales pueden ser bien conocidas y los experimentos optimizados, incluso se pueden realizar en cámaras climáticas.
- Celdas: permiten el análisis de componentes bien en el interior de laboratorios o en el exterior. La principal ventaja es la monitorización al detalle.
- Edificios reales: Aparecen como una vertiente compleja para el análisis, puesto que además de los problemas de monitorización que aparecen se tiene el comportamiento de los ocupantes.

2015

La tecnología matemática para el análisis dinámico será reconocida como crucial para la optimización energética de la eficiencia energética de los edificios. La refundición de las directivas EPBD, ESD y CPD se habrá llevado a cabo y el trabajo se desarrollará en actualizar la segunda generación de normativas, métodos de cálculo, certificación etc... Los nuevos edificios consumen menos energía, pero los edificios existentes aumentan sus consumos eléctricos.

2020

Para este año se promueve el desarrollo sostenible y los edificios zero. Se prevé que tomará un papel importante el desarrollo de redes de distribución distribuidas y controladas para el consumo de energía final, tanto en lugares laborales como en viviendas, así tomará peso el desarrollo de sistemas de almacenamiento de energía, y las posibles inteligencias para comunicar consumidores y demandantes.

A medida que las tecnologías avanzan se puede observar el aumento de complejidad de las mismas y, teniendo en cuenta el desembolso económico que conllevan estos avances, se ve justificado el análisis y la simulación dinámica de esos sistemas, tanto en fase de diseño (nuevas tecnologías) como de evaluación (nueva y existente). A la par, la monitorización "in-situ", que a lo largo del pasado ha jugado un papel más secundario, pasará a ser considerada como primordial, sobre todo si se esperan conseguir los objetivos y deseos estipulados.

El trabajo doctoral desarrolla la solución para cuatro problemas energéticos sobre edificios:

1. Verificación de ahorros
2. Caracterización de equipos o componentes a partir de experimentos
3. Estudios paramétricos y rehabilitación energética
4. Gestión energética a través de la predicción de consumos

2.2.1. MACTIE Verificación de ahorros

El punto uno se entiende analizando la información publicada por la organización más relevante sobre el tema. Esta organización EVO[137], pretende la estandarización de la “Evaluación y Verificación de ahorros”, y argumento principal de su estándar es:

$$\text{Ahorro energético durante un periodo} = \text{Línea base para ese periodo} - \text{Medición energética de ese periodo} \pm \text{Ajuste}$$

La ecuación anterior se traduce en lo siguiente: para conocer el ahorro energético que se produce tras una mejora, se requiere la medición energética de ese periodo y la creación de una línea base para ese periodo junto con un posible ajuste. Esta línea base indica cómo estaría el sistema no mejorado durante ese periodo, es decir, se compara la situación mejorada con la no mejorada, que ya no existe, puesto que el edificio o el sistema han sido modificados para implementar la mejora o las mejoras.

De la ecuación se saca la siguiente conclusión: en general (existen ciertas excepciones), no se puede cuantificar el ahorro solo con medir directamente diferencias de consumos energéticos, sea a nivel combustibles o eléctrico, pero esto no es realmente fidedigno, ya que se debe tener en cuenta el servicio energético para poder hacer una comparación con garantías y calidad (ejemplo: comparación de la factura energética anual de la situación de partida y la mejorada, cuando el año tras la mejora ha sido críticamente más frío).

La excepción clave, es el contrato de servicios energéticos que permita el cálculo del ahorro sin necesidad de crear un modelo para la línea base, con un simple ajuste de la medición de la factura energética o del consumo total.

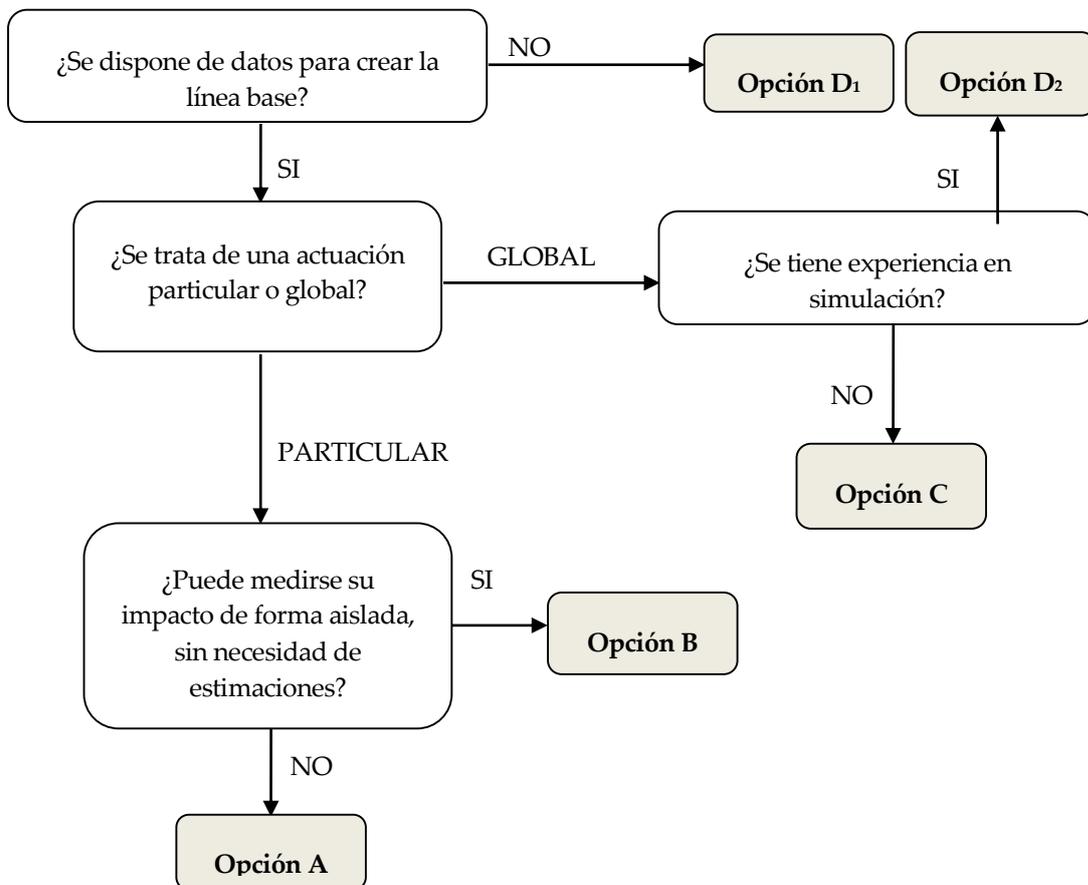


Figura 2-9. Reflexiones adoptadas del material publicado por EVO.

Si se parte de la necesidad de crear una “línea base” que refleje la situación de partida del edificio/espacio/componente/sistema HVAC, es importante saber que se requiere una cierta monitorización. En la mayoría de los casos, no existirán valores históricos de las variables requeridas. Dicho esto, puede suceder que no se dispongan de datos, salvo los extraídos de un inventario energético de calidad, junto con una recogida de las facturas energéticas. En ese caso, se puede proceder a la aceptación o corrección de un programa de simulación. Este proceso se ha denotado como opción D1, y procede la opción D de EVO.

Si se tienen datos suficientes como para elaborar la “línea base”, pueden suceder dos escenarios: que la medida sea aislada, un conjunto de medidas, o una actuación integrada dentro de un sistema global. Si la medida es aislada, puede suceder que por su índole no requiera una línea base, como ya se explicó. Si este no es el caso, el modelo de caracterización simplificado sería la herramienta capaz de solventar este problema, gracias a que es válida para todo tipo de sistemas.

Global implica interacción entre procesos o efectos relacionados. Aumentar la eficiencia del recuperador de energía, reduce la demanda de energía sobre el sistema secundario, que a su vez reduce la carga sobre el sistema primario, lo que se traduce en un funcionamiento a carga parcial y probablemente un menor consumo de energía. De cara a esta tipología se tienen dos posibles criterios de verificación: una medición completa de la situación antes y después de la mejora, con el elevado número de sensores requeridos; y la calibración/corrección de un programa de simulación detallada, de tal forma que puedan analizarse los efectos cruzados.

Se puede llegar a las siguientes conclusiones, que a su vez demuestra el potencial de la metodología en los diferentes productos exportables:

- 1 El modelo de caracterización simplificado, identificado a partir de medidas experimentales, y obtenido por reducción de un modelo detallado; es válido para una amplia gama de sistemas, desde componentes a zonas, o edificios completos.
- 2 Cuando se tenga el modelo de caracterización simplificado existen dos posibles aplicaciones: la primera quedarse con este modelo como herramienta de diseño, diagnóstico, estimación... (opción B de EVO); o segunda, hacer la hipótesis de que la realidad se comporta como los resultados ofrecidos por el modelo para las diferentes entradas y usarlo como laboratorio ideal de calibración/identificación del modelo detallado (Opción D de EVO, particularizada como D2 en la tesis).
- 3 Al estar destinada a la rehabilitación energética, la metodología se alimenta del mayor número de datos del edificio existente, por lo que se puede realizar una validación/corrección del modelo detallado (Opción D de EVO, particularizada como D1 en la tesis); o bien obtener un modelo detallado calibrado (D2).

Tener un modelo de mayor nivel calibrado, permite la evaluación de medidas integradas y con interacción, e incluso otro tipo de fines como puede ser la gestión energética. La metodología, en alcance, deja como una línea futura la calibración de una herramienta detallada, pero si explota la vía de corrección de una herramienta simplificada en base mensual para este mismo fin.

La cohesión de lo comentado sobre evaluación y verificación de ahorros aparece explícito en la tesis. Por ejemplo, se destaca en primer lugar, que en el capítulo tres, más concretamente en el epígrafe 3.6 “Explotación de MCS” se ponen algunos ejemplos del potencial del producto de la tesis, junto con la validación realizada en el capítulo tres “Aplicaciones MCS”, donde hay un ejemplo concreto de evaluación de ahorros con datos experimentales.

Otro ejemplo, y en otro nivel que el anterior aparece en el capítulo 4. Allí se describe el procedimiento simplificado de caracterización de la demanda de edificios en base mensual. Este procedimiento está desarrollado con la finalidad de ser corregido/calibrado a partir de datos experimentales, lo cuál lo convierte en una herramienta de generación de “línea base”.

2.2.2. MACTIE Caracterización de equipos y elementos

La solución propuesta por la tesis para el punto dos, caracterización de equipos y componentes, se esquematiza en la siguiente figura:

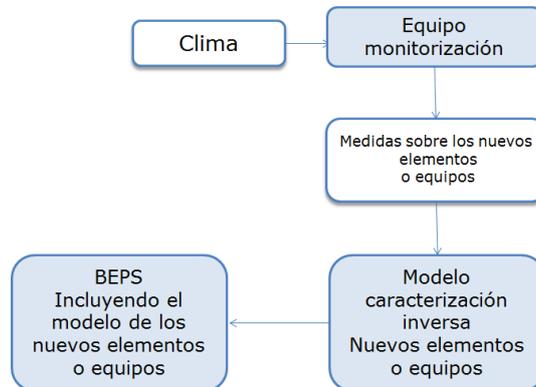


Figura 2-10. Explotación de la metodología doctoral como herramienta de prediseño

Este producto queda vinculado con los ejemplos de caracterización de equipos y componentes a partir de la experimentación de prototipos. El trabajo doctoral ofrece una vía de obtención de modelos simplificados identificables con el nivel de monitorización habitual.

En el caso de ensayos sobre prototipos, la literatura muestra los avances en la monitorización y cómo la variable económica suele ser la mayor limitante. En cambio, la modelización, aún para sistemas térmicos análogos, difiere sustancialmente. En muchas ocasiones este dato se traduce en modelos complicados sobre los que interactuar con datos experimentales se hace extremadamente forzado. Por último, de la revisión realizada se ve como los resultados publicados sobre edificios reales suelen provenir de climas fríos, donde los efectos dinámicos y las variaciones climáticas están atenuados.

El modelo de caracterización de la solución innovadora se identifica con datos experimentales. Este paquete se integra en una herramienta de simulación del comportamiento energético de edificios (BEPS), pudiendo realizarse un análisis de sensibilidad en detalle, y sobre todo analizando todos los resultados globales del edificio con y sin la solución innovadora.

En el capítulo 4, “Aplicaciones MCS”, aparece la “Aplicación 2 – MECLIDE”, donde se demuestra este potencial sobre una solución innovadora consistente en una fachada ventilada con material de PCM. Además en el capítulo 4, en el punto 4.5 se describe la utilización del procedimiento para el desarrollo de la guía “Predimener” de ANDIMAT.

2.2.3. MACTIE Estudios paramétricos y rehabilitación

El punto 3, estudios paramétricos y rehabilitación energética, está vinculado con el “MCS Demanda Térmica Mensual”. Aparecen unidos por aparecer vinculadas al modelo de caracterización simplificado en base mensual. Este producto es una herramienta para la corrección de procedimientos de cálculo, para ello:

1. Obtención del modelo simplificado mensual a partir del modelo detallado, a partir de pasadas sucesivas o análisis de sensibilidad.
2. Corrección/calibración del procedimiento simplificado mensual a partir de datos experimentales.

De este proceso se obtienen las dos soluciones: en el punto 1 aparece el modelo simplificado que puede ser usado como herramienta de análisis paramétrico o incluso estudios de ciclo de vida; y del punto 2

una herramienta compatible con el uso de facturas y datos reales para la definición de proyectos de rehabilitación energética u obtención de herramientas de baseline. En la revisión bibliográfica aparece la conclusión de que una calibración o corrección de herramientas de simulación en base menor al mes es una utopía actualmente. Y que aún intentándola los únicos resultados defendibles son los obtenidos a nivel mensual.

2.2.4. MACTIE Predicción de consumos

La predicción de las variables de consumo energético permite estimar la evolución futura de estas variables con el fin de poder anticiparse a posibles picos y conocer el consumo a lo largo del día siguiente. En el caso de consumos eléctricos, la predicción es una herramienta imprescindible a la hora de programar la producción de energía por parte de las centrales eléctricas. La energía eléctrica sufre el problema de que no se puede almacenar de forma eficaz, por lo que toda la energía producida ha de consumirse. Por esta razón, un conocimiento lo más exacto posible de la evolución del consumo permite reducir al máximo las pérdidas por un exceso de energía producida.

La aplicación de algoritmos de predicción ya conocidos para la estimación del consumo en edificios del sector terciario resulta interesante por tres razones principales:

- Una predicción a largo plazo proporciona una posición ventajosa con respecto a la compañía suministradora al poder conocer el consumo estimado para un año y poder así negociar los términos del contrato.
- Conocer con anterioridad los posibles picos de consumo y poder programar la entrada de grandes equipos, como pueden ser climatizadores, y evitar así un exceso de potencia que será registrada en el maxímetro.
- Una predicción fiable a un día va a permitir no solo hacer una programación del consumo, sino que también abre la posibilidad de acudir directamente al mercado de subasta con el fin de ahorrar los costes de intermediarios.

Control y gestión energética se relacionan con el modelo de caracterización integrado de consumos del edificio (“3.3.2. Modelo integrado de consumo”). En este epígrafe se aplica la metodología a la obtención de un modelo de caracterización de consumo con autoaprendizaje (predicción), o bien sin el mismo (detección de anomalías o diagnosis). Al igual que con los puntos anteriores en el capítulo 4, Aplicaciones MCS”, aparece otro desarrollo “Aplicación 3 – CHORUS”.

3. MODELO DE CARACTERIZACIÓN SIMPLIFICADO - MCS

"Hay que simplificar las cosas, tanto como sea posible, pero no más"

Albert Einstein

En las siguientes páginas se describe el modelo de caracterización simplificado resultante del trabajo de investigación elaborado durante la tesis doctoral. Para ello se ha estructurado el capítulo en los siguientes epígrafes:

- Descripción y principios: dónde se argumentan los conocimientos adquiridos y el porqué de su recepción. Principalmente funciones de transferencia.
- Modelización a partir de funciones de transferencia, con la peculiaridad de las decisiones prácticas adoptadas para la reducción al máximo del modelo.
- Modelo integrado, como una particularización del modelo de caracterización simplificado, que además describe las posibilidades de discretización temporal. Esta particularización tiene como objeto tratar variables cuya modificación de base de tiempo requiere una integración, como puede ser un consumo.
- Identificación de parámetros, como la síntesis aplicada para las futuras identificaciones del modelo, es decir, el cómo se realiza la ingeniería inversa sobre este modelo.
- Validación y aceptación: este epígrafe enumera los requisitos y restricciones a exigir al modelo tras las hipótesis realizadas.

Este modelo tiene entre sus virtudes, el ser totalmente compatible con una identificación experimental para todo tipo de sistemas, tanto a nivel componentes o espacio, como HVAC o edificios completos, es decir, su capacidad de adaptación. Por tanto, la principal cualidad del modelo es su abertura, dependiendo de las variables dependientes e independientes del mismo. Es por tanto, la vía de modelización para poder desarrollar los cuatro niveles que alcanza la metodología, tal y como se ha descrito en los objetivos de la tesis del capítulo 1.

La precisión exigida viene condicionada a la calidad y el número de datos experimentales que se dispongan, por lo que en muchas ocasiones su simplicidad y sencillez no son más que una condición para tener utilidad en el marco experimental existente. Si bien es cierto que en el epígrafe "Explotación del MCS" se contemplan aplicaciones en las que se puede permitir la pérdida de las exigencias físicas del mismo con objeto de aumentar la calidad de sus predicciones y la posibilidad de su autoaprendizaje, los pilares del modelado son capturar toda la esencia física del sistema caracterizado.

3.1. DESCRIPCIÓN Y FUNDAMENTOS

El fundamento del modelo que a continuación se describe, viene precedido por la aplicación de las funciones de transferencia en la edificación, de ahí que ocupen casi la totalidad de este capítulo desde una visión práctica y sintetizada.

Se conoce como función de transferencia, la relación existente entre las respuestas de un instante dado y los valores de la excitación en el mismo instante y en los precedentes. Para su resolución basta evaluar la respuesta del sistema, a lo largo del tiempo, y los de la propia excitación.

En los modelos de función de transferencia, el objetivo es relacionar dos o más series temporales elaborando modelos causales de predicción. Se considera que existe una serie temporal denominada respuesta (variable objetivo) relacionable como función de una u otras series temporales (excitaciones) que se denominan variables independientes. El acoplamiento entre excitación y respuesta es tal que según el caso podrían ser intercambiables. Un ejemplo: en funciones de transferencia en las que los flujos de calor se expresan en función de temperaturas se puede dar la vuelta y expresar las temperaturas en función de los flujos

Habitualmente se compara el modelo de función de transferencia con el modelo lineal general, es decir con las regresiones lineales convencionales [4]. Una de las preguntas que surgen habitualmente es ¿por qué utilizar los modelos de función de transferencia, si existe el modelo lineal general que relaciona diferentes variables? Existen diversas razones que explican la necesidad de los modelos de función de transferencia. Para ello se analizan las principales limitaciones de los modelos lineales generales:

- En el modelo lineal general, la relación suele ser instantánea y viene establecida a priori.
- La relación va de la variable $x(t)$ (input) a la variable $y(t)$ (output), pero la variable $y(t)$ no influye sobre la variable $x(t)$, y a la vez no se refleja una dependencia de la misma con respecto a sus valores pasados.
- La parte de variable respuesta no explicada por la variable independiente $x(t)$ pasa a un término constante o ruido, en el que además de no verificarse con datos dinámicos, no se refleja la dependencia del sistema con lo que ha sucedido instantes atrás.

Estas limitaciones son solventables con el uso de funciones de transferencia donde los efectos dinámicos se tienen en cuenta y los comportamientos no lineales entre excitación-respuesta.

Los modelos basados en funciones de transferencia son utilizados en todos los campos científicos para evaluar respuestas dinámicas. Si las variables "inputs" son controlables, estos modelos permiten simular y evaluar políticas alternativas. Si no lo son, ofrecen la posibilidad de estudiar cómo ciertos "escenarios", definidos por posibles evoluciones de la variable explicativa, afectan a la variable respuesta.

En edificación, el efecto de la inercia térmica se traduce en un desfase de tiempo, entre la excitación y la respuesta, y un amortiguamiento entre las ganancias instantáneas y las cargas reales sobre el equipo de climatización. Es decir, que además de un retraso los efectos dinámicos suponen un amortiguamiento. Estos retardos, en sistemas térmicos, están ligados a la inercia del sistema como se detalla a lo largo del capítulo, y por ello los modelos de caracterización que se persiguen deben ser dinámicos.

Toda sollicitación térmica real, a que se encuentre sometido un muro frontera de un edificio, puede ser descompuesta en un conjunto de sollicitaciones elementales, cuya superposición origine la inicial. De esta manera, conociendo la respuesta a una sollicitación unitaria puede generarse la de la excitación global. Este tipo de superposición es válida, en transferencia de calor a través de muros, ya que pueden considerarse inalterables sus propiedades termofísicas en el rango de temperaturas de trabajo [147].

El cálculo de funciones de transferencia a tenido en el pasado dos vías: la vía analítica de la que se destaca el método propuesta por Mitalas [148]; y la vía numérica por diferencias finitas según el esquema por ejemplo, de Cranck Nicholson [149]. En el anexo 2, "Funciones de transferencia".

3.2. MODELIZACIÓN Y REDUCCIÓN

En las siguientes líneas se sintetizan las principales ideas y directrices recogidas en la componente física del modelo, y la relación entre la base de tiempo y la dinámica requerida por el modelo (reducción). Con ese espíritu el epígrafe se centra en particularizar los parámetros referentes a sistemas térmicos en edificios, concretamente a los desarrollados en el Capítulo 3: caracterización de temperatura de aire en espacios, demanda térmica o consumo de espacios/edificios, o flujos de calor a través de cerramientos.

A continuación se describen las consideraciones básicas de la formulación propuesta en la tesis, e inmediatamente se analiza el uso convencional de las funciones de transferencia en energética edificatoria, con objeto de vincularlo a los fundamentos del trabajo doctoral.

3.2.1. MCS Consideraciones básicas

La construcción de los modelos de función de transferencia sigue las mismas etapas, descritas en el capítulo de introducción, que la construcción de los modelos univariantes de series temporales: Identificación, Estimación, Verificación y Predicción.

Asimilando las funciones de transferencia y aplicando su fundamento, el modelo resultante para la caracterización térmica inversa queda de la siguiente forma:

$$f(t) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=0}^n a_{ij} Y_i(t-j) - \sum_{k=1}^d d_k f(t-j)$$

donde:

$f(t)$ es la variable objetivo

Y_i son la variables independientes o excitacion es ($i = 1 \dots m$)

a_{ij} son los coeficient es de ajuste de cada variable Y_i

d_k son los denominadores o dependencias con de la variable objetivo con el pasado

Ecuación 3-1. Definición del modelo de caracterización simplificado

Estas variables excitadoras deben elegirse de acuerdo al sistema a caracterizar y a la influencia de las mismas sobre este. Por ejemplo, es habitual relacionar las cargas térmicas en los espacios de un edificio con las siguientes variables:

- Temperatura del aire exterior
- Radiación (puede aparecer combinada con la variable anterior en forma de temperatura sol-aire)
- Fuentes internas: ocupación, iluminación, equipos...
- Temperatura del aire interior

A modo de ejemplo se muestra una particularización del mismo para el caso de excitación en temperatura, y respuesta en flujo de un espacio (véase "Ejemplo Teórico: respuesta en flujo excitación en temperatura exterior" en el Anexo 4.1, para más detalles):

$$q(t) = \sum_{j=0}^{n_a} a_j \Delta T_{EXT}(t-j) - \sum_{j=1}^{n_d} d_j q(t-j)$$

donde:

$q(t)$ es la respuesta en carga W

ΔT_{EXT} es la diferencia entre temperatura del aire exterior e interior $^{\circ}C$

a_j d_j son los coeficientes

Ecuación 3-2. Ejemplo de particularización del MCS

En los siguientes puntos se describe de forma simplificada los parámetros generales del modelo y su vinculación con los parámetros característicos del sistema.

3.2.2. Funciones de transferencia

Los problemas de transferencia de calor en los que exista linealidad, y homogeneidad, y tengan solución conocida, pueden usarse aplicando superposición para resolver problemas más complicados. Cuando en el problema aparecen heterogeneidades del tipo de generación, o debidas a condiciones de contorno no nulas, es necesario hacer una división del problema en un conjunto de problemas que se puedan resolver por el método de separación de variables. Finalmente, el teorema de Duhamel, nos permite resolver el problema cuando aparecen dependencias temporales en la generación de calor o en las condiciones de contorno.

Dicho esto se va a proceder a desarrollar un ejemplo sencillo de una placa plana infinita en contacto con aire por cada una de sus dos superficies. Los coeficientes de transferencia convectiva asociados a ese aire son conocidos, al igual que las condiciones iniciales de la placa. El planteamiento matemático resulta:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} \quad \text{en } 0 < x < L, \quad t > 0 \\ \text{Condiciones de Contorno:} \\ -K_1 \frac{\partial T}{\partial x} + h_1 T = 0 \quad x = 0, \quad t > 0 \\ K_2 \frac{\partial T}{\partial x} + h_2 T = 0 \quad x = L, \quad t > 0 \\ \text{Condición Inicial:} \\ T = F(x) \quad t = 0, \quad 0 \leq x \leq L \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} T(x,t) = \sum_{m=1}^{\infty} e^{-\alpha \beta_m^2 t} \frac{1}{N(\beta_m)} X(\beta_m, x) \int_0^L X(\beta_m, x') F(x') dx' \\ \text{donde} \\ F(x) = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{N(\beta_m)} X(\beta_m, x) \int_0^L X(\beta_m, x') F(x') dx' \\ X(\beta_m, x) = \beta_m \cos(\beta_m x) + H_1 \text{sen}(\beta_m x) \quad \text{autovectores} \\ \beta_m \quad \text{autovalores} \\ \text{tg}(\beta_m L) = \frac{\beta_m (H_1 + H_2)}{\beta_m^2 - H_1 H_2} \end{array} \right.$$

Ecuación 3-3. Problema analítico de transferencia de calor por conducción en el cerramiento

El primer paso en la resolución de problemas que precisan del teorema de Duhamel, es el cálculo del llamado problema fundamental, definido a continuación:

El primer paso en la resolución de problemas que precisan del teorema de Duhamel, es el cálculo del llamado problema fundamental, definido a continuación:

Problema

Cara 1: $T=0$

Fundamental.

Cara 2: Función escalón unidad.

-Condiciones de contorno:

-Para las siguientes explicaciones, usaremos la respuesta correspondiente a la cara de la excitación, (q_2 en la figura)

-A la respuesta al escalón unidad la denotaremos por $U(t)$

$$(U(t)=q_2(t)).$$

-Por linealidad tenemos que al aumentar la excitación escalón, aumenta las respuestas q_1 , q_2 en la misma proporción.

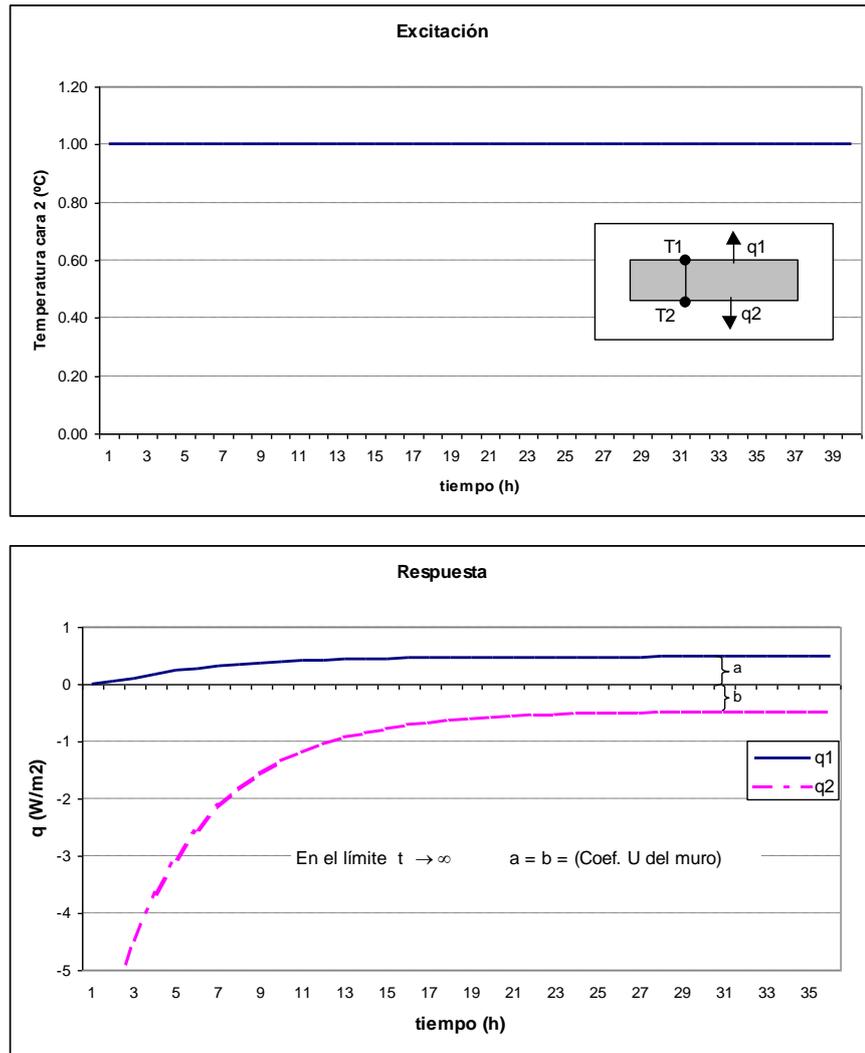


Figura 3-1. Excitación y respuesta sobre el elemento a estudio

El primer problema que se presenta es el de interpretación de los resultados. La respuesta del sistema ante una excitación viene expresada como una potencia, cuando en realidad el dato que necesitamos para el diseño es la energía introducida en el sistema. Esta energía se obtiene como la integral de la curva de potencia. En las siguientes gráficas y tablas, se comparan el valor exacto de la integral, y el resultado cuando dicha integral se hace de manera discreta con pasos de tiempo de una hora.

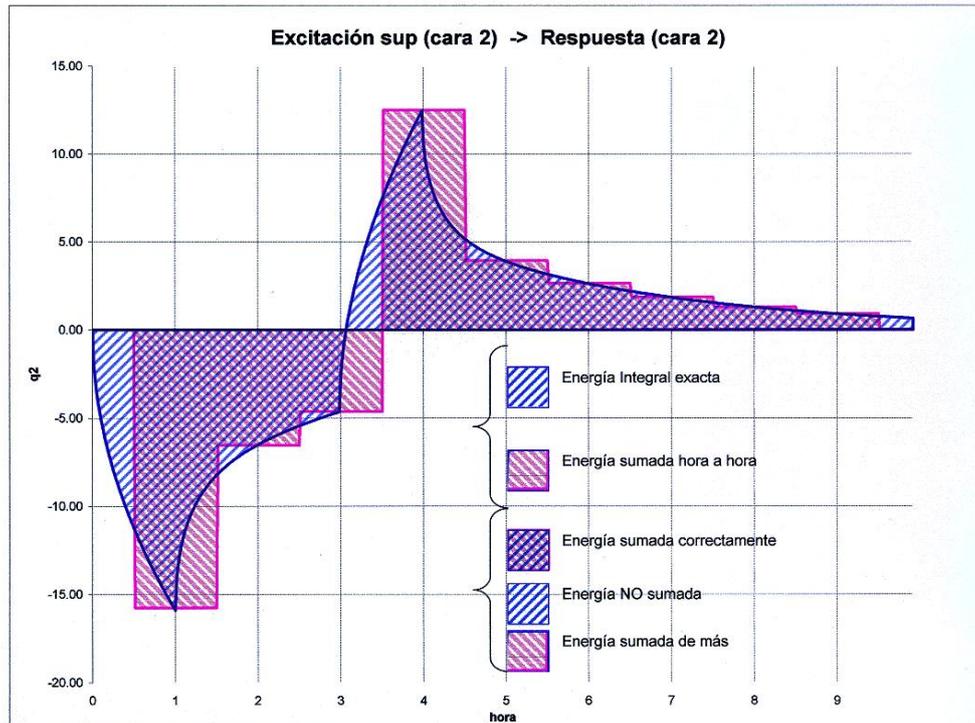
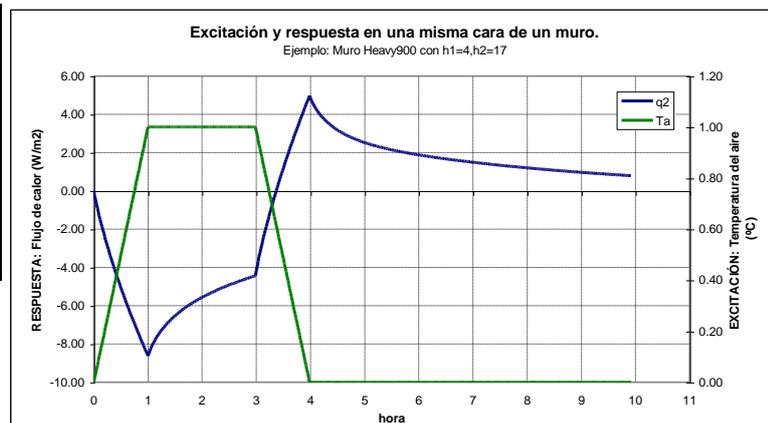


Figura 3-2. Cálculo discreto y continuo de valores integrados sobre la solución analítica.

En la tabla y gráfica siguiente aparece un ejemplo de comparación de energía integrada exactamente (solución analítica continua), y la que se obtendría tomando los valores de potencia hora a hora, para la excitación marcada en la figura como T_a , que consiste en una rampa ascendente, seguida de un escalón, y por último una rampa descendente hasta que se anula la excitación. En la tabla vemos que la energía entrante (signo negativo) al sistema es de 61.826J mientras que si se calcula con los valores horarios de potencia, el resultado es de 66.715J.

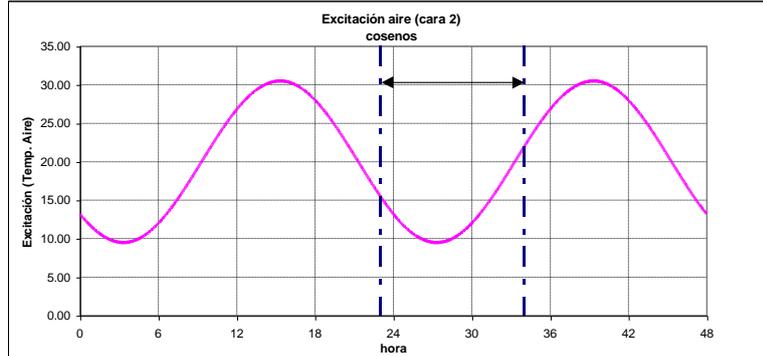
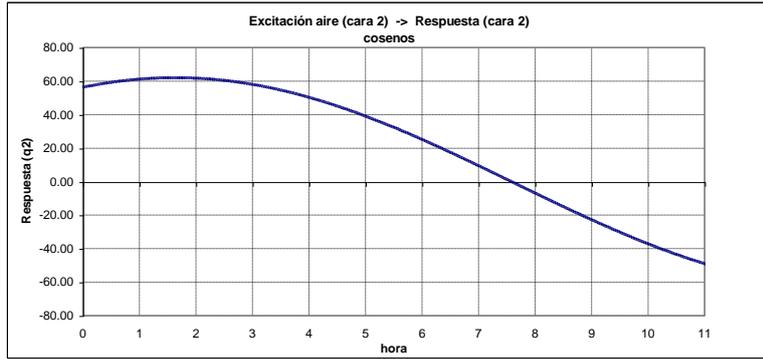
hora	Intervalo	Energ.Integ. (J)	Energ.Valor horario (J)
0	-0.5 0.5	-5146	0
1	0.5 1.5	-25734	-30646
2	1.5 2.5	-20156	-20112
3	2.5 3.5	-10464	-15957
4	3.5 4.5	12735	17919
5	4.5 5.5	9202	9130
6	5.5 6.5	6783	6793
7	6.5 7.5	5379	5396
8	7.5 8.5	4323	4338
9	8.5 9.5	3483	3495
SUMA - =		-61826	-66715
SUMA ->9h =		-19595	-19645



Los mayores errores en el cálculo de la energía se producen en los tramos de arranque y parada, en los que se tienen discontinuidades, o cambios bruscos de la excitación. Cuando la excitación es una función continua y suave como es el caso de las excitaciones exteriores, que responden a sumas de senos, el error es despreciable. Como ejemplo se puede ver la función respuesta a una excitación exterior como la descrita, y a otra interior.

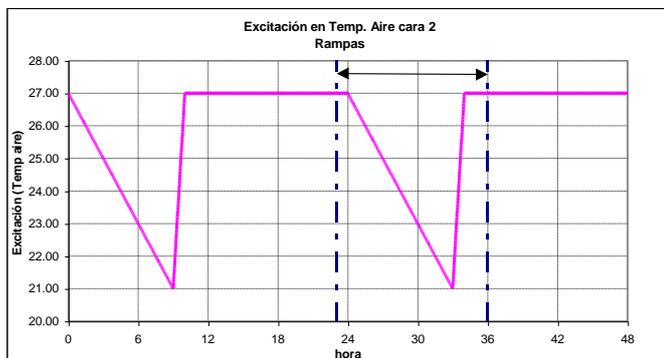
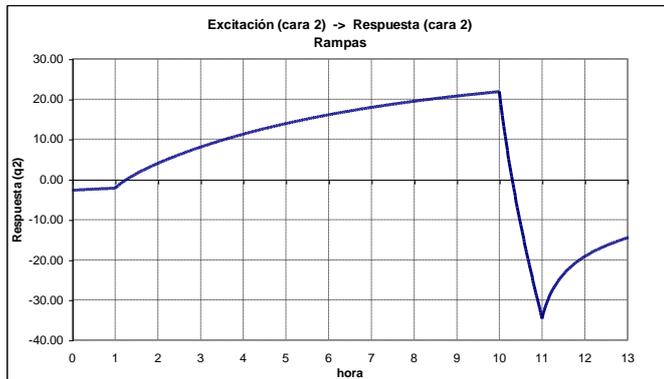
El caso expuesto a continuación demuestra que para excitaciones suaves la respuesta calculada con un paso horario (paso de tiempo típico de las herramientas de simulación detallada), tiene la suficiente calidad y de ahí que las integrales de energía coincidan en gran medida con los valores analíticos.

hora	Intervalo	Energ.Integ. (J)	Energ.Valor horario (J)
1	0.5 1.5	219,704	220,099
2	1.5 2.5	221,660	222,447
3	2.5 3.5	208,224	209,349
4	3.5 4.5	180,367	181,752
5	4.5 5.5	140,034	141,583
6	5.5 6.5	90,010	91,618
7	6.5 7.5	33,733	35,290
8	7.5 8.5	-24,938	-23,538
9	8.5 9.5	-81,984	-80,838
10	9.5 10.5	-133,504	-132,689
11	10.5 11.5	-175,973	-175,546
SUMA +=		-416,565	-412,611
SUMA ->11		680,890	689,527



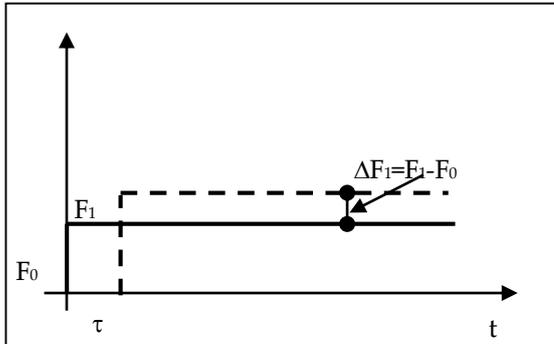
En cambio cuando la excitación no es suave, los errores que se cometen son mayores pero quedan concentrados en los puntos críticos de la excitación. En este caso la solución es reducir el paso de tiempo para mejorar la resolución del problema.

hora	Intervalo	Energ.Integ. (J)	Energ.Valor horario (J)	Energ.Valor (medias horas) (J)
1	0.5 1.5	-4,350	-7,155	-4,115
2	1.5 2.5	14,331	14,712	14,535
3	2.5 3.5	28,998	29,223	29,135
4	3.5 4.5	40,604	40,776	40,712
5	4.5 5.5	50,119	50,258	50,208
6	5.5 6.5	58,003	58,117	58,076
7	6.5 7.5	64,578	64,672	64,639
8	7.5 8.5	70,100	70,177	70,151
9	8.5 9.5	74,773	74,837	74,815
10	9.5 10.5	44,453	72,847	42,319
11	10.5 11.5	-92,790	-121,820	-92,700
SUMA +=		451,217	475,620	444,590
SUMA -> 11		348,674	346,645	347,775



3.2.2.1. Integral de Duhamel

Cualquier otra excitación podemos descomponerla en suma de escalones, de forma que por superposición obtengamos la nueva respuesta.



$$q(t) = F_0 U(t) + \Delta F_1 U(t - \tau)$$

de forma general:

$$q(t) = \sum_j \Delta F_j U(t - \tau_j)$$

Esta última expresión puede ponerse

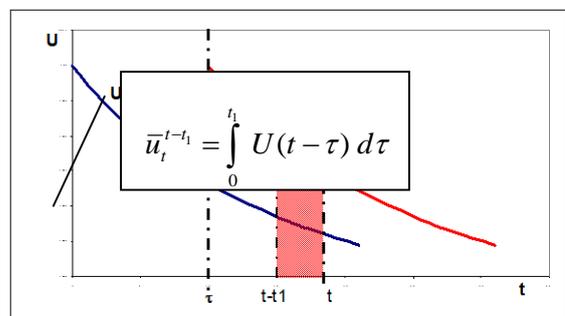
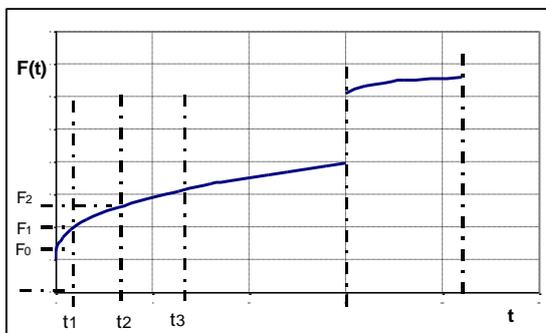
$$q(t) = \sum_j \frac{\Delta F_j}{\Delta \tau_j} U(t - \tau_j) \Delta \tau_j$$

y tomando el límite en $\Delta \tau_j$ el sumatorio se convierte en integral:

$$q(t) = \int_0^t F'(\tau) U(t - \tau) d\tau$$

Ecuación 3-1. Integral de Duhamel

Si $F(t)$ fuera una función continua y derivable, podríamos resolver la ecuación anterior para obtener la respuesta $q(t)$. En caso contrario, i.e., cuando aparezcan discontinuidades en la función excitación, siempre podremos dividirla en pequeños intervalos en los que se pueda admitir un comportamiento lineal. Esta suposición da lugar a derivadas $F'(t)$ constantes en dichos intervalos.



$$q(t) = F_0 U(t) + \int_0^{t_1} \frac{F_1 - F_0}{\Delta t} U(t - \tau) d\tau + \int_{t_1}^{t_2} \frac{F_2 - F_1}{\Delta t} U(t - \tau) d\tau + \dots$$

$$q(t) = F_0 U(t) + (F_1 - F_0) \bar{u}_t^{t-1} + (F_2 - F_1) \bar{u}_{t-1}^{t-2} + \dots + (F(t) - F_{t-1}) \bar{u}_1^0$$

$$q(t) = F_0 \underbrace{(U(t) - \bar{u}_t^{t-1})}_{w_0} + F_1 \underbrace{(\bar{u}_t^{t-1} - \bar{u}_{t-1}^{t-2})}_{w_1} + \dots + F(t) \underbrace{\bar{u}_1^0}_{w_n}$$

$$q(t) = \sum_{j=0}^n w_{n-j} F(t-j)$$

La Integral de Duhamel permite una segunda interpretación:

$$q(t) = \int_0^t F(\tau) U'(t-\tau) d\tau$$

Ecuación 3-2. Integral de Duhamel particularizada al problema

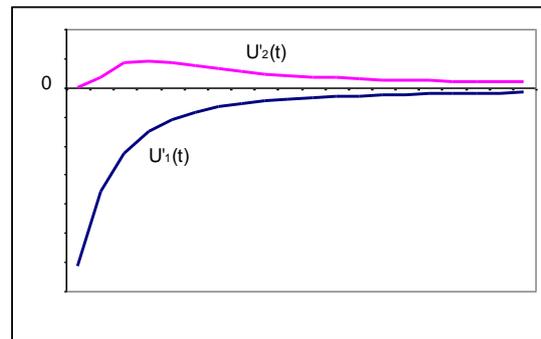
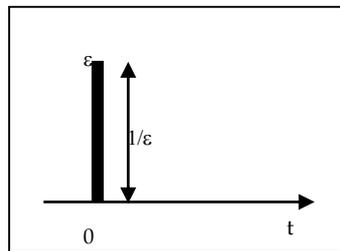
De esta forma se evitan los problemas de derivabilidad de la función excitación $F(t)$, de la que en principio no se conoce su expresión analítica.

Por otra parte $U'(t)$ es la derivada de $U(t)$, la respuesta a la función escalón unidad, y se demuestra que coincide con la respuesta a la delta de Dirac $\delta(t)$, que a su vez es la derivada de la función escalón unidad.

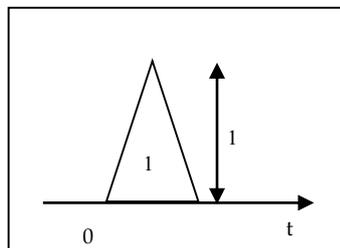
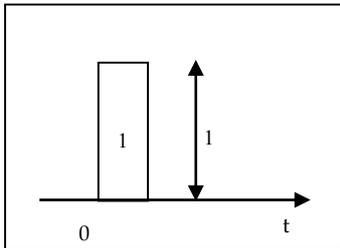
$$\delta(t) = \frac{1}{\varepsilon} \quad \text{para } 0 \leq t \leq \varepsilon$$

$$\delta(t) = 0 \quad \text{para } t < 0, \quad t > \varepsilon$$

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \int_0^{\varepsilon} \delta(t) dt = 1$$



La segunda expresión de la Integral de Duhamel, no se usa, ya que no existen soluciones analíticas para muros compuestos, cuando se excitan con un impulso o delta de Dirac. Por lo tanto, usaremos aproximaciones como son el triángulo y el rectángulo de área unidad de las que sí se conocen su solución, gracias a la transformada de Laplace, y al método de los autovalores.



La calidad de la respuesta depende de:

- Aproximación de la función excitación a partir de las sollicitaciones elementales.
- Situación de las excitaciones (En superficie o en aire).
- Paso de tiempo.

- Definición de la respuesta: energía – potencia en el instante de cálculo, potencia media en el intervalo de cálculo. (Instante de cálculo – Intervalo de cálculo).

Los problemas anteriores desaparecen cuando el paso de tiempo empleado en el cálculo es corto. Estos no se usan por varias razones:

- A veces no es necesario. Si la excitación es una función continua y suave, se puede aproximar con suficiente exactitud con pasos de tiempo largos (paso de tiempo 1 hora).
- El tiempo de cálculo aumenta al menos de manera proporcional al paso de tiempo. (Si pasamos de 1 hora a 5 minutos, el número de operaciones se multiplica por 12).
- Para un mismo grado de exactitud en la definición de la excitación, y en la respuesta, necesitamos mayor número de términos en las funciones de transferencia de muros.

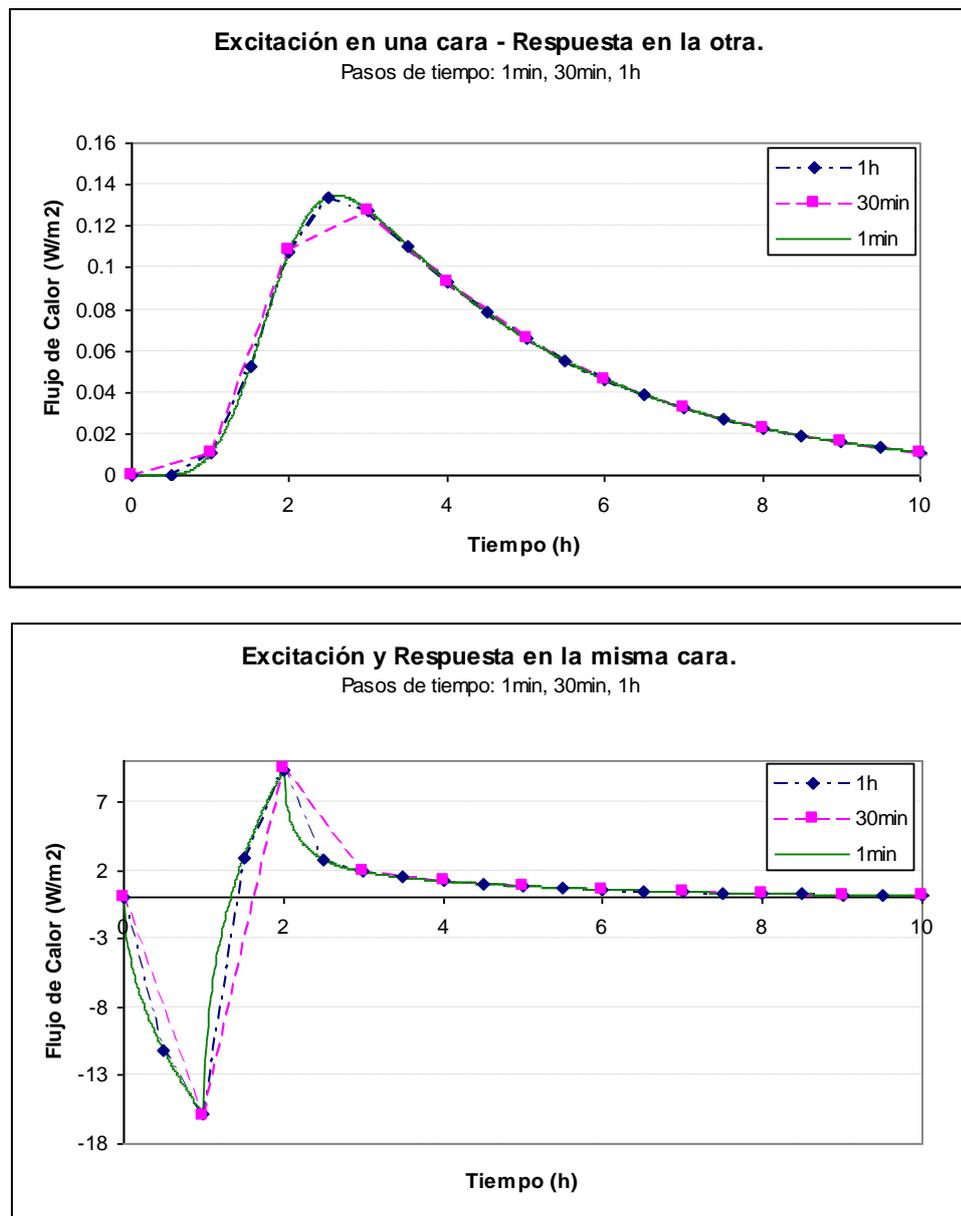


Figura 3-3. Comparación solución analítica y solución obtenida a partir de la integral de Duhamel

3.2.2.2. Paso de la serie infinita a la serie corta: funciones de Transferencia.

La integral de Duhamel se ha expresado como un sumatorio de infinitos términos, que para el caso de

conducción a través de muros, la excitación sería las temperaturas superficiales, y la respuesta el flujo de calor.

$$q(t) = \sum_{j=0}^{\infty} w_j T(t - j)$$

La respuesta del sistema puede escribirse a partir de cierto punto después de desaparecida la excitación, como suma de exponenciales de distintas constantes de tiempo.

$$q(t) = c_1 e^{-t/\tau_1} + c_2 e^{-t/\tau_2} + c_3 e^{-t/\tau_3}.$$

Este sumatorio infinito se puede reducir mediante la eliminación sucesiva de exponenciales, si tenemos en cuenta que el término i -ésimo deja de tener un peso importante en la suma total aproximadamente para $t > 3\tau_i$.

De esta forma pasamos de una serie infinita, a una serie finita en la que será necesario guardar un cierto número de la función respuesta en instantes anteriores. En esto se basan las funciones de transferencia. Usando la transformada z , esto se puede expresar como un cociente de polinomios:

$$q(z) = W(z)T(z) \quad \rightarrow \quad q(z) = \frac{N(z)}{D(z)}T(z)$$

$$w_0 + w_1 z^{-1} + w_2 z^{-2} + w_3 z^{-3} + \dots = \frac{g_0 + g_1 z^{-1} + g_2 z^{-2}}{p_0 + p_1 z^{-1} + p_2 z^{-2}}$$

Los denominadores $p_0, p_1, p_2 \dots$ se obtienen a partir de los polos o autovalores del sistema, y los numeradores $g_0, g_1, g_2 \dots$ por identificación de coeficientes de forma que cumplan la igualdad anterior.

El número de denominadores o polos que debemos usar, depende del paso de tiempo considerado.

La tabla y el gráfico siguientes son un ejemplo para un muro, al que se han calculado sus polos para instantes de tiempo entre un minuto y una hora. En la primera columna de la tabla aparecen las razones comunes (Common Ratio), es decir, los valores $e^{-\Delta t/\tau_i}$, y en las siguientes los valores que toman las constantes de tiempo τ_i cuando se particularizan para un cierto Δt . En cada intervalo de tiempo solo se tienen en cuenta las τ_i que cumplen que $\tau_i \geq 0.3 \Delta t$.

CR	τ ($\Delta t=1\text{min}$)	τ ($\Delta t=5\text{min}$)	τ ($\Delta t=15\text{min}$)	τ ($\Delta t=30\text{min}$)	τ ($\Delta t=1\text{h}$)
0.994	169.68	33.94	11.31	5.66	2.83
0.952	20.48	4.10	1.37	0.68	0.34
0.874	7.44	1.49	0.50	0.25	0.12
0.770	3.83	0.77	0.26	0.13	0.06
0.694	2.74	0.55	0.18	0.09	0.05
0.646	2.28	0.46	0.15	0.08	0.04
0.535	1.60	0.32	0.11	0.05	0.03
0.517	1.52	0.30	0.10	0.05	0.03
0.406	1.11	0.22	0.07	0.04	0.02
0.303	0.84	0.17	0.06	0.03	0.01
0.218	0.66	0.13	0.04	0.02	0.01
0.164	0.55	0.11	0.04	0.02	0.01
0.147	0.52	0.28	0.22	0.19	0.17
0.099	0.43	0.26	0.20	0.18	0.16
0.064	0.36	0.23	0.18	0.16	0.15
0.040	0.31	0.21	0.17	0.15	0.14
0.024	0.27	0.19	0.16	0.14	0.13

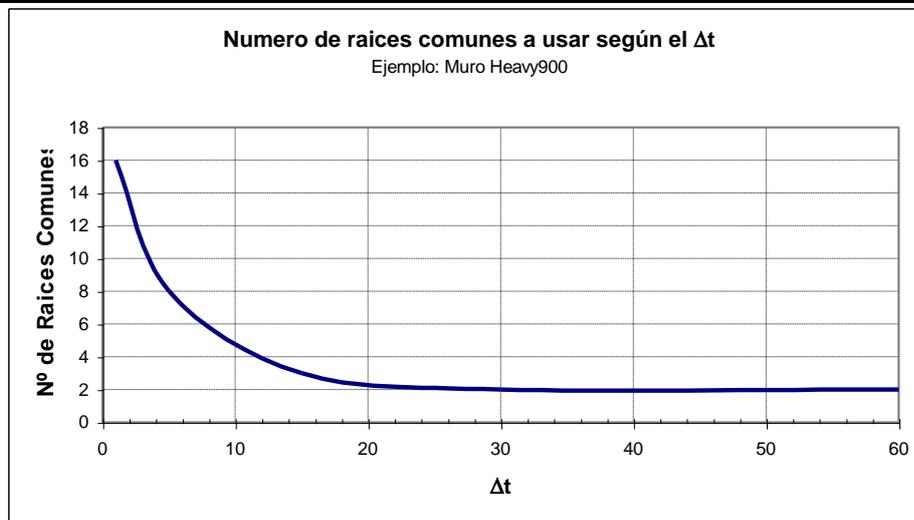


Figura 3-4. Número de razones comunes a tener en cuenta en función del paso de tiempo

Por su parte, el número de numeradores es superior al de denominadores, ya que al extraer un denominador, se ha eliminado la exponencial correspondiente. Esto último también puede deducirse del proceso de obtención de los numeradores, que como ya se ha explicado anteriormente se basa en la identificación de coeficientes con la serie infinita.

$$N(j) = \sum_{i=0}^j X(i) D(j-i)$$

donde $N(j)$ son los numeradores

$D(j)$ son los denominadores

$X(j)$ son los coeficientes de la serie infinita

Al procedimiento anterior de cálculo de los numeradores, se le han añadido dos condiciones:

- a partir de un cierto momento a identificar, los numeradores deben ser del mismo signo y decrecer monótonamente.
- debe cumplirse la condición de permanente.

En conclusión, las funciones de transferencia son una formulación reducida dependiente del paso de tiempo elegido. Además esta formulación depende de dos tipos de parámetros: numeradores y

denominadores. Los primeros están vinculados con la componente de la respuesta del sistema asociada a la excitación (variables independientes) a la que hacen referencia, y condicionan el régimen permanente del mismo. En cambio los denominadores son los coeficientes que crean la dependencia de la variable correlada con la misma variable pero en instantes anteriores, y están vinculados a la inercia del sistema.

3.2.3. Parámetros dinámicos

Los parámetros dinámicos están ligados a los denominadores del modelo, y hacen referencia al efecto de la inercia del sistema a caracterizar. Estos parámetros permanecen constantes para el modelo asumiendo la invarianza del mismo. Los parámetros dinámicos característicos del sistema son las constantes de tiempo.

Las constantes de tiempo son una característica del sistema a análisis, el cuál probablemente sea una agrupación de sistemas térmicos. La constante de tiempo es el tiempo necesario para que, un capacitor (condensador, desde el punto de vista de sistemas eléctricos), que parte desde un estado de equilibrio y es excitado con un escalón en voltaje continuo, se cargue a un 63.2 % de la carga total (máximo voltaje al que se ve excitado).

Las constantes de tiempo asociadas al sistema aparecen de forma indirecta en el modelo a través de los denominadores. A lo largo de este punto se justifica la importancia de estos tiempos característicos asociados al sistema, de cara a la identificación del modelo de caracterización.

En física y en ingeniería, la constante de tiempo es el parámetro que caracteriza la respuesta a una entrada de paso de primer orden, el sistema invariante en el tiempo lineal. La constante de tiempo es la unidad principal característica de un sistema LTI de primer orden. En un sistema de mayor orden, por lo general, aparecen infinitas constantes de tiempo, de las que se distinguirán las principales (las de mayor magnitud). Por tanto cada constante de tiempo representa el tiempo que tarda la respuesta asociada a esa frecuencia en alcanzar su valor final.

Es habitual que la respuesta del sistema pueda modelarse como la suma de funciones exponenciales, donde una de ellas sea la dominante. Son estos casos los que se están usando para poner de manifiesto las implicaciones de la constante de tiempo en el modelo.

Por ejemplo, en procesos químicos de desintegración radiactiva de la constante de tiempo se denomina la constante de desintegración, y que representa tanto el tiempo de vida medio de un sistema de descomposición antes de que se descompona, o el tiempo que toma para todos, pero 36,8% de los átomos en descomponerse. Por esta razón, la constante de tiempo es más larga que la vida media, que es el tiempo para sólo el 50% de los átomos en descomponerse.

Volviendo a la analogía eléctrica por las facilidades de comprensión que presenta para estas semejanzas; existen parámetros que permiten definir el tiempo de carga o descarga de un condensador conectado a una fuente continua mediante una resistencia. A este parámetro se le denomina constante de tiempo. Se tiene entonces, que con un tiempo τ , un condensador se carga o descarga un porcentaje del 63%, sobre su total. Aparte con 5τ se considera, que bajo unas excitaciones constantes, se completa la carga o descarga del mismo, es decir, se alcanzan las condiciones estacionarias. [7].

Cabe destacar que las constantes de tiempo del sistema aparecen en reflejadas en la repuesta del sistema en forma del amortiguamiento y desfase de la misma con respecto a las excitaciones activas.

En el modelo de caracterización simplificado MCS la elección del número de constantes de tiempo significativas en función del paso de tiempo elegido juega un papel importante, ya que supone caracterizar con suficiente calidad los efectos dinámicos del sistema.

3.2.4. Parámetros cuasiestáticos

Los parámetros cuasiestáticos aparecen como una relación entre ciertos numeradores y los denominadores del modelo. Su naturaleza cuasiestática está justificada por estar referidos a variables independientes generadas a partir de la concentración de excitaciones variables en el tiempo. Es decir la variable independiente incorporada al modelo es una función de las excitaciones reales que sufre el sistema, y los coeficientes de esta función varían en el tiempo. El parámetro cuasiestático vinculado al rango de aplicabilidad de la modelización validada en esta tesis es el área solar sur equivalente. Este parámetro es el elegido como el de mayor sensibilidad frente a la hipótesis de invarianza del modelo.

La radiación solar incide sobre la epidermis del edificio y es absorbida, y además penetra en el mismo a través de los elementos semitransparentes existentes en él. Debido a las características típicas de la epidermis y al paso de tiempo elegido, el flujo de calor que es absorbido por la epidermis y cedido al aire interior es mucho menor que el captada por los elementos semitransparentes, por lo que las ganancias solares se deben principalmente a la radiación que se transmite al interior del edificio a través de los vidrios.

Para modelar las ganancias solares Q_S se hace uso del área solar sur equivalente $ASSE$, y de la radiación integrada sur incidente efectiva I_s . Resultando:

$$Q_S = ASSE \cdot I_s$$

Ecuación 3-3. Formulación de ganancias solares a partir de área solar sur equivalente

Puesto que para calcular las ganancias solares se usa la radiación solar incidente en una sola orientación, en este caso la orientación sur, hay que obtener la cantidad de metros cuadrados captadores referidos a la orientación sur "ASSE" [150]. La relación entre un metro cuadrado situado en la orientación i y el sur es variable con el tiempo debido al movimiento solar. Es por ello que este parámetro es variable con el tiempo. Lo que ocurre es que la frecuencia de cambio es bastante baja comparada con la frecuencia que presenta el sistema térmico a caracterizar, por lo que se puede hacer la hipótesis de ser un parámetro cuasiestático.

A modo de ejemplo, tomando un modelo de caracterización simplificado el flujo de calor Q_E a través de un cerramiento opaco como función de la temperatura convectivo-radiante exterior T_E , la temperatura promedio de la superficie interior T_1 y la radiación global sur incidente RAD_G , resulta:

$$Q_E(t) = \sum_{i=0}^2 a_{i-Q} \cdot T_E(t-i) + \sum_{i=0}^2 b_{i-Q} \cdot RAD_G(t-i) + \sum_{i=0}^2 c_{i-Q} \cdot T_1(t-i) + \sum_{i=1}^2 d_{i-Q} \cdot Q_E(t-i) + CTE$$

Y por consiguiente el valor del área solar sur equivalente [m²] vendría definido como:

$$ASSE = \frac{b_{0-Q} + b_{1-Q} + b_{2-Q}}{1 - d_{1-Q} \cdot d_{2-Q}}$$

Este tipo de relaciones entre los coeficientes del modelo son las que aportan toda la esencia física al mismo, lo que permite la extrapolación con seguridad para excitaciones diferentes a las usadas en la identificación.

3.2.5. Parámetros estáticos

Los parámetros estáticos son aquellos, que aunque variantes con el tiempo, se pueden suponer constantes ya que el error cometido con esta hipótesis entra dentro del rango de incertidumbre permitido.

Los parámetros estáticos referidos son:

- La transmitancia global necesaria para el cálculo de los intercambios energéticos a través de la epidermis del edificio por conducción.
- Las renovaciones hora equivalentes para cuantificar la cantidad de energía intercambiada

con el ambiente a través de los caudales de aire que entran/salen del edificio.

- Fuentes internas como la densidad de calor entrega al aire interior por la ocupación, iluminación y/o equipos existentes en el edificio.

Véase el epígrafe “4.3 Modelización” para más detalles.

Si de nuevo se vincula al ejemplo anterior, solo se necesitan tener en cuenta los coeficientes ligados a la excitación del aire exterior:

$$Q_E(t) = \sum_{i=0}^2 a_{i-Q} \cdot T_E(t-i) + \sum_{i=0}^2 b_{i-Q} \cdot \text{RAD}_G(t-i) + \sum_{i=0}^2 c_{i-Q} \cdot T_I(t-i) + \sum_{i=1}^2 d_{i-Q} \cdot Q_E(t-i) + CTE$$

Por tanto el parámetro estático vinculado a transmisión e infiltraciones [W/K] queda:

$$[\rho C_p \cdot n \cdot V + UA] = \frac{a_{0-Q} + a_{1-Q} + a_{2-Q}}{1 - d_{1-Q} - d_{2-Q}}$$

Y a su vez el parámetro φ [W] que hace referencia a las fuentes internas resulta:

$$[\varphi] = \frac{CTE}{1 - d_{1-Q} - d_{2-Q}}$$

3.2.6. Subdivisión del dominio Temporal

De cara a un análisis de datos experimentales óptimo, el experimento debe captar los efectos dinámicos del sistema físico, de ahí la importancia de conocer bien las partes o respuestas posibles del sistema. En la mayoría de los casos la respuesta obtenida tiene varias constantes de tiempo significativas y a su vez ligadas a sus características radiantes, masa térmica, efecto del viento, de la convección interior... A este hecho se le liga la importancia de elegir bien el paso de tiempo. Algunos autores estiman que se requiere un paso de tiempo 5 veces inferior a la constante de tiempo más pequeña considerada a análisis, es decir, que un sistema de primer orden alcance un 99% de su respuesta en régimen permanente [5], [7], [15], [24].

Ahora bien la temática con mayor aplicabilidad en este problema es la “Teoría del muestreo” fundamentada en el teorema de Nyquist-Shannon. Este teorema fue formulado en forma de conjetura por primera vez por Harry Nyquist en 1928 (“Certain topics in telegraph transmission theory”), y fue demostrado formalmente por Claude E. Shannon en 1949 (“Communication in the presence of noise”). De su análisis y anotando que el objetivo del modelo es identificar un sistema térmico a partir de la monitorización de sus variables, se admite que existe una semejanza suficiente entre dicho problema y la finalidad primera del teorema. A continuación se resume el teorema en dos breves puntos:

- El paso de tiempo más pequeño recomendado para que el modelo asegure una cierta calidad en la captura de los efectos dinámicos y transitorios, será aquel con una magnitud mayor o igual a la mitad de la constante de tiempo i -ésima en la que se realiza el corte de la serie infinita. Lo que de forma recíproca implica, que se requiere un número de constantes de tiempo tal, que la más pequeña tenga una magnitud menor o igual al doble del paso de tiempo seleccionado.
- Todas las variables medidas del sistema, y en este caso entradas al proceso de identificación, se modificarían desde el paso de tiempo de medición al paso de tiempo del modelo, puesto que estos no tienen por qué coincidir. Esto último posibilita, la afirmación de que el paso de tiempo del modelo puede ser superior al establecido por el teorema de Nyquist con facilidad y sin pérdida de calidad, sabiendo que la comparación entre modelo y realidad se haría en ese paso de tiempo.

Notése que aunque el segundo guión es una recomendación, el hecho de incorporar más constantes de tiempo significativas supone un mayor número de denominadores desconocidos “a priori”. Esto hace que aumente el número de grados de libertad del modelo y que pueda haber dificultades matemáticas en el proceso de identificación.

Por consiguiente, aparece una nueva dificultad en el proceso de identificación: calcular las constantes de tiempo del sistema y la incertidumbre permitida en las mismas (calculadas y despreciadas).

Sin embargo, una estimación de las constantes de tiempo teórico o vía simulación, es válida para el objetivo del proyecto manteniendo las exigencias del mismo, siempre y cuando el paso de tiempo elegido asegure ser inferior a la mitad de la última constante de tiempo significativo, y varias veces inferior a la constante de tiempo principal del sistema.

Como cierre de este punto aparece una primera conclusión: existe una relación directa entre el paso de tiempo, el número de constantes de tiempo significativas y número de denominadores a tener en cuenta. Todo dependerá a su vez del juego de excitaciones-respuesta (aplicabilidad) medible. En el trabajo de [149] se muestra como en un muro homogéneo el efecto de las exponenciales asociadas a sus polos se ven atenuadas a medida que avanza el tiempo.

Del análisis de los problemas típicos de conducción [151], bien con una resolución analítica o usando la integral de Duhamel se concluyen las directrices que a continuación se plantean. Estas directrices dan una solución de compromiso a la reducción del modelo como función del paso del tiempo elegido y los parámetros dinámicos del sistema.

Sea un muro homogéneo expuesto a dos convecciones diferentes por cada cara. Su temperatura puede calcularse a través de la expresión [151] para una placa homogénea de espesor conocido y excitada por dos convecciones constantes y diferentes en cada una de sus caras:

$$T(x, t) = \sum_{i=1}^{\infty} \exp\left(\frac{-t}{\tau_i}\right) \cdot función(x)$$

Ecuación 3-4. Solución analítica simplificada

Y sus constantes de tiempo toman los siguientes valores:

Tau1	5.36 h	Tau5	2.5 min
Tau2	30 min	Tau6	2 min
Tau3	10 min	Tau7	1 min
Tau4	4 min	Tau8	0.5 min

Tabla 3-1. Composición y capas del muro

En la siguiente imagen se puede ver en ordenadas el cociente del elemento del sumatorio anterior asociado a cada constante de tiempo con respecto al sumatorio total o respuesta del Sistema. En abscisas el tiempo transcurrido desde el estado inicial cuando arranca el escalón al que se ve excitado el muro se puede ver como en la primera hora, la respuesta del Sistema es prácticamente la suma de la respuesta asociada a la primera y segunda constantes de tiempo.

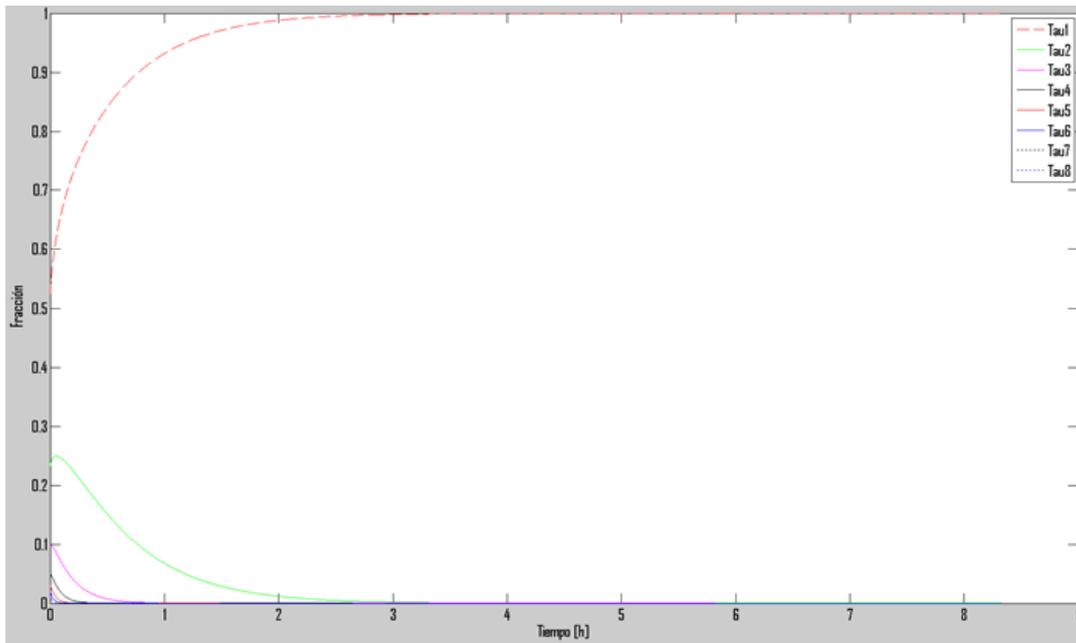


Figura 3-1. Fracción respecto a la respuesta total del sistema de cada constante de tiempo

Por consiguiente estos estudios analíticos realizados, junto con la revisión de la literatura realizada permiten establecer la primera directriz a la metodología para obtener modelos simplificados:

$$\Delta t > 3.5 \cdot \tau_n$$

Ecuación 3-5. Directriz 1: constante enésima a tener en cuenta

Esta inecuación se puede entender: elegido el paso de tiempo, se deben de estimar las constantes de tiempo del sistema para saber cuál es el número de ellas a tener en cuenta (significativas) y su orden de magnitud. Es por ello, que para el modelo simplificado tenga la posibilidad de caracterizar los efectos dinámicos se debe de tener en cuenta la constante de tiempo inmediatamente más pequeña al paso de tiempo elegido, siempre y cuando su efecto no sea despreciable. No obstante la estimación de las constantes de tiempo tiene bastante incertidumbre. Es por ello que se recomienda probar dos formulaciones para el modelo: una en la que se cumpla la directriz 1 y otra en la que se relaje hasta el extremo la misma:

$$\Delta t > 3.5 \cdot \tau_n \quad \tau_n < \Delta t$$

A su vez, si el paso de tiempo es superior a cinco veces la constante de tiempo principal del sistema, el modelo simplificado no vería los efectos dinámicos y por ello convendría que no aparecieran en su formulación.

$$\Delta t > 5 \cdot \tau_1$$

Ecuación 3-6. Directriz 2: modelo simplificado en condiciones cuasi-estacionarias.

La última directriz es de comprobación: una vez cortada la serie infinita en sus ene constantes de tiempo primeras, se comprueba que para la siguiente constante de tiempo se verifica la siguiente expresión (también sería válido 3.5 veces dependiendo de la calidad de datos medidos tal y como se ha dicho antes). De esta forma se tienen garantías de que el procedimiento tiene en cuenta los efectos dinámicos con sus máximas posibilidades, y también se comprueba que no sobra ninguna.

$$5 \cdot \tau_{n+1} < \Delta t$$

Ecuación 3-7. Directriz 3: modelo simplificado en condiciones cuasi-estacionarias.

Aparece una nueva dificultad en el proceso de identificación: calcular las constantes de tiempo del

sistema y la incertidumbre permitida en las mismas (calculadas y despreciadas).

Un cálculo de constantes de tiempo teórico o vía simulación, puede ser bastante válido, puesto que el modelo mantiene su calidad de ajuste en un rango de constantes de tiempo. De esta forma se establecen las cotas a las restricciones de la identificación y se realiza la reducción del mismo.

3.3. MODELO DE CARACTERIZACIÓN SIMPLIFICADO

En este epígrafe se describen tres particularizaciones de la formulación definida en los apartados anteriores. El primero es el “Modelo Q-T” que responde a la componente de la caracterización de la transferencia de calor en elementos o cargas térmicas en espacios; y el segundo el “Modelo integrado de consumo” que busca la caracterización en el mayor paso de tiempo posible del consumo energético de edificios. La diferencia entre el modelo antes presentado, y este segundo, es que este combina una parte determinista (física) con una parte estocástica o estadística, es decir, que el segundo modelo es una combinación de dos modelos. Y por último, el uso de una base temporal mayor, bien mensual o estacional. En esta última los efectos de la inercia están bastante atenuados y los parámetros del modelo aparecen de manera explícita vinculados con las características térmicas del edificio.

3.3.1. Modelo Q – T

El modelo Q-T es un modelo compuesto por una función de transferencia para caracterizar el flujo de energía y otra función de transferencia para caracterizar la evolución de la temperatura interior. Esta dualidad entre el flujo o la carga térmica y las temperaturas es un tema bastante estudiado por los desarrolladores de herramientas de simulación del comportamiento energético de edificios. Entre las publicaciones destacan [148], [152] donde se analiza como la función de transferencia asociada a un muro queda vinculada a las temperaturas superficiales del mismo. Un desarrollo análogo se ha hecho en el anexo 3 “Funciones de transferencia”.

En un espacio la energía que el sistema de climatización sustrae o suma al aire interior para mantener unas ciertas condiciones, depende de las excitaciones climáticas y de las condiciones interiores principalmente. En una primera aproximación, el modelo de caracterización de esa energía puede ser función de la temperatura del aire exterior, la radiación incidente y la temperatura interior. Esta aproximación suele ser la más usada, como se muestra en el siguiente capítulo, ya que representan el mínimo de variables a medir en cualquier edificio para realizar el propio control del mismo. El sistema de climatización en la mayoría de las ocasiones trabaja comandado por las señales de control ligadas a la diferencia entre la temperatura del aire interior que mide y la consigna establecida. A su vez la temperatura interior del aire evoluciona en función de las condiciones climáticas, de las fuentes internas y de la energía intercambiada con el equipo de climatización. Esta dualidad entre la demanda de energía y la temperatura del aire interior, la relación entre ambas respuestas, es el fundamento del “Modelo Q-T”. Otro ejemplo es la temperatura superficial del muro y el flujo de calor que atraviesa por conducción el muro (véase el anexo 3 – funciones de transferencia).

El “Modelo Q-T” no es más que la combinación entre dos variables respuesta, es decir de dos funciones de transferencia: una asociada al flujo de calor y otra a la temperatura resultante en el elemento objetivo. En el ejemplo anterior el flujo de calor sería la energía intercambiada por el equipo de climatización y la temperatura respuesta la temperatura del aire interior. En el caso de un muro o elemento opaco, el flujo de calor sería el flujo intercambiado por el muro y el aire en contacto con él por la superficie interior (superficie del espacio), y la temperatura sería la temperatura promedio de la superficie interior.

Sin embargo la dificultad del modelo Q-T es que cada una de las dos funciones de transferencia que lo componen depende entre sí, es decir, para calcular el flujo de calor necesito conocer la temperatura y la evolución de temperaturas depende del flujo de calor intercambiado. Y a este hecho se une a que la respuesta del sistema de climatización está muy influenciada con el arranque del mismo, es decir,

con la temperatura interior del periodo de parada nocturno, fin de semana o festivo.

En conclusión, puesto que uno de los productos con mayor potencial es un modelo para caracterizar la cantidad de energía añadida o sustraída por el sistema de climatización al aire del espacio, se requiere conocer la temperatura interior como dato. Si esta variable se toma como dato no se requiere anidar un modelo para la evolución de la temperatura interior, ya que se tomaría como “input” obligado para ejecutar el modelo de energía.

Sin embargo, se ha hecho la hipótesis de invarianza en el modelo y existen multitud de excitaciones difícilmente medibles que no se tienen en cuenta en el modelo de flujo de calor, por ejemplo, las variaciones de las fuentes internas. Estos efectos están implícitos en la evolución de la temperatura interior, incluso los efectos de la inercia en los periodos de parada. Esto significa que si el edificio es reformado, la evolución de su temperatura interior cuando el sistema de climatización opera si puede ser un input para el cálculo de la energía a partir del modelo caracterizado por considerarse unas condiciones termohigrométricas comparables con las que hubiera habido en el edificio no reformado. Pero la evolución de temperatura cuando el equipo no funciona del edificio reformado y del edificio no reformado, pueden ser dos temperaturas diferentes ya que el edificio reformado es como si fuera “otro” edificio.

La solución a este inconveniente es caracterizar la evolución de temperaturas interior cuando el sistema de climatización no opera en el edificio no reformado, es decir, es la situación energética de partida del edificio antes de su mejora/modificación. Este modelo queda anidado al modelo de energía, de tal forma que, fijado el horario de operación y conociendo la temperatura interior del edificio durante el periodo en el que el equipo opera, se pueda estimar cuál hubiera sido la temperatura del edificio no reformado en evolución libre. Esta combinación Q-T es lo que se ha denotado como moelo anidado Q-T.

Este modelo de temperatura interior permite conocer la evolución de temperaturas en los periodos de no operación del sistema de climatización, es decir, permite conocer la respuesta del edificio de referencia ante las excitaciones climáticas y fuentes internas.

En las aplicaciones 1 y 2 del capítulo 3 se desarrolla en más detalle el Modelo Q-T aplicado a dos prototipos experimentales. Es de estas aplicaciones de las que se extrae la información que aparece a continuación. En ella se muestra el tratamiento que el MCS hace entre la energía HVAC aportada o absorbida del aire interior y la propia respuesta de este aire en forma de temperatura. Este tratamiento se descompone en dos, en función de la calidad de datos experimentales y de la base temporal del modelo:

Opción 1 – Modelado Explícito de la Energía HVAC (véase aplicación 3)

Para entender la filosofía de modelización seguida para elaborar el “Modelo Q-T”, se hace la reflexión que muestra la siguiente figura:

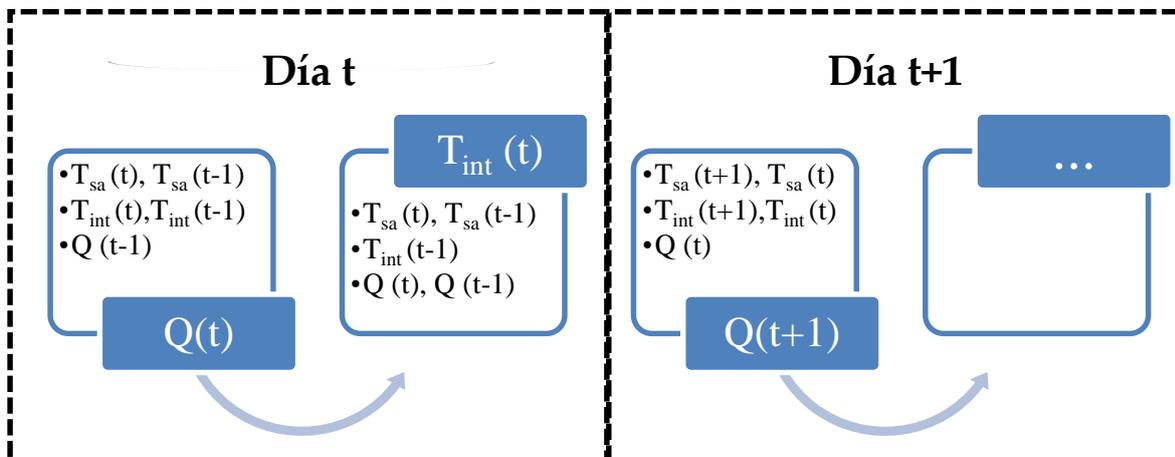


Figura 3-2. Esquema general del modelo anidado Q-T.

Sea un edificio del que se conoce la cantidad de calor extraída hora a hora durante el periodo de

funcionamiento diario. Además se conoce la temperatura exterior, la radiación global horizontal y una medición representativa de la temperatura interior. El objetivo del MCS es caracterizar la cantidad de energía frigorífica producida por el sistema de climatización cada día. El horario de operación es de 12h cada día de lunes a viernes, permaneciendo sin operación el sábado y domingo. En este caso el paso de tiempo elegido es de 12h ($t=12h$), siendo un día la composición entre un periodo de funcionamiento y un periodo de parada.

El modelo genérico para la predicción de la demanda de climatización de un edificio queda definido como sigue:

$$Q(d) = a_0 \cdot T_{sa}(d) + a_1 \cdot T_{sa}(d-1) + b_0 \cdot T_{int}(d) + b_1 \cdot T_{int}(d-1) + d_1 \cdot Q(d-1)$$

$$T_{iNO}(d) = a_0'' \cdot T_{sa}(d) + a_1'' \cdot T_{sa}(d-1) + d_1 \cdot T_{iNO}(d-1) + b_1'' \cdot Q(d-1)$$

Donde:

- $Q(t)$ [kWh] es la demanda total diaria de refrigeración o calefacción del sistema, calculada como la integral (suma) a lo largo del periodo de operación diario.
- $T_{iNO}(t)$ [°C] es la temperatura promedio diaria interior en los días en que el equipo no opera.
- T_{sa} [°C] es la temperatura promedio diaria sol-aire.
- T_{int} [°C] es la temperatura promedio interior medida
- Los coeficientes a y b son los numeradores de cada correlación.
- Los coeficientes d son los denominadores de cada correlación.
- La variable d denota el tiempo en número de periodos de 12h.

La particularización del modelo en la base de tiempo diaria limita el número de denominadores y numeradores, y con ellos el número de instantes anteriores a tener en cuenta. Esto es así porque se ha despreciado el efecto de la segunda constante de tiempo significativa del edificio.

En esta opción la variable objetivo es la demanda térmica sobre el sistema HVAC, por ello la temperatura interior es una variable independiente del mismo. No obstante para la explotación predictiva del modelo se requiere conocer la evolución libre del edificio en los periodos de no operación del sistema. Esto último justifica el modelo de temperatura interior.

Es importante destacar como el valor del denominador del modelo de energía debe coincidir con el de temperatura interior al estar referidos al mismo sistema, y siendo variables respuesta intercambiables. Más aún si se hace la hipótesis de invarianza en el resto de parámetros energéticos implícitos en la modelización.

Si en lugar de la energía la variable objetivo fuera el confort interior representado por la temperatura interior, el tratamiento sería análogo pero cambiando los papeles de las variables Q y T_{INT} .

Opción 2 – Modelado Implícito de la Energía HVAC (véase aplicación 1)

Otra posibilidad es usar la filosofía de los métodos indirectos de cálculo de cargas térmicas fundamentada en los “*Weighting factors* (or room response factors)”, se obtiene:

$$E_{HVAC}(d) = a_{d10} \cdot \Delta T_{INT}(d) + a_{d11} \cdot \Delta T_{INT}(d-1) + d_{d10} \cdot E_{HVAC}(d-1) + CTE_{d10}$$

$$\overline{T}_{INT-F}(d) = a_{d00} \cdot \overline{T}_{EXT}(d) + a_{d01} \cdot \overline{T}_{EXT}(d-1) + b_{d00} \cdot RAD(d) + b_{d01} \cdot RAD(d-1) + d_{d10} \cdot \overline{T}_{INT-F}(d-1) + CTE_{d00}$$

Dónde las variables quedan referidas al día d :

$\Delta T_{INT}(d)$ [°C] es la diferencia entre el promedio diario de temperatura interior estimada por el

modelo en evolución libre y la temperatura real interior promedio que se ha mantenido durante el periodo de operación

$E_{HVAC}(d)$ [kWh] es la energía absorbida del aire por el equipo

$\overline{T_{INT-F}}(d)$ [°C] es temperatura promedio interior en evolución libre

$\overline{T_{EXT}}(d)$ [°C] es temperatura promedio exterior

$RAD(d)$ [kWh] integral de la radiación global horizontal incidente durante el periodo d

CTE_{d00} [°C] es el efecto de las ganancias internas, principalmente.

Al igual que en el caso anterior el denominador permanece constante en ambas correlaciones. Algo idéntico para el término constante pero teniendo en cuenta la naturaleza de este término en cada correlación: en un caso la constante está referida a energía y en el otro a la variación de temperatura interior.

La temperatura promedio interior en evolución libre representa la situación de partida del edificio, es decir, representa la respuesta del edificio ante las excitaciones climáticas, sin la operación del sistema de climatización o sin la implantación de ninguna medida de mejora de la eficiencia energética del mismo.

3.3.2. Modelo integrado de consumo

En este segundo producto el MCS aparece en un entorno destinado a la caracterización de consumos térmicos o eléctricos. El objetivo es obtener un modelo que permita obtener un baseline de la situación de referencia para verificar ahorros o un modelo capaz de aprender del pasado para servir de herramienta de predicción de consumos.

La filosofía deducida admite que en estos consumos $y(t)$ puede existir una parte debida a excitaciones medibles $u(t)$ (Componente Determinista), y otra no medible $v(t)$ (Componente Estocástica). (Ref.: J. McLellan-Fall 2005)

La siguiente imagen describe las implicaciones que tiene la fase anterior en la caracterización del consumo energético de un sistema, siendo deseable que la componente dominante del modelo sea la determinista (en la figura inferior denotada por sistema).

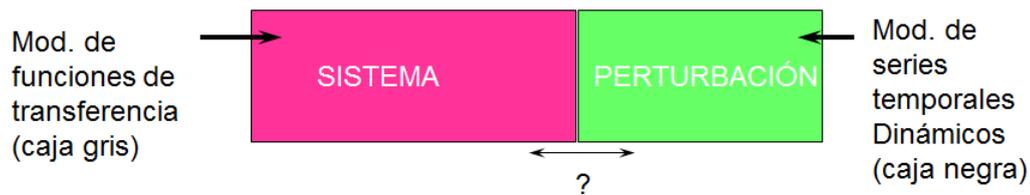


Figura 3-3. Visión general de los componentes del consumo.

La componente determinista debe ser dominante en la variable objetivo, ya que encerrará toda la esencia física y cierta del sistema a caracterizar. Es por esto que la parte estocástica, la perturbación, debe limitarse, es decir, debe caracterizarse el control y autoaprendizaje del modelo con el tiempo. Ambas partes son los parámetros clave para acotar la validez y aplicabilidad del modelo.

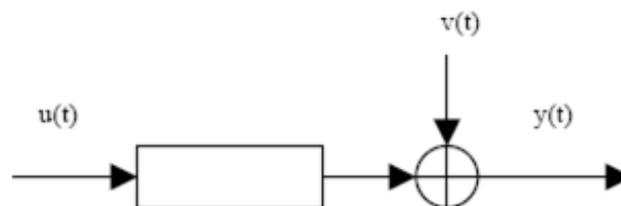


Figura 3-4. Diagrama de bloques del modelo integrado de consumo

Donde:

- $U(t)$ excitaciones medibles con incertidumbre
- $V(t)$ perturbaciones: invarianza, excitaciones no medibles, sucesos no explicables...
- $Y(t)$ variable objetivo medible

Ahora bien, no todos los consumos responden a una realidad física caracterizable, sino que en muchos casos son implicaciones del comportamiento humano, como el consumo de ascensores del edificio, o de fuerza. Pero en el caso del consumo de climatización, en edificios terciarios controlados de forma centralizada, sí depende principalmente de las condiciones climáticas y las fuentes internas. Es decir el consumo de climatización si suele estar ligado a las cargas térmicas del edificio. Es por este motivo, y en el contexto en el que la tesis se sitúa, que el objetivo del model integrado es caracterizar mediante la componente determinista la parte física del consumo de climatización (información vinculada a las cargas térmicas del edificio), y con la componente estocástica el resto del consumo no explicable por la componente física caracterizada.

Dicho esto, se comienza por desarrollar los fundamentos matemáticos de la modelización del consumo de climatización.

3.3.2.1. Consumo de climatización

La formulación básica quedaría:

$$C_{EST-CLIMA}(t) = P_{CLIMA}(t) + D_{CLIMA}(t)$$

Ecuación 3-8. Modelo para el consumo de climatización.

Donde:

- $C_{EST-CLIMA}(t)$ es la estimación en el instante t para el consumo de climatización
- $P_{CLIMA}(t)$ es el valor calculado a partir de la componente determinista, que en este caso denotaremos como perfil de climatización.
- $D_{CLIMA}(t)$ es la dispersión que en el instante t se suma o resta al valor calculado por el perfil.

Por orden, el perfil de climatización resulta:

$$P_{CLIMA}(t) = CI(Z) \cdot PA_C(t)$$

Ecuación 3-9. Modelo para el perfil de climatización.

Donde:

- $CI(Z)$ es el consumo de climatización integrado en el periodo de tiempo máximo elegido como máximo divisor de 1 día.
- $PA_C(t)$ es el patrón de consumos que permite pasar del consumo integrado en el periodo z, al consumo en la base horaria.

No obstante, cabe mencionar que el modelo $CI(Z)$ encierra la doble caracterización de consumos y temperaturas, es decir, en los periodos de parada la variable objetivo es la temperatura y en los periodos de operación el consumo. Tal y como figura en la siguiente formulación.

$$CI(Z) = \sum_{i=0}^m a_i \cdot T_{SA}(z-i) + \sum_{i=1}^m b_i \cdot T_{INT}(z-i) + \sum_{i=1}^m c_i \cdot GI(z-i) + \sum_{i=1}^n d_i \cdot CI(z-i)$$

Ecuación 3-4. Modelo para el cálculo consumo integrado durante el periodo z.

$$T_{INT}(Z) = \sum_{i=0}^m e_i \cdot T_{SA}(z-i) + \sum_{i=1}^m f_i \cdot GI(z-i) + \sum_{i=1}^n d_i \cdot T_{INT}(z-i)$$

Ecuación 3-10. MCS temperatura interior promedio durante el periodo z de no climatización.

$$T_{INT}(Z) = \sum_{i=0}^m g_i \cdot T_{SA}(z-i) + \sum_{i=0}^m h_i \cdot CI(z-i) + \sum_{i=1}^n d_i \cdot T_{INT}(z-i)$$

Ecuación 3-11. MCS temperatura interior promedio durante el periodo z de climatización.

Donde:

- $T_{INT}(Z)$ es la temperatura promedio del aire interior de las zonas climatizadas [°C].
- $GI(z)$ es el término de ganancias internas típico del edificio [W/m²]
- $T_{SA}(z)$ es la temperatura sol-aire calculada como se describe en los párrafos siguientes.
- a_i , b_i y c_i son los numeradores (coeficientes constantes) del modelo de consumo a identificar mediante datos experimentales.
- e_i y f_i son los numeradores (coeficientes constantes) del modelo de temperatura interior en parada.
- g_i y h_i son los numeradores (coeficientes constantes) del modelo de temperatura interior en funcionamiento.
- d_i son los denominadores del sistema, y quedan ligados a las constantes de tiempo del mismo que se acotarán usando el manual de ASHRAE [153]–[155] y la norma UNE 13790 [156]. Es por eso que son únicos para ambos modelos.

La siguiente tabla muestra los valores típicos para las constantes de tiempo y los denominadores asociados a las mismas:

ASHRAE [153] - UNE 13790 [157] (Constante de tiempo principal)	Constante Tiempo (h)	Constante Tiempo (días)	Denominador
Muy ligero	6.00	0.25	0.02
Ligero	12.00	0.50	0.14
Medio	24.00	1.00	0.37
Pesado	50.00	2.08	0.62
Muy pesado	72.00	3.00	0.72

Tabla 3–2. Estimación de las constantes de tiempo del edificio

Hay que recordar que el denominador está vinculado al valor de la constante de tiempo del sistema y a la base de tiempo a la que quede referida por la siguiente expresión:

$$Denominador_i = \exp\left(-\frac{1}{\tau_1}\right)$$

Ecuación 3-12. Cálculo del denominador en función de la constante de tiempo del sistema.

La temperatura sol-aire es la combinación entre la temperatura exterior y la radiación, como ya se ha explicado en capítulos anteriores. Para su obtención de una forma óptima se debe disponer de datos experimentales en evolución libre sin fuentes internas, de tal forma, que se pueda analizar el efecto de la

radiación y temperatura exterior sobre la temperatura interior. Este experimento quedaría modelado con la siguiente expresión:

$$T_{INT}(Z) = \sum_{i=0}^m aa_i \cdot T_{EXT}(z-i) + \sum_{i=0}^m bb_i \cdot RAD(z-i) + \sum_{i=1}^n d_i \cdot T_{INT}(z-i)$$

Ecuación 3-13. MCS temperatura interior promedio en evolución libre sin ganancias internas.

Donde $T_{EXT}(z)$ es la temperatura exterior promedio durante el periodo de tiempo z , y $RAD(z)$ es la integral de radiación global horizontal incidente durante ese periodo z y a su vez una buena aproximación para el cálculo de la temperatura sol-aire en el procedimiento es:

$$T_{SA}(z) = T_{EXT}(z) + k \cdot RAD(z)$$

Ecuación 3-14. Definición de temperatura sol-aire [°C].

Si se analiza la expresión de $T_{INT}(Z)$ en régimen permanente, se obtiene el valor del parámetro k :

$$k = \frac{\sum_{i=0}^m bb_i}{1 - \sum_{i=1}^n d_i}$$

Ecuación 3-15. Definición del parámetro k [°C/Wh/m²].

Este parámetro k [°C] hace referencia referido al incremento de temperatura interior que supone la radiación incidente.

Siguiendo el mismo procedimiento se pueden estimar las ganancias internas. Para ello se debe realizar un experimento en condiciones normales de operación del edificio sin operar el sistema de climatización del mismo, es decir, una evolución libre en operación.

$$T_{INT}(Z) = \sum_{i=0}^m cc_i \cdot T_{SA}(z-i) + \sum_{i=0}^m gg_i \cdot GI(z-i) + \sum_{i=1}^n d_i \cdot T_{INT}(z-i)$$

Ecuación 3-16. MCS temperatura interior promedio en evolución libre en operación normal.

Para ello las ganancias se modelan con un vector 1-0, tomando el valor uno el periodo en el que el edificio estuvo en operación y ocupado, y cero cuando no. De manera análoga a como se ha calculado el parámetro k , se analiza la expresión 2-17 en régimen permanente. En este caso el incremento de temperatura interior P_{GI} [°C] que en régimen permanenten suponen las pérdidas resulta:

$$P_{GI} = \frac{\sum_{i=0}^m gg_i}{1 - \sum_{i=1}^n d_i} / (V \cdot \rho \cdot C_p)$$

Ecuación 3-17. Estimación de fuentes internas durante el periodo Z [J].

Hay que comentar que no se calcula el efecto del permanente de la temperatura exterior por no ser un parámetro de interés en este nivel de la formulación.

Por último, el perfil de climatización requiere la obtención de un patrón de consumo $PA_C(t)$. Este patrón consiste en un vector cuyas componentes contienen el tanto por uno de consumo en el instante i (componente i del vector) del $CI(Z)$ durante el periodo z . Es decir, el patrón $PA_C(t)$ reparte el consumo integrado y predicho en el periodo z en los puntos de muestreo deseados al elegir la base de tiempo. El patrón $PA_C(t)$ es la vía de predecir consumos en una base de tiempo diferente a la usada en al caracterización de $CI(Z)$. Véase el ejemplo expuesto a continuación.

Para entenderlo mejor se reproduce un horario ficticio, donde el periodo de integración z toma un valor de 6h, y el paso de tiempo Δt en el que se quiere el consumo asciende a 2h:

En el día 1, el vector de consumos integrados sería:

$$CI(Z = 1) = 0 [kWh], CI(Z = 2) = 200 [kWh], CI(Z = 3) = 320 [kWh], CI(Z = 4) = 0 [kWh]$$

Es decir, en el segundo periodo el edificio comienza su operación, a las 6 am, en continuo hasta las 18h.

Si se quiere tener el consumo cada hora, el patrón debe contener 24h, como por ejemplo:

$$PA_C(\text{día } 1) = [0,0,0,0,0,0,0.05,0.1,0.15,0.2,0.25,0.3,0.3,0.25,0.2,0.15,0.05,0,0,0,0,0]$$

Nótese como la suma de las componentes 7, 8, 9, 10, 11 y 12 vale la unidad, igual que las 6 siguientes. Esto es así, porque la integral de consumo durante el segundo periodo queda repartido entre las 6h que van desde las 6:00 hasta las 12:00. Finalmente, el consumo estimado para las 10h sería 0.2×200 [kWh] y a las 14h de 0.25×320 [kWh].

Cabe mencionar, que en el caso del ejemplo, en el que el edificio opera de 6:00 a 18:00 en continuo, se elige un periodo de 6h como base de tiempo para el modelo $CI(Z)$ por ser el máximo común divisor en el que puede ser dividido el día. Por tanto, se puede obtener la primera conclusión: hay que buscar la mayor base de tiempo Z posible para el modelo de consumo integrado $CI(Z)$.

Para completar la modelización, la componente estocástica del modelo, es decir la dispersión resulta:

$$D_{CLIMA}(t) = MD(na, na) \cdot D_{CLIMA}(q^{-1})$$

$$D_{CLIMA}(t) = C_{EST-CLIMA}(t) - C_{CLIMA}(t)$$

Donde

- $D_{CLIMA}(t)$ es la diferencia entre el consumo estimado para el instante t y el consumo real medido en ese mismo instante.
- $MD(na, na)$ matriz de coeficientes del modelo.
- $D_{CLIMA}(q^{-1})$ hace referencia a un vector de tamaño na con los valores $D_{CLIMA}(t)$ en los “ na ” instantes anteriores.
- El orden del modelo “ na ” es un parámetro a optimizar, cuyo valor puede aproximarse al número de muestras contenidas en 24h, y se recomienda que sea superior al número de muestras contenidas en todos los periodos Z que componen el día de operación.

En el caso de que el modelo no pueda alimentarse de datos experimentales reales, es decir, pueda aprender por si mismo del pasado, el modelo de dispersión se simplifica hasta una función que estima un valor de la incertidumbre asociada a cada predicción, incluso a una función de probabilidad.

3.3.2.2. Consumos de no climatización

De forma análoga se tratan los consumos del edificio que no son de climatización, tipo iluminación, fuerza u otros. Este tipo de consumos no tienen una componente determinista pero sí pueden responder a un patrón. Este patrón depende única y exclusivamente del comportamiento del usuario.

$$C_{EST-X}(t) = P_X(t) + D_X(t)$$

La formulación es idéntica al caso de climatización, salvo en la definición del perfil, que queda:

$$P_X(t) = PA_X(t)$$

Es decir, el perfil es igual que el patrón, y por tanto el patrón ya no es un vector de tanto por uno, sino un vector con el valor en cada punto de muestreo requerido del consumo que se prevé tener. Esta es la diferencia con respecto al tratamiento de consumos de climatización.

La dispersión del modelo quedaría por tanto:

$$D_X(t) = MD_X(na, na) \cdot D_X(q^{-1})$$

$$D_X(t) = C_{EST-X}(t) - C_X(t)$$

3.3.2.3. Niveles de caracterización

Se han desarrollado cuatro niveles de modelización para el consumo de climatización de forma que el modelo se adapte a la calidad y cantidad de datos medidos disponibles.

Para ello el siguiente epígrafe muestra las decisiones a tomar para elegir el nivel de modelización correcto en función de calidad y cantidad de datos experimentales.

Nivel 3

Es el nivel óptimo para la caracterización del consumo de climatización. Este nivel contiene un modelo determinista con bastante detalle por lo que, si los datos experimentales con los que se hace la identificación son de calidad, permite su explotación robusta a largo plazo.



Nivel 2

Con respecto al nivel anterior se elimina el uso de la radiación. Tal y como se ha dicho antes, el tratamiento de la radiación requiere un etapa previa de cierta complejidad. Por este motivo se ha diseñado un nivel que solventa esta dificultad.



Nivel 1

El último nivel físico a analizar será el nivel 1, cuyos resultados mostraremos a continuación. En este caso se abre la posibilidad de eliminar el clima de las dependencias del modelo, o introducirlo como parte de una entrada combinada con las condiciones térmicas interiores.



Nivel 0

Nivel óptimo para consumos del tipo no climatización o para el caso de que se se tenga demasiada incertidumbre en los datos experimentales.



3.3.2.4. Algoritmo de caracterización consumo climatización

El algoritmo que se ha probado para la obtención y validación de un modelo integrado de consumo es el siguiente.

1. Analizar qué datos medidos se disponen. Puede haber datos climáticos ya que se pueden obtener de bases meteorológicas públicas, pero hay que analizar su validez para el edificio en cuestión. A su vez puede o no haber mediciones de la temperatura representativa del aire interior.
2. Analizados los datos, si la variable objetivo es el consumo de climatización, conviene evaluar si la evolución de la temperatura interior está relacionada con el consumo: relación temporal entre los gradientes de ambas variables, periodos de parada y variaciones de temperatura, evolución del consumo y horario de operación definido etc... Estos análisis, como puede verse en los libros que ligan la estadística con los modelos empíricos (referencia al tema de "Análisis gráfico"), permiten estimar las dependencias del modelo, pero en la tesis se propone que se usen estos análisis para decidir si los datos que se tienen son útiles y suficientes.
3. Tras los puntos anteriores se elige el nivel al que se puede llegar, recomendando el nivel 3 como el modelo óptimo para predicción a largo plazo.

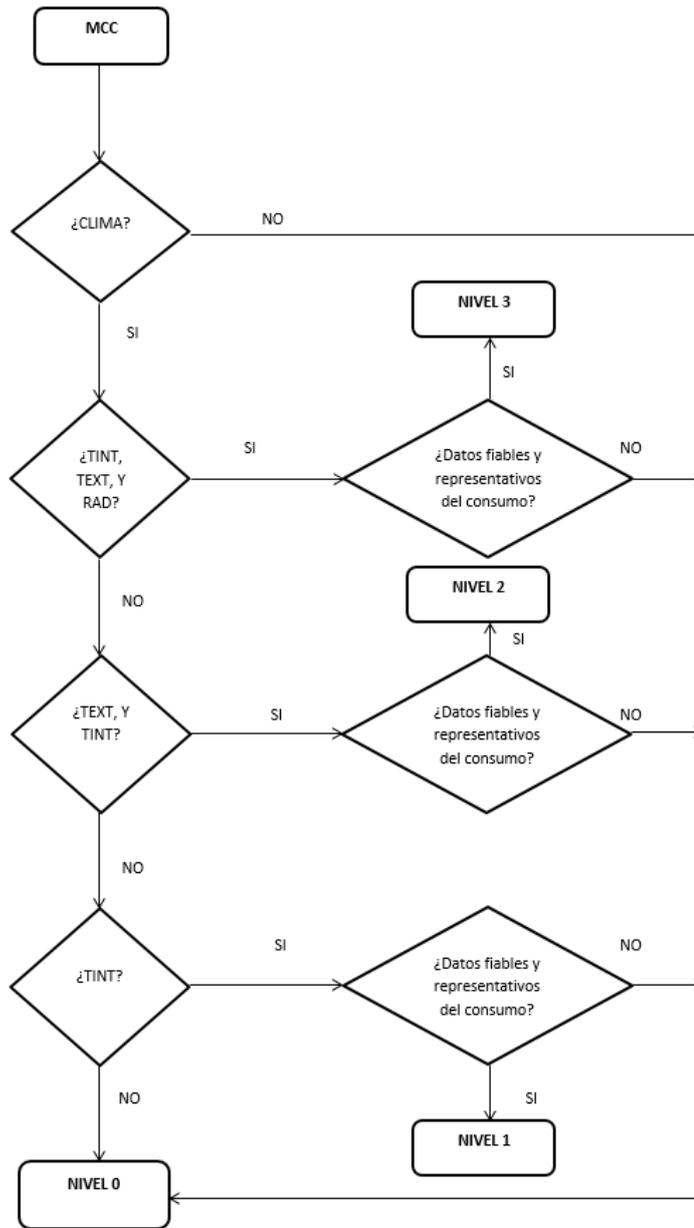


Figura 3-5. Algoritmo de caracterización del consumo de climatización

3.3.3. MCS Demanda Térmica Mensual

En este punto se desarrollan los fundamentos del modelo de caracterización en base mensual o estacional. La modelización seguida pretende conservar la física de los fenómenos caracterizados, disgregando su formulación al máximo para que los parámetros característicos del edificio aparezcan explícitos. Este objetivo no es una labor sencilla y tampoco nueva. Es más, las tendencias normativas de cara a la evaluación de la demanda energética de los edificios en los años 90 en Europa estaban dominadas por el uso y desarrollo de modelos en base mensual o estacional, mientras que en EEUU dominaban los modelos en base horaria. En la actualidad, como muestra el estado del arte realizado, las tendencias normativas e investigadoras están ligadas al uso de resultados mensuales tanto para calibración como para verificación de ahorros. Por este motivo se ha desarrollado este trabajo en el interior del trabajo doctoral, ligado completamente con el resto del trabajo.

Haciendo uso de las conclusiones adyacentes a lo largo del primer capítulo de la tesis, se apuesta por un método simplificado en una base temporal como mínimo de un mes, cuyos parámetros sean variables de

diseño y operación del propio edificio, y cuyas entradas sean el clima y valores de control/operación del edificio.

En esta línea aparecen algunos trabajos que se mencionan a lo largo de este capítulo, ya que destacan por los productos intermedios que desarrollan más que por la modelización mostrada. No obstante, el trabajo realizado por Joseph Virgone [122], es un ejemplo de la metodología requerida para la obtención de este tipo de modelos: comparte muchos de los parámetros requeridos por el modelo expuesto en este capítulo, desarrolla una batería de simulaciones con casi 300 casos en TRNSYS, y su base temporal es el mes. Aunque, la principal diferencia, que a la par se convierte en una deficiencia de cara a los objetivos deseados en el producto de esta tesis, es la pérdida de relaciones físicas en el modelo, es decir, el modelo tiene forma polinómica de grado dos con productos cruzados entre parámetros. En la esencia del fenómeno a modelar no existen estas dependencias en régimen permanente, salvo si quiere hacer una aproximación en serie. De este trabajo hay que decir que solo es válido para calefacción, que obtiene errores inferiores al 5% a nivel anual, pero a nivel mensual puede llegar al 20%. El punto más desfavorable del trabajo de cara a su extrapolación a las zonas climáticas de España y del resto de países del mediterráneo, es que para su obtención la temperatura exterior ha oscilado entre 0 y 18°C, siendo la consigna de 19°C, y con niveles de radiación muy bajos.

Tras la revisión realizada en el primer capítulo, y ampliada con dos referencias destacadas en las líneas anteriores, se elige trabajar con dos referencias cercanas y robustas como son: la norma UNE-EN ISO 13790.201 [157], actualizada y activa; y “Propuesta para la extensión de la norma básica de edificación de condiciones térmicas de los edificios (NBE.CT.79) [158]”. Estas dos fuentes sirven de apoyo para arrojar las aportaciones del trabajo doctoral en lo referido a la caracterización mensual de la demanda o el consumo energético del edificio, de cara a la elaboración de modelos más simplificados que permitan ser calibrados/corregidos a partir de datos energéticos reales.

Hay que mencionar que ya están apareciendo publicaciones ligadas a la norma UNE mencionada que persiguen ampliarla para tener en cuenta elementos especiales, como por ejemplo [159], a su vez la misma referencia comenta las posibilidades de esta modelización base por su simplicidad y robustez. En este trabajo se pretende modificar la formulación de los modelos para tener en cuenta las posibles ganancias solares que se conseguirían si se acopla una galería acristalada para captar el sol (“sunspace”).

En primer lugar, resulta necesario plasmar el inicio del problema de la caracterización mensual/estacional de la demanda energética del edificio. Suponiendo que durante un cierto periodo se desea mantener una temperatura interior constante, el balance global de energía sobre el edificio puede expresarse como:

$$Q = Q_T + Q_V + Q_S + Q_{FI}$$

Ecuación 3-18. Balance de energía sobre todo el edificio

Dónde:

Q demanda energética del edificio

Q_T transferencia de calor a través de los cerramientos opacos, vidriados y sus uniones como consecuencia de la diferencia de temperatura entre el exterior y el interior.

Q_V intercambio de energía originada por la entrada voluntaria (ventilación) o involuntaria (infiltración) de aire del exterior).

Q_S transferencia hacia el aire debida a la radiación solar.

Q_{FI} transferencia hacia el aire debida a las fuentes internas, es decir, ocupantes, iluminación y equipo diverso.

El balance anterior es válido para cualquier régimen sin más que asignar en cada momento el signo apropiado a los diferentes flujos de calor. Por consiguiente, se puede hacer una primera distinción entre la energía que “se fuga” del edificio – pérdidas – y la energía que “entra” – ganancias-, resultando:

$$Q_{CAL} = Q_{p\acute{e}rdidas} - Q_{ganancias\ netas}$$

$$Q_{REF} = Q_{ganancias} - Q_{p\acute{e}rdidas\ netas}$$

Ecuación 3-19. Disgregación del balance en su forma elemental para calefacción y refrigeración

La demanda de energía de un edificio no es más que el flujo de energía ideal que se requiere aportar en calefacción o extraer en refrigeración para mantener el espacio en unas ciertas consignas de confort. Dicho esto, se puede entender que en el caso de calefacción las ganancias de energía sea un efecto útil, que maximizado puede hacer que no se requiera ni la operación de un equipo de climatización; y en su caso en refrigeración, el efecto de que existan fugas de energía en forma de pérdidas es positivo. Con esto, la demanda energética de un edificio, no es más que la diferencia entre las pérdidas de energía que tiene y las ganancias netas o útiles que recibe para calefacción; y la diferencias entre las ganancias recibidas y las pérdidas netas o útiles que tiene. Es importante señalar que los efectos dinámicos aparecen recogidos en esta formulación al hablar de “flujos netos” como se puede ver en el epígrafe correspondiente; y que por convención este dinamismo se recoge en la energía útil para reducir la demanda.

Por tanto, a lo largo de las siguientes líneas se detalla el concepto de pérdidas (transmisión, infiltración y ventilación), ganancias (radiación y fuentes internas), y sus correspondientes valores netos o útiles.

3.3.3.1. Modelización de pérdidas de energía

Como ya se ha comentado, se engloban como pérdidas los efectos de la transmisión, ventilación e infiltración, por este motivo se va a analizar cada uno de estos efectos por separado, para seguidamente definir los requerimientos para su caracterización.

3.3.3.1.1. Transmisión de calor a través de la epidermis

En primer lugar se modela el flujo de calor por transmisión. Para ello se supone un periodo de tiempo t suficientemente largo (mayor de 10 días), lo que permite hacer la hipótesis de régimen permanente. Según esto:

$$Q_T \cong \int_t UA \cdot (\theta_i(t) - \theta_e(t)) \cdot dt$$

Ecuación 3-20. Energía pérdida por transmisión

Siendo UA la conductancia global del edificio. En esta conductancia se están teniendo en cuenta los efectos de los cerramientos opacos, puentes térmicos y vidrios que constituyen la epidermis del edificio.

Existen muchas publicaciones que hacen referencia a la dificultad de caracterizar este parámetro. Profundizando más aún, existen competiciones en las que partiendo de unos mismos datos se usan diferentes técnicas para estimar el valor de UA de un cerramiento [146]. Como ejemplo, se destaca el trabajo realizado por Pier Giorgio en fechas recientes [160], por ser reciente y por presentar una amplia muestra de edificio. En total aparecen 30 edificio construido bajo diferentes legislaciones entre 2006 y 2010. Lo más interesante es la comparación entre los valores teóricos estimados (abcisas), y los valores calculados a partir de los datos experimentales usando diferentes técnicas. De entre todos los resultados se extrae la gráfica referente al método del promedio, que es el recomendado por las normativas [161]: se observan desviaciones en algunos puntos superiores al 35%.

En el artículo [160] aparece una conclusión que merece la pena destacarla en esta cita: de 44 elementos medidos, solo 29 han sido elegidos para realizar la comparación entre los valores UA medidos y calculados, ya que en el resto las diferencias eran tan grandes que parecía una comparación de cosas diferentes.

Otra conclusión importante, es que cuando el valor se obtenía a partir de simulaciones los resultados oscilaban entre un 10-15% del valor calculado analíticamente. Esta conclusión queda ligada con otro trabajo [162], en el que de forma razonada se ofrece una aproximación para la incertidumbre mínima a tener en cuenta en los valores UA calculados vía simulación:

$$U = U \pm \Delta U \quad \Delta U = \sqrt{\sum_{k=1}^n \left[\frac{\partial U(X_k)}{\partial X_k} \right]^2 \cdot \Delta X_k^2}$$

Ecuación 3-21. Formulación de la incertidumbre asociada al valor U del edificio

Esta expresión, difícil de usar no es algo nuevo, si no que aparece en la norma UNE publicada en 1995 [163]. El aporte del trabajo, es la estimación de la incertidumbre asociada a las diferentes variables, como el coeficiente de transferencia convectivo interior o la conductividad del aislante.

Ahora bien, en la integral aparecen la temperatura interior $\theta_i(t)$ y la temperatura exterior $\theta_e(t)$ ambas variables con el tiempo. Este hecho aumenta la dificultad de resolver esta integral en un paso de tiempo suficientemente largo sin pasar un el paso corto, es decir, integrar en un largo periodo de tiempo obliga a conocer lo sucedido en cada instante y realizar las operaciones pertinentes.

A esta dificultad, se le suma el comportamiento variable de los flujos de calor por transmisión, es decir, puesto que dependen de las condiciones climáticas, pueden cuantificarse como una fuga de energía o una ganancia (véase el epígrafe “Conductancia global del edificio”). Es por este motivo, que aunque en la definición del modelo aparezcan englobados como pérdidas por ser su efecto dominante, pueden invertir su signo en muchas horas del año.

3.3.3.1.2. Ventilación e infiltración

Haciendo uso del punto anterior, este flujo de energía requiere el conocimiento del caudal o del número n de renovaciones del volumen de aire del edificio que cada hora se intercambia con el exterior. Ya que una vez conocido ese valor, debido bien a ventilación o bien a infiltración, la cuantificación de este flujo quedaría como:

$$Q_V \cong \int_t \rho C_p \cdot n \cdot V \cdot (\theta_i(t) - \theta_e(t)) \cdot dt$$

Siendo:

ρ densidad del aire kg/ m³

C_p calor específico del aire (J/kg·°C)

V el volumen neto del edificio (m³)

N número de renovaciones hora (h⁻¹)

Ecuación 3-22. Energía pérdida debido a la ventilación e infiltración del edificio

Al igual que los flujos por transmisión, la energía intercambiada por ventilación e infiltración puede ser una ganancia de energía o una pérdida. En los siguientes puntos se ofrece cierta información relevante para la caracterización del caudal de ventilación e infiltración real.

Hay que señalar que la ventilación nocturna para la estación de refrigeración, se puede cuantificar con esta formulación, con solo considerar el incremento de caudal que supone en las horas que lo supone.

3.3.3.1.3. Formulación de pérdidas

Haciendo uso de las expresiones anteriores, las pérdidas resultan:

$$Q_{PÉRDIDAS} = Q_V + Q_T \cong \int_t [\rho C_p \cdot n \cdot V + UA] \cdot (\theta_i(t) - \theta_e(t)) \cdot dt$$

Ecuación 3-23. Formulación de energía perdida

Lo que conlleva que para caracterizar las pérdidas, además de conocer la geometría del edificio y las propiedades del aire, se requiere cuantificar los intercambios volumétricos de aire del edificio con el exterior (ventilación e infiltración), el valor de la conductancia global del edificio y la diferencia de temperaturas del aire interior y el exterior.

En los siguientes puntos se describen los estudios realizados sobre cada una de las variables anteriores.

3.3.3.1.4. Caudal de ventilación e Infiltración

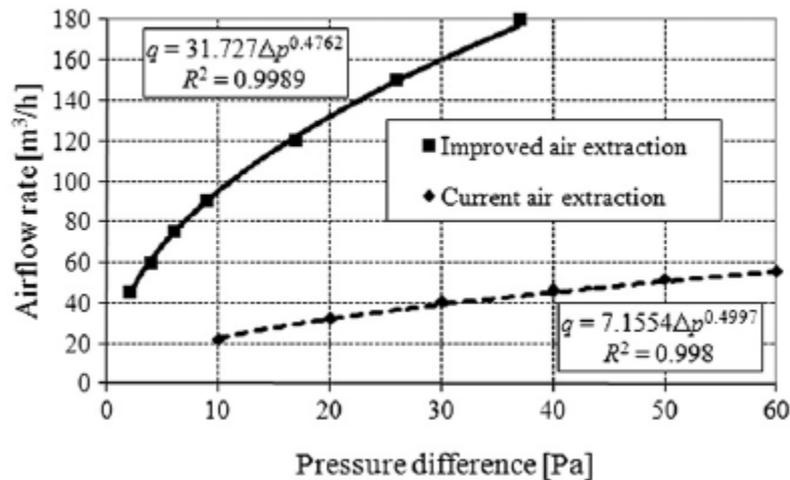
De cara al modelo desarrollado, la ventilación e infiltración aparecen agrupadas en forma de unas renovaciones hora equivalentes. Quedando la formulación de la siguiente forma:

$$Q_V \cong \int_t \rho C_p \cdot n \cdot V \cdot (\theta_i(t) - \theta_e(t)) \cdot dt = \rho C_p \cdot n_{eq} \cdot V \cdot \int_t (\theta_i(t) - \theta_e(t)) \cdot dt$$

Ecuación 3-24. ACH equivalentes

Hay que comentar que de este parámetro se conoce la parte referente a la ventilación mínima exigida o diseñada en proyecto, que además debe poder medirse. La parte referida a la infiltración puede calcularse de forma aproximada, ya que está ligada a la climatología de la región (efecto del viento). No obstante, se requieren una serie de medidas para poder realizar los cálculos con cierta precisión como son: la permeabilidad de los elementos opacos y huecos, geometría de la epidermis, dirección y velocidad del viento... El efecto del viento es crítico de cara a la descomposición de caudales y posibles mejoras de la epidermis. Sin embargo en la formulación del procedimiento se caracteriza por un valor de renovaciones hora para todo el edificio constante cada mes, o incluso, constante durante toda la estación.

Existen bastantes publicaciones con ejemplos reales del cálculo del nivel de estanqueidad de un edificio, donde se obtienen curvas caudal vs presión del comportamiento de edificios o espacios. Una de las más actuales y con bastante riqueza de resultados es [164]. Donde se analiza un bloque de viviendas, y se estudian los comportamientos reales de algunos componentes como ventanas, extractores, aireadores y a la par se analiza en laboratorio y con modelos analíticos.



Ecuación 3-25. Cálculo experimental del caudal de infiltraciones. Fuente [164]

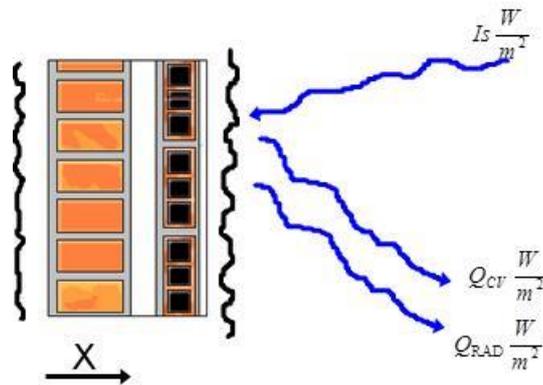
Obsérvese que si se pudiera estimar la sobrepresión o succión sobre el elemento de entrada o salida desde dónde se realiza la entrada/salida de aire experimental, se tiene el caudal intercambiado por el edificio con el exterior. En conclusión existen métodos experimentales que ofrecen solución a la caracterización de esta variable.

3.3.3.1.5. Conductancia global del edificio

El coeficiente global de transferencia o conductancia U [W/m²·K] se usa para cuantificar la energía recibida o cedida por el edificio a través de la conducción con su epidermis. Esta energía cambia de signo en función de los valores de las excitaciones dentro y fuera del edificio, excitaciones convectivas y radiantes, por lo que su caracterización tiene bastante dificultad. Entrando en detalle, este parámetro por definición no estaría bien calculado, ya que no es un parámetro estático si no que evoluciona en el tiempo al depender de los efectos convectivos y radiantes interiores y exteriores.

Si se analiza el problema se puede razonar como a través de la epidermis del edificio se produce una transferencia de calor debida a los efectos de la convección y radiación con el exterior. Estos dos

fenómenos de transferencia quedan ligados por el primer principio con la conducción a través de esta epidermis.



Ecuación 3-26. Flujos de calor sobre la superficie exterior de un cerramiento opaco

A la vista de la teoría se toma la decisión de incorporar el efecto radiante exterior mediante un coeficiente radiante [W/m²K] (se hace la hipótesis de una diferencia de temperatura entre la superficial de la epidermis y la temperatura radiante de los alrededores inferior a 100K).

$h_{re} = 4 \cdot \sigma \cdot \varepsilon \cdot T_m^3$ Con σ como la constante de Stefan-Boltzman ($5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$), ε la emisividad promedio del cerramiento o elemento de la epidermis, T_m la temperatura media entre la temperatura superficial exterior promedio del cerramiento o elemento y la temperatura radiante promedio de los alrededores [K].

Sobre el calentamiento debido a la radiación solar hay que destacar la necesidad de distinguir la cubierta del resto de cerramientos, ya que debido a su posición geométrica se convierte en un elemento captador de energía solar, Este hecho es menos acusado en el resto de cerramientos por diversos motivos, como son la inercia de esos muros, la evolución de las sombras a lo largo del día, la doble transferencia interior/externo del elemento...

A su vez, en la cara interior ($X=0$), puesto que en todo momento se persigue caracterizar la carga térmica sobre el aire interior (flujos de energía que son absorbidos por el aire y conllevan un aumento o reducción de la temperatura del espacio), solo se tiene en cuenta la transferencia convectiva, despreciando la transferencia radiante.

A pesar de despreciar los efectos radiantes en una base de tiempo suficientemente larga como la que persigue el modelo. Los flujos por radiación son los causantes de las distribuciones de temperatura en los cerramientos, contribuyen a las ganancias internas y a los movimientos de aire. Existen ciertas publicaciones dedicadas al cálculo del coeficiente convectivo radiante interior, más aún tras la aparición de las tecnologías como los suelos o techos radiantes. Una publicación en la que vía experimental se calculan estos coeficientes es [165]. De este trabajo destaca el artificio matemático que lleva a cabo para no linealizar la radiación, aunque después mezcla el efecto convectivo y radiante. Aunque se realizan experimentos particulares para desagregarlos obteniendo la siguiente conclusión: cuando el coeficiente convectivo toma un valor de $5 \text{ W/m}^2\text{K}$, el efecto radiante queda caracterizado por $0.5 \text{ W/m}^2\text{K}$. Resultado razonable por tener un entorno bastante isoterma en la celda experimental.

En esta línea aparecen publicaciones en las que se entra en detalle en el cálculo del coeficiente de transferencia radiante. Por ejemplo [166], calculan el coeficiente de transferencia radiante de los ocupantes con los cerramientos, y obtienen una correlación en función de la geometría del espacio, metabolismo, y las propiedades radiantes de la ropa.

Con las dos citas realizadas, y los resultados ofrecidos en régimen permanente para un espacio simulado, conviene citar referencias como [167] actuales, en las que se rescata la principal necesidad de controlar este flujo: los efectos radiantes son importantes en la sensación de confort de los ocupantes, en definitiva son la prioridad del sistema de climatización. Este trabajo es quizás de los más destacables en la temática, ya que realiza una revisión de los principales métodos publicados para el cálculo de la temperatura

radiante media interior con la que transfieren los ocupantes. A la par realizan un trabajo experimental en el que demuestran la dificultad para medir esta variable con diferentes sensores y aparatos. Las diferencias entre medidas iguales pero obtenidas de vías diferentes superan en algunos casos los 7°C. En las conclusiones del trabajo, se expone como tener en cuenta esta variable en el cálculo de cargas puede aportar lo mismo que no tenerla por el hecho de su difícil caracterización y poco peso; pero que es muy importante de cara a la calidad y bienestar de los ocupantes. Es por este motivo que se centra en la calibración de un procedimiento experimental para poder tenerla en cuenta, aunque existen publicaciones recientes que describen un procedimiento para la estimación de la temperatura media radiante de un espacio mediante datos simulados [168].

Los puentes térmicos se caracterizan mediante su transmitancia térmica lineal ψ (W/mK). Éste valor depende de la calidad constructiva de los cerramientos que forman el puente térmico (básicamente de la posición del aislamiento y de su resistencia térmica) así como de la calidad del diseño de la solución constructiva, es decir si el detalle se ha diseñado para minimizar el efecto de puente térmico o no.

En el modelo para el cálculo de la demanda el efecto de los puentes térmicos aparece implícitamente en el término correspondiente al coeficiente global de transferencia de los cerramientos.

En último lugar, no hay que olvidar los cerramientos con contacto con el terreno cuya caracterización de su valor de conductancia requeriría una diseminación aparte. En el modelo, este tipo de puntualizaciones son obtenidas a partir de los valores existentes en la literatura.

Concluyendo, una primera aproximación de los intercambios por transmisión a través de la epidermis del edificio puede ser:

$$Q_{T-c} \cong \int_t UA \cdot (\theta_i(t) - \theta_e(t)) \cdot dt = UA \cdot \int_t (\theta_i(t) - \theta_e(t)) \cdot dt$$

Esta expresión es válida en ambos regímenes de funcionamiento (calefacción y refrigeración), aunque como se ha dicho, ya que se toma la decisión de añadir a las ganancias solares los efectos de la absorción por los cerramientos verticales y horizontales del edificio. Esta decisión persigue que la metodología propuesta quede del lado de la seguridad en cuanto a la predicción de consumos, y quizás más importante, sea capaz de desagregar los efectos de mayor importancia e interés de cara a su intervención en edificios existentes.

3.3.3.1.6. Grados día

Los grados día no son más que el resultado de realizar la integral anterior, es decir, la integración de la diferencia de temperatura entre el interior y el exterior del edificio durante los periodos considerados en los que haya consumo.

$$GD = \int_t (\theta_i(t) - \theta_e(t)) \cdot dt$$

Ecuación 3-27. Energía pérdida debido a la ventilación e infiltración del edificio

Según esta definición, y las características de cada una de estas ondas como muestra la imagen inferior, es imposible calcular este valor en un paso de tiempo suficientemente largo (superior a 10 días) sin hacer uso del paso corto.

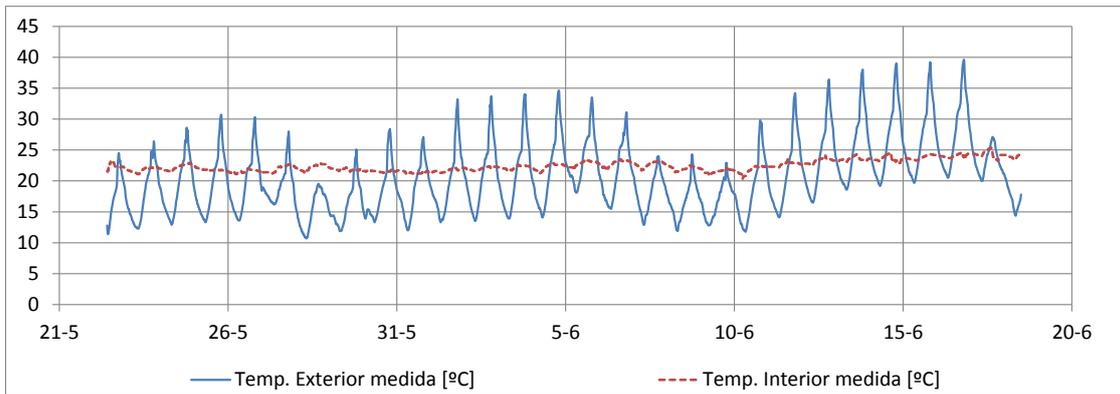


Figura 3-6. Datos medidos en espacio de oficinas de la Universidad de Granada de Junio 2013.

Los grados día son en definitiva, la caracterización de la excitación exterior dominante que recibe el edificio debido a los flujos convectivos y radiantes, y a los propios intercambios de aire. Además en forma de un indicador climático versátil y usado en innumerables trabajos y publicaciones, tanto a nivel diseño como para evaluación.

No obstante, ya se tiene una opción válida y aconsejable en ciertos casos que más adelante se especifican: realizar un sumatorio en paso de tiempo corto Δt para el cálculo del valor integrado en el paso de tiempo largo t , con esos intervalos i donde haya consumo.

$$GD = \int_t (\theta_i(t) - \theta_e(t)) \cdot dt \cong \sum_{i=0}^t (\theta_i(i) - \theta_e(i))$$

Lo más habitual, tanto en la literatura como en los procedimientos normativos, es encontrar los grados día asociados a una temperatura de consigna interior, es decir, calcular los grados días para una situación ideal en la que la temperatura interior se mantiene durante todo el periodo de acondicionamiento igual a una consigna. Básicamente, encontrarlos referidos a la demanda ideal del edificio o sus espacios. Si esto fue así, la integral podría expresarse y acotarse haciendo uso de los grados-día con base en la temperatura de consigna interior, con lo que las pérdidas por transmisión, por ejemplo, resultarían:

$$Q_T \leq 24 \cdot UA \cdot GD_{\theta_{consigna}}$$

Ecuación 3-28. Acotación pérdida por transmisión

Siendo $GD_{\theta_{consigna}}$ la diferencia entre la temperatura exterior y la temperatura de consigna mantenida las 24h en el periodo de integración t .

La aparición de esta definición sencilla para los grados días, hace que se cuente con esta variable como si fuera una variable climática dada, es decir, para cada localidad se dispone de una base de datos en la que se tienen los grados día para una determinada consigna, o incluso para un clima real, directamente a partir de las mediciones del sensor se podrían obtener los valores de los grados días en el paso de tiempo establecido.

No obstante, en este trabajo doctoral se han obtenido ciertas reflexiones y conclusiones sobre las limitaciones del uso de esta definición para los grados días en edificio reales, compartidas con muchas publicaciones e incluso descritas en la propia norma [156]. Para ponerlas de manifiesto se van a describir con los siguientes casos, que a su vez, aportan claridad a las dificultades comentadas en la resolución de la integral anterior cuando aparecen las intermitencias de operación:

1. Consigna 16h día y otra 8h noche.

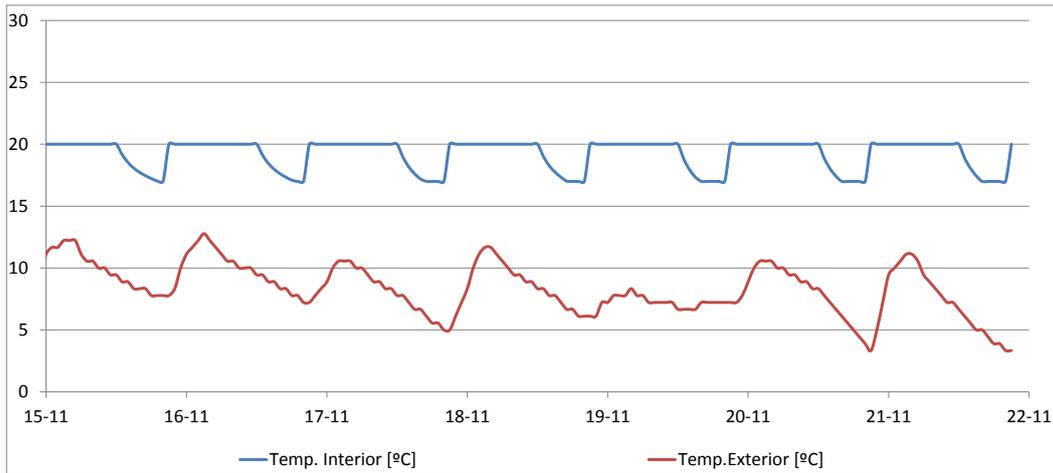


Figura 3-7. Evolución de temperaturas interior y exterior típicas de la estación de calefacción

2. Consigna 16h día y otra 8h noche. Días de no Carga. Refrigeración

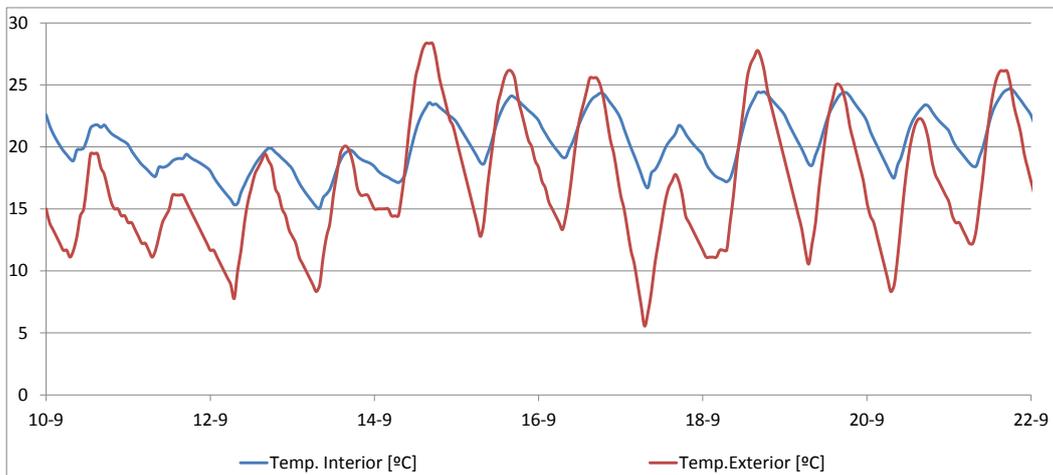


Figura 3-8. Evolución de temperaturas interior y exterior típicas de los meses intermedios

3. Consigna 16h día y otra 8h noche. Horas neutras o de cambio de régimen.

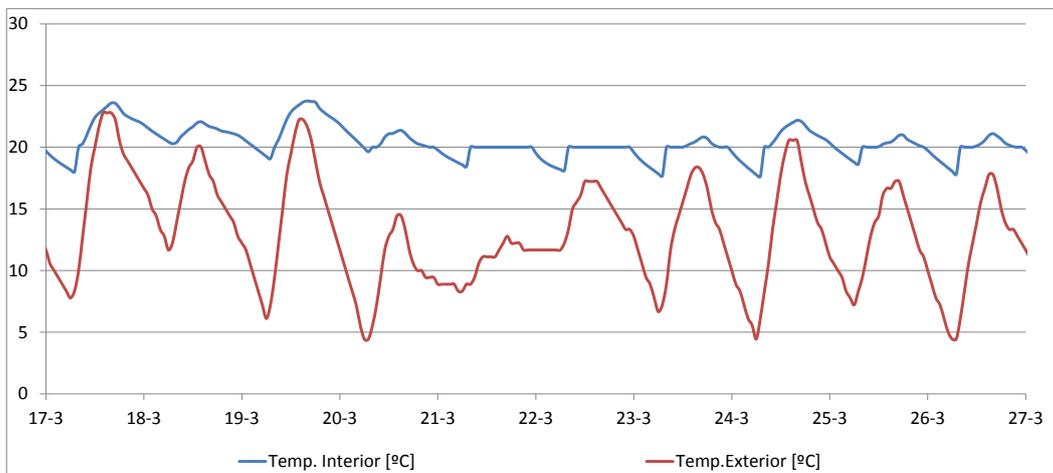


Figura 3-9. Evolución de temperaturas interior y exterior típicas de los meses intermedios

En el epígrafe 3.3.3.8 se expone el procedimiento elaborado para la obtención de un valor de los grados día útil y de calidad de cara a los objetivos del producto de caracterización mensual desarrollado. Incluso aparecen algunos matices sobre esta variable para poder cuantificar el enfriamiento debido a la

ventilación nocturna.

3.3.3.2. Modelización de ganancias de energía

Un edificio recibe dos fuentes de ganancias de energía: la radiación solar y las fuentes internas presentes en el mismo

3.3.3.2.1. Ganancias solares

La radiación solar incide sobre la epidermis del edificio y es absorbida, y además penetra en el mismo a través de los huecos existentes en él. Debido a las características típicas de la epidermis y al paso de tiempo elegido, el flujo de calor que es absorbido por la epidermis y cedido al aire interior es mucho menor que el captada por lo huecos, por lo que las ganancias solares se deben principalmente a la radiación que se transmite al interior del edificio a través de los vidrios. No obstante, en la metodología se ha decidido tener ambos efectos presentes en el modelo para de esta forma reflejar la captación solar absorbida por los cerramientos horizontales en la estación de refrigeración.

Para modelar las ganancias solares se hace uso del área solar sur equivalente $ASSE$, y de la radiación integrada sur incidente efectiva I_{s-e} . Resultando:

$$Q_S = ASSE \cdot I_{s-e}$$

Dónde el Área solar sur equivalente $ASSE$ es la relación entre la radiación que reciben las ventanas en sus correspondientes orientaciones y con las sombras propias y/o lejanas que tengan, y la radiación que recibirían si estuvieran orientadas al sur sin ningún tipo de sombra. Se calcula con la siguiente expresión para cada paso de tiempo t al depender de la radiación en FR_i variable con el tiempo:

$$ASSE = \sum_i A_{vi} g_i FR_i \cdot FGS_i + \sum_i A_{mi} \cdot \frac{\alpha_i \cdot U_i}{h_{CR-E}} \cdot FR_i \cdot FGS_i$$

Ecuación 3-29. Área solar sur equivalente formulada

Los valores A_{vi} son las áreas de ventana y A_{mi} en la orientación i . Los valores g_i son los factores solares en la orientación i , mientras que para la absorción debida a opacos aparece el coeficiente de absorción α_i , el coeficiente global de transferencia U_i [W/m²K] asociado al cerramiento i , y el coeficiente convectivo-radiante exterior h_{CR-E} . Dado que en la correlación esta área se multiplica por la radiación vertical al sur, todas las áreas solares se multiplican previamente por un factor correcto FR_i que es el ratio entre la radiación recibida por la fachada en la orientación real de la misma y la radiación de dicha fachada orientada al sur. Estos factores se obtienen en la base de tiempo elegida para cada orientación i :

$$FR_i = \frac{I_i}{I_s}$$

El factor de sombra global de una fachada FGS_i es un parámetro que permite estimar el efecto que tiene sobre la radiación de cualquier tipo que incide sobre una fachada, la presencia de obstáculos remotos, el propio edificio o bien los elementos de control solar instalados sobre la propia fachada del edificio.

Por último, I_{s-e} la radiación integrada sur incidente efectiva, no es más que la radiación sur incidente integrada en el periodo de operación y efectiva, es decir, corregida por el efecto de las protecciones solares existentes durante las horas en las que operen F_{PS} (tanto por uno).

$$I_{s-e} = \int_t I_s \cdot F_{PS} \cdot dt$$

Ecuación 3-30. Cálculo del valor de radiación solar sur efectiva

Conviene destacar que esta integral, para ser exacta, debe realizarse en el mismo periodo de contabilización de consumos. Por eso la estimación de esta variable está ligada al análisis del efecto de la intermitencia en los edificios.

3.3.3.2. Fuentes internas

Los flujos englobados en las fuentes internas son los procedentes de los ocupantes, de la iluminación y de los equipos existentes en el edificio. Para el procedimiento que se describe en este capítulo cada uno de estos flujos debe ser datos, bien porque se mide con encuestas de ocupación, contadores, sensores... o bien porque se extrae el dato procedente de estadísticas / simulación. Estos parámetros al final deben quedar caracterizados como un cierto valor W/m^2 de superficie acondicionada.

En el procedimiento se admite que existe cierta certeza sobre el inventario energético del edificio, tanto a nivel de horarios como de valores para esas cargas. Es por esto, que se admiten como entradas esos valores integrados, y ya el propio procedimiento identifica su peso en la demanda.

Aunque es importante destacar, que esta fuente de energía es de difícil caracterización, ya que puede desprenderse en forma de flujos convectivos, radiantes y latentes. De las referencias consultadas y usadas, la más destacada es la producida por ASHRAE [155] en la que se ofrecen valores para la descomposición de estos flujos.

En el marco de la tesis se ha calculado un valor promedio de las fuentes internas debidas a ocupación, equipos e iluminación para edificios terciarios. El valor de F_i (W/m^2) queda fijado en función del horario de funcionamiento del edificio y el nivel de fuentes internas según CTE [169]. Estos valores han sido calculados a partir de simulación: dado un edificio en una zona climática, se han elegido las diferentes configuraciones de horarios y parámetros de fuentes internas que dan solución a este problema.

Horario	Nivel GI CTE	F_i (W/m^2)
8h	Baja	1.43
8h	Media	4.29
8h	Alta	7.15
12h	Baja	1.79
12h	Media	5.36
12h	Alta	8.94
16h	Baja	2.62
16h	Media	7.86
16h	Alta	13.11
24h	Baja	3.81
24h	Media	11.44
24h	Alta	19.06

Tabla 3-3. Parámetros F_i (W/m^2) – Ganancias internas

3.3.3.3. Flujos netos: factor de utilización

En los métodos mensuales y estacionales, los efectos dinámicos se tienen en cuenta introduciendo el factor utilización de ganancias para calefacción, y el factor de utilización de pérdidas en refrigeración. Distinguiendo por efectos dinámicos los debidos a la inercia del edificio, no los debidos a las intermitencias de operación del mismo, que se definen en epígrafes posteriores.

3.3.3.4. Ganancias netas de energía – Factor de utilización de ganancias en Calefacción

Asociadas a ambas ganancias aparece un factor de utilización, como el rendimiento de conversión de esa energía a calor sobre el aire. Cada ganancia "a priori" debería contar con un factor de utilización, ya que la naturaleza de los flujos es totalmente diferente, como por ejemplo las ganancias internas que tienen una componente latente debida a ocupación. No obstante, a lo largo de la tesis se decide tomar el mismo

factor de utilización para ambas ganancias. Así, resulta lo siguiente:

$$Q_{GANANCIAS-NETAS} = FU \cdot Q_{GANANCIAS} = FU \cdot (Q_S + Q_{FI}) = \eta_{CAL} \cdot (Q_S + Q_{FI})$$

Ecuación 3-31. Formulación de ganancias netas

El factor de utilización FU depende principalmente de la constante de tiempo de edificio y de la relación ganancias pérdidas. Este factor de utilización indica cuál es el tanto por uno de las ganancias que es aprovechado para reducir la demanda de calefacción o aumentar la de refrigeración. Para calcular se usarán las fórmulas proporcionadas por la norma UNE antes destacada [157] ($FU = \eta$).

El factor de utilización, tanto en esta norma, como en la mayoría de la literatura consultada queda como función de la relación ganancias/pérdidas durante ese periodo de modelización y de la constante de tiempo. Fruto de simulaciones es la siguiente gráfica presentada en la misma referencia:

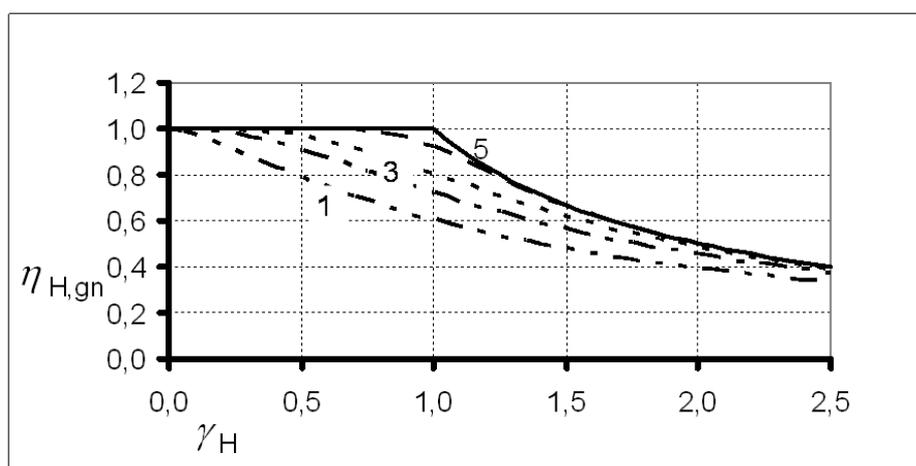


Figura 3-10. Factor de utilización para el régimen de calefacción Fuente [157].

La leyenda de la gráfica es: 1- constante tiempo 8h (baja inercia); 2 - constante de tiempo 24h; 3 - constante de tiempo 48h; 4 - constante de tiempo 1 semana; y 5 - constante de tiempo infinita.

De la gráfica anterior cabe destacar, que la situación de $\gamma_{H,lim} = 1$, es decir, suficientes ganancias como para compensar las pérdidas por transmisión y ventilación. Es esta situación cuando el factor de utilización se hace la unidad cuando aparece el punto ideal de la curva. Por consiguiente, para obtener el factor de utilización se requiere el cálculo de la constante de tiempo del edificio. Entonces la metodología desarrollada en esta tesis requiere la estimación de la constante de tiempo, aunque a la vista de la primera identificación de parámetros que se haga se lleva a cabo un análisis de la influencia de esta variable en los resultados del modelo (fase de validación, véase el último punto de este capítulo).

Retomando la fase de fundamentos, el algoritmo debe tomar una decisión en cuanto a la constante de tiempo del edificio, ya que en función de ese valor se calcula el parámetro a que más adelante se describe.

Entre las publicaciones consultadas no se ha encontrado ninguna de carácter experimental, si varias en las que a partir de resultados de simulación se obtiene una relación entre la constante de tiempo del edificio, las relación ganancias/pérdidas y el factor de utilización, tal y como lo presentado hasta ahora. Sin embargo, de la revisión bibliográfica realizada y centrada en este parámetro hay que destacar que existe una tendencia, representada por [170], fruto de simulaciones en ESP-r bajo el marco de los proyectos PASSYS. En este trabajo el factor de utilización para calefacción queda modelado con la siguiente formulación:

$$\eta_{CAL} = 1 - e^{\frac{-F1}{\gamma - F2}}$$

Donde F1 y F2 son dos funciones dependientes de la constante de tiempo principal del edificio, y que en el trabajo [171], se correlacionan y validan con la siguiente expresión:

$$F1 = 1.0785 + 0.0041 \cdot \left(\frac{mC}{UA}\right) - 6 \cdot 10^{-7} \left(\frac{mC}{UA}\right)^2$$

$$F2 = -0.0087 - 0.0007 \cdot \left(\frac{mC}{UA}\right) + 7 \cdot 10^{-8} \left(\frac{mC}{UA}\right)^2$$

Ecuación 3-32. Formulación del factor de utilización

Ahora bien estimar la constante de tiempo de un edificio es una labor complicada. La teoría dice que se podría estimar usando la siguiente fórmula [h]:

$$\tau = \frac{m \cdot C}{UA \cdot 3600}$$

Donde m [kg] es la masa térmica del edificio, C [J/kg.°C] es la capacidad calorífica promedio, y UA es la conductancia global [W/K].

Aunque no sería algo práctico para edificios existentes, ya que es casi imposible ser capaz de cuantificar la masa térmica contenida en el interior del edificio (mobiliario, equipos...). Por consiguiente, una primera estimación de la constante de tiempo puede obtenerse realizando la operación teórica mostrada en la fórmula anterior.

La otra vía... para calefacción y sus ganancias, es estimar este parámetro haciendo uso de las simulaciones presentadas en la literatura, aunque sea de forma aproximada comparando el edificio con los valores usados en las simulaciones que producen los resultados extrapolados a esta norma. Con esta idea aparece el parámetro adimensional a, que relaciona la constante de tiempo estimada del edificio a tratar, con la situación de referencia. Su definición es la siguiente:

$$a_c = a_0 + \frac{\tau}{\tau_0}$$

El parámetro a solo depende de la constante de tiempo, τ [h], y de los valores referencia fijados por esta norma, que son los valores por defecto ofrecidos en la norma como el promedio europeo en función de la tipología general del edificio y de sus condiciones de operación. La siguiente captura es la tabla ofrecida por la norma para obtener estos valores de normalización:

Tipo de edificio		a_0	τ_0 h
I	Edificios calefactados continuamente (más de 12 horas diarias), tales como edificios residenciales, hoteles, hospitales, casas y centros penitenciarios		
	método mensual de cálculo	1	15
	método estacional de cálculo	0.8	30
II	Edificios calefactados sólo durante el día (menos de 12 horas diarias) tales como centros de enseñanza, oficinas, edificios públicos y tiendas.	0.8	70

Figura 3-11. Valores para los parámetros independientes del factor de utilización [172]

Esta tabla está particularizada para el caso de España, ya que en la versión europea de la norma ISO/FDIS 13790:2007 (E) [172], no se hace la distinción I y II.

El estudio realizado sobre estos parámetros conduce al trabajo de J. Jokisalo [173], donde se analiza en detalle el factor de utilización para la estación de calefacción. Uno de los resultados de este trabajo, es la diferencia de valores que toma el factor de utilización para un edificio muy inerte (constante de tiempo 350h) y un edificio ligero (constante de tiempo 24h) en función de los valores por defecto fijados, esta diferencia aparece denotada en la gráfica como $\Delta\eta$.

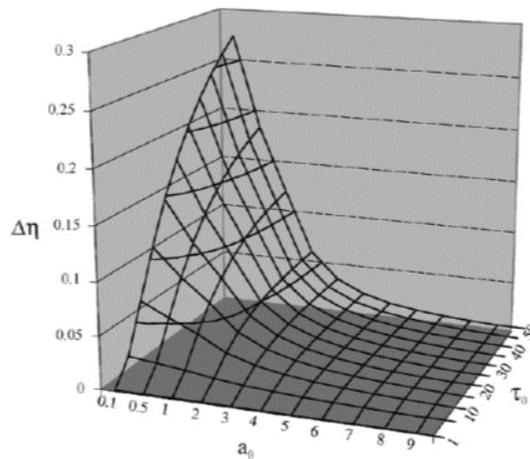


Figura 3-12. Variación del factor de utilización. Fuente [173]

En el rango fijado por la norma, la mayor diferencia que se tiene para los casos extremos es de 0.1. Este dato unido a que estas variables, junto con la constante de tiempo propia del edificio aparecen en la formulación del parámetro a , hacen que el factor de utilización se vea dominado por el efecto de la relación ganancias/pérdidas (véase el último epígrafe con el estudio del caso realizado). Para una relación de ganancias dada (γ_C), el efecto de la constante de tiempo se traduce en una oscilación inferior al 10% en el factor de utilización, pero el propio procedimiento que después se muestra tiene en cuenta este dato cambiando los coeficientes identificados.

A tal efecto, la formulación del factor de utilización se hace en tres tramos en la norma [157], resultando:

$$\begin{aligned} \text{Si } 0 < \gamma_C < 1, \gamma \neq 1 & \quad \eta_{\text{CAL}} = \frac{1 - \gamma_C^{ac}}{1 - \gamma_C^{ac+1}} \\ \text{Si } \gamma_C = 1 & \quad \eta_{\text{CAL}} = \frac{ac}{ac+1} \\ \text{Si } \gamma_C > 1 & \quad \eta_{\text{CAL}} = \frac{1}{\gamma_C} \end{aligned}$$

Ecuación 3-33. Formulación del factor de utilización para calefacción

El valor de la constante de tiempo, en los casos en los que sea posible será calculada usando la formulación teórica, para el resto de los casos se ofrece un valor aproximación en función de la tipología del edificio. Esta estimación está obtenida a partir de simulaciones propias y usando algunos resultados de la literatura [157], [173]:

Paso 1: ¿el edificio es ligero, medio o pesado?

- Muy Ligero: la estructura del edificio es metálica o de madera, y los cerramientos son poco pesados.
- Medio: La mayoría de los cerramientos en contacto con el exterior son ligeros, pero la estructura es de hormigón junto con los suelos. A su vez la cubierta es ligera.
- Muy Pesado: toda la estructura es masiva de hormigón, y solo las particiones interiores son ligeras.

Paso 2A: elección de la constante de tiempo

τ h[d]	Vivienda aislada	Apartamento	Terciario
Ligero	24-48 [1-2]	12-36 [0.5-1.5]	24-48 [1-2]
Medio	72-96 [3-4]	48-72 [2-3]	140-220[6-9]
Pesado	330-450 [13-19]	190-240 [8-10]	280-350 [12-16]

Tabla 3-4. Valores aproximados para la constante principal del edificio. Fuente [173]

Paso 2: elección de la capacidad térmica del edificio de forma aproximada en función del área acondicionada A_f [m²] y estimación de la constante de tiempo del edificio.

Clase	Método mensual y estacional C_m [J/K]
Muy ligero	$80\ 000 \cdot A_f$
Ligero	$110\ 000 \cdot A_f$
Medio	$165\ 000 \cdot A_f$
Pesado	$260\ 000 \cdot A_f$
Muy pesado	$370\ 000 \cdot A_f$

Tabla 3-5. Estimación de la capacidad térmica del edificio. Fuente [157]

Que con este valor quedaría y la conductancia global del edificio por el área expuesta quedaría:

$$\tau = \frac{C_m}{UA \cdot 3600} [h]$$

3.3.3.5. Pérdidas netas – Factor de Utilización de pérdidas en Refrigeración

En refrigeración, se requiere obtener las pérdidas netas o útiles. Para ello se necesita obtener un valor para el factor de utilización de refrigeración.

$$Q_{PÉRDIDAS-NETAS} = FU \cdot Q_{PÉRDIDAS} = FU \cdot (Q_V + Q_T) = \eta_{REF} \cdot (Q_V + Q_T)$$

Ecuación 3-34. Formulación de pérdidas netas para el régimen de refrigeración

Puesto que la formulación teórica y la estimada no dependen, bajo las simplificaciones realizadas, de la estación en la que se encuentre, se admite la constante de tiempo como única y aceptada para ambos regímenes.

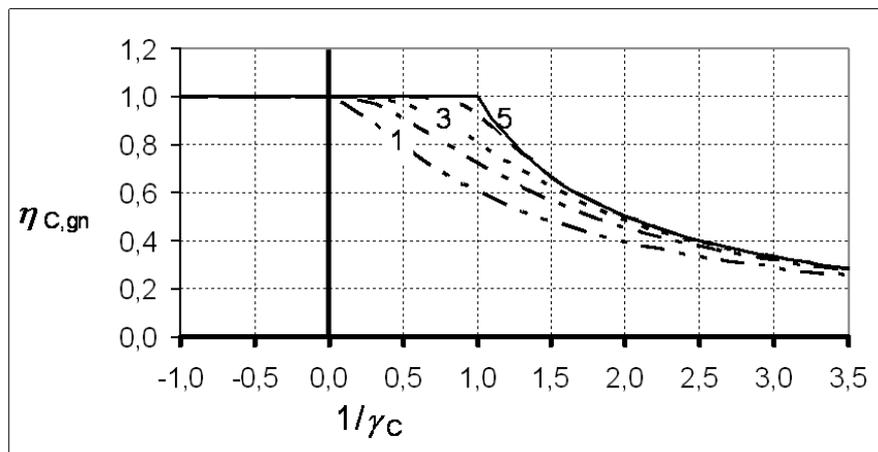


Figura 3-13. Factor de utilización para el régimen de refrigeración. Fuente [157].

La leyenda de la gráfica es: 1 - constante tiempo 8h (baja inercia); 2 - constante de tiempo 24h; 3 - constante de tiempo 48h; 4 - constante de tiempo 1 semana; y 5 - constante de tiempo infinita.

Fuente [157]. 1 constante de tiempo de 8h (baja inercia); 2 constante de tiempo de 1 día; 3 constante de tiempo de 2 días; 3 constante de tiempo de 7 días; y 5 constante de tiempo infinita (inercia elevada).

Siguiendo la misma referencia, la formulación del factor de utilización se hace en tres tramos en la norma [157], en función de γ_R cociente entre ganancias y pérdidas netas para el periodo de refrigeración tomado, resultando:

$$\begin{aligned} \text{Si } \gamma_R > 0 \text{ y } \gamma &\neq 1 & \eta_{REF} &= \frac{1 - \gamma_R^{-a_R}}{1 - \gamma_R^{-(a_R+1)}} \\ \text{Si } \gamma_R &= 1 & \eta_{REF} &= \frac{a_R}{a_R+1} \\ \text{Si } \gamma_R &< 0 & \eta_{REF} &= 1 \end{aligned}$$

Ecuación 3-35. Formulación del factor de utilización para refrigeración

El tratamiento de este factor de utilización es equivalente al de calefacción; a lo que se suma que el problema de la constante de tiempo ha quedado solventado, por lo que el procedimiento quedaría definido.

3.3.3.6. Modelo mensual

En este trabajo doctoral se prueba y valida el modelo simplificado desarrollado como alternativa a modelos detallados con paso de tiempo corto. El resultado es una herramienta versátil y rápida con la que realizar estudios de mejora energética o diseño óptimo de un edificio.

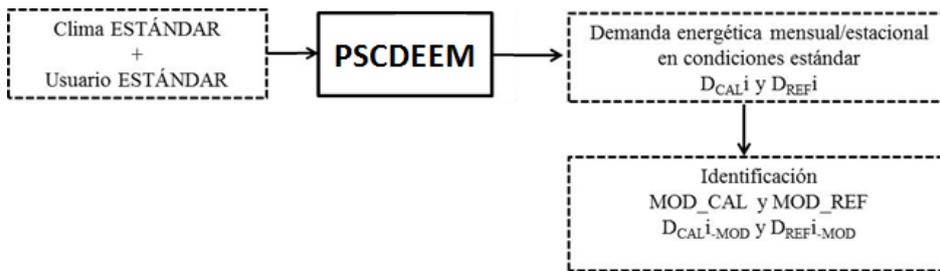


Figura 3-14. Corrección del MCS a partir de simulación para edificios terciarios (opción 2).

Aunque no se queda solo en eso, en el siguiente bloque de este capítulo se describe la fuente de aplicación más importante para este producto: obtención de modelos de caracterización simplificados mensuales a partir de datos de consumos reales o facturas. Este objetivo se ha tenido en cuenta a lo largo de la formulación del modelo y de la definición de sus parámetros.

Este modelo permite interacción con datos procedentes de simulación, tales como los que se presentan en las aplicaciones finales, como con datos reales. Son estos últimos la pieza fundamental de las motivaciones de este producto.

Entonces el modelo mensual podrá recibir datos procedentes de facturas con objeto de ser normalizados con el clima y el uso a partir del ajuste de los coeficientes del modelo. Y por consiguiente el modelo debe combinar simplicidad y versatilidad para aumentar su aplicabilidad en un amplio espectro de casos posibles.

3.3.3.6.1. Calefacción

El modelado para la demanda queda en función del edificio, del clima y de la propia identificación/ajuste realizado. Este ajuste aparece explícito en los diferentes coeficientes de de la formulación.

A continuación se presentan las diferentes opciones planteables del modelo. La elección de la opción depende de la calidad y cantidad de datos mensuales de los que se dispongan. Además en muchas ocasiones del edificio y la zona climática, es decir, de la duración de la estación.

Ecuación 3-36. Formulación del modelo de calefacción en sus diferentes opciones

Opción 1

$$Q = a_{C1} \cdot Q_{PER} + b_{C1} \cdot \eta_{CAL} \cdot Q_{GAN-SOL} + c_{C1} \cdot \eta_{CAL} \cdot Q_{GAN-FI}$$

Esta es la opción óptima, en la que se diferencian las pérdidas de las ganancias solares e internas. Es el nivel de mayor complejidad puesto que implica la caracterización del uso (combinación entre horario y fuentes internas) por separado.

Opción 2

$$Q = a_{C2} \cdot Q_{PER} + b_{C2} \cdot \eta_{CAL} \cdot Q_{GAN-SOL} - \eta_{CAL} \cdot Q_{GAN-FI}$$

La opción dos está vinculada a la anterior. En este caso se fija el coeficiente de fuentes internas a la unidad. Es una opción deseada cuando el edificio tiene importantes ganancias solares y se quiere diferenciarlas de las ganancias internas.

Opción 3

$$Q = a_{C3} \cdot Q_{PER} + b_{C3} \cdot \eta_{CAL} \cdot [Q_{GAN-SOL} + Q_{GAN-FI}]$$

La penúltima opción es la más típica. En ella aparecen dos coeficientes de ajuste: a_{C3} referido a las pérdidas y b_{C3} referido a las ganancias.

Opción 4

$$Q = a_{C4} \cdot Q_{PER} - \eta_{CAL} \cdot [Q_{GAN-SOL} + Q_{GAN-FI}]$$

Finalmente la opción 4 es una simplificación de la opción 3, donde el coeficiente corrector de las ganancias queda fijado a la unidad.

Dónde cada uno de los sumandos queda definido como:

$$Q_{PER} = \left[\frac{U_m}{V/A_T} + n \cdot \rho \cdot C_p \right] \cdot h \cdot GD \cdot 24/1000$$

Ecuación 3-37. Pérdidas por transmisión y ventilación para el modelo de calefacción

Siendo: h la altura media de los espacios [m], GD los grados día modificados [°C], $\rho \cdot C_p$ las propiedades del aire, n el número de renovaciones hora equivalentes [h⁻¹] debidas a la ventilación e infiltración, V el volumen del edificio [m³], U_m el coeficiente global de transferencia promedio del edificio [W/m²·°C], y A_T el área de transferencia del edificio referido a U_m .

$$Q_{GAN-SOL} = ASSE \cdot I_S$$

Ecuación 3-38. Formulación de ganancias solares para el modelo de calefacción

Siendo: A_v el área total de ventanas del edificio [m²], A_a el total de área acondicionada del edificio [m²], g el factor solar de los vidrios orientados al sur, ASSE el área solar sur equivalente por unidad de área de ventana del edificio, y la radiación solar incidente en orientación sur [kWh/m²].

$$Q_{GAN-FI} = \phi \cdot t$$

Ecuación 3-39. Formulación de ganancias internas

En este caso las ganancias de energía debidas a las fuentes internas del edificio quedan caracterizadas a partir de la duración del periodo de cálculo t y del parámetro ϕ [kWh/m²] calculado a partir de los valores de ocupación, iluminación y equipos en la base de integración elegida.

Notas:

1. Cada uno de los parámetros referidos al edificio se debe calcular previamente, u obtenerlo de un software de simulación energética de edificios.

2. La formulación se ha realizado para la demanda, pero como ya se ha dicho antes, la demanda y el consumo quedan vinculados a partir de la relación de demandas y el rendimiento.

3.3.3.6.2. Refrigeración

El modelado para la demanda de refrigeración se sigue una exposición análoga a la usada en calefacción, con la excepción, de que se añade el efecto de una medida de ahorro de energía en demanda como es la ventilación nocturna. El resto de medidas típicas quedan explícitas en la formulación de los sumandos de ambos modelos, tanto calefacción como refrigeración. Es por esto que se ha decidido estudiar y desarrollar el modelo de refrigeración incluyendo esta medida tan común.

Ecuación 3-40. Formulación del modelo de refrigeración en sus diferentes opciones

Opción 1

$$Q = a_{R1} \cdot \eta_{REF} \cdot Q_{PER-R} + b_{R1} \cdot Q_{GAN-SOL} + c_{R1} \cdot Q_{GAN-FI} + e_{R1} \cdot \eta_{REF} \cdot Q_{NC}$$

Opción 2

$$Q = a_{R2} \cdot \eta_{REF} \cdot Q_{PER-R} + b_{R2} \cdot Q_{GAN-SOL} - Q_{GAN-FI} + e_{R2} \cdot \eta_{REF} \cdot Q_{NC}$$

Opción 3

$$Q = a_{R3} \cdot \eta_{REF} \cdot Q_{PER-R} + b_{R3} \cdot [Q_{GAN-SOL} + Q_{GAN-FI}] + e_{R3} \cdot \eta_{REF} \cdot Q_{NC}$$

Opción 4

$$Q = a_{R4} \cdot \eta_{REF} \cdot Q_{PER-R} + b_{R4} \cdot [Q_{GAN-SOL} + Q_{GAN-FI}] + e_{R4} \cdot \eta_{REF} \cdot Q_{NC}$$

Opción 5

$$Q = a_{R5} \cdot \eta_{REF} \cdot [Q_{PER-R} + Q_{NC}] + b_{R5} [Q_{GAN-SOL} + Q_{GAN-FI}]$$

Las diferentes opciones que ofrece el modelo de refrigeración quedan justificadas con un razonamiento idéntico al realizado para calefacción pero teniendo en cuenta:

- La zona climática del edificio junto a su uso, para la duración de la estación. Fijada la duración de la estación se eligen las opciones posibles.
- La segunda decisión hay que tener en consideración la necesidad de tener las pérdidas debidas a ventilación nocturna por separado. Lo cuál descarta o no la opción 5.
- Por último la semejanza de los datos disponibles, ya que la estación de refrigeración coincide con el periodo estival y con los cambios de horarios en los edificios terciarios.

Es importante comentar como se diferencia la cubierta del resto de cerramientos debido al efecto de la radiación sobre la misma, y como aparece el efecto del enfriamiento nocturno. Es por ello que el término de pérdidas modificado Q_{PER-R} con el efecto de la cubierta U_c separado del resto de cerramiento U_{m-sc} ; además el efecto de la radiación incidente se tiene en cuenta modificando los grados días GD_{mc} , como se analiza en las siguientes líneas.

$$Q_{PER-R} = \left[\frac{U_{m-sc}}{V/A_T} + n \cdot \rho \cdot C_P \right] \cdot h \cdot GD \cdot \frac{24}{1000}$$

Ecuación 3-41. Pérdidas por transmisión y ventilación para el modelo de refrigeración

El enfriamiento nocturno, medida de ahorro más común para reducir la demanda de refrigeración, se modela como unas renovaciones de hora durante las horas de noche GD_{NOCHE} .

$$Q_{NC} = n_{NOCHE} \cdot \rho \cdot C_P \cdot h \cdot GD_{NOCHE} \cdot 24/1000$$

Ecuación 3-42. Formulación de ventilación nocturna para el modelo de refrigeración

3.3.3.7. Obtención de parámetros característicos

Breve párrafo de las dos opciones posibles de cálculo de parámetros.

A continuación se describe la metodología de obtención de los parámetros característicos del modelo. Esta metodología presenta dos opciones: la opción analítica, a partir de la formulación teórica de estos parámetros; y la opción vía simulación, donde a través de pasadas selectivas usando una herramienta BEPS detallada en paso de simulación horario se pueden deducir los valores de una forma más efectiva.

3.3.3.8. GD efectivos: corrección por uso e intermitencia

Como ya se ha dicho en las páginas anteriores, es necesario cuantificar unos grados días efectivos, es decir, poder tener en cuenta las paradas del sistema, los días festivos, los periodos vacacionales... No obstante, la experiencia y la aplicabilidad del método con datos reales, conduce a definir un procedimiento de cálculo de los GD efectivos partiendo de los GD convencionales, y pudiendo corregir este valor hasta obtener los GD efectivos.

Los GD convencionales, no son más que la integral de la diferencia entre la temperatura exterior y la temperatura consigna fijada, como se ha expresado anteriormente. Hay que destacar que actualmente en los procedimientos mensuales se utilizan los grados días considerando una temperatura de consigna interior dada (una para calefacción y otra para refrigeración), las 24h de los 365 días del año, GD convencionales. Ahora bien, al ser una variable que representa el comportamiento en una base de tiempo diaria, cabe pensar que sería coherente poder calcular esta variable sin pasar por el valor horario de temperatura. Para responder a esta pregunta se realizó una revisión de publicaciones particular, encontrando el siguiente resultado [174].

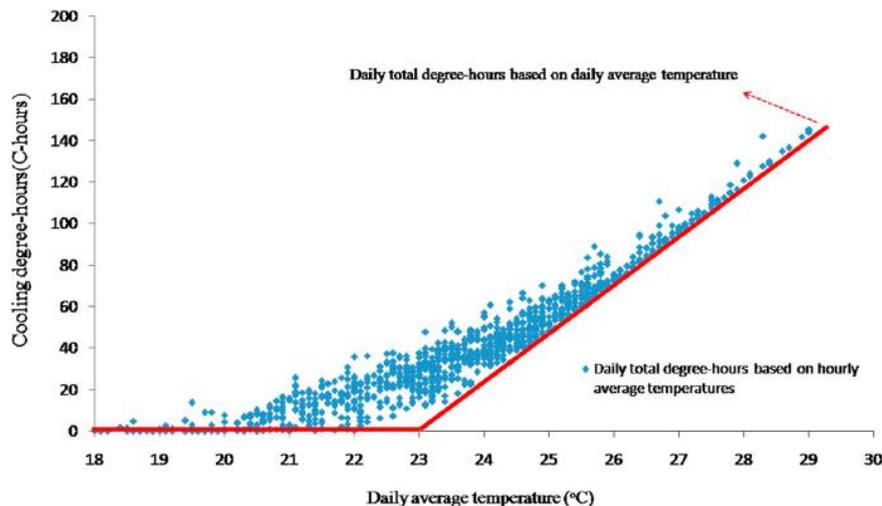


Figura 3-5. Grados día de refrigeración: diferencia entre el cálculo de los mismos en base horaria, o bien a partir de la temperatura media exterior. Fuente [174]

Las diferencias que se tienen con los dos cálculos son considerables, sobre todo en la región de temperaturas medias diarias 20-25°C, que son típicas de las estaciones intermedias o de inicio/fin de calefacción y refrigeración. Este dato potencia la decisión de calcular los grados día de cada mes mediante los valores horarios, siempre que se pueda, y con mayor requerimiento en edificios del sector terciario. Es evidente que de esta el procedimiento es más estable en los meses intermedios, incluso cuando hay inversiones térmicas a lo largo del día.

Otro de los resultados que se añade a la conclusión anterior es: si el modelo es obtenido a partir de datos de una simulación detallada, se contabilizarán los GD asociados a los días en los que ha habido carga, es decir, solo aquellos días en los que su demanda integrada sea superior al percentil 10 del resto de días de

la estación.

Cuando los resultados procedan de valores medidos, bien por facturas o bien por datos experimentales, lo dicho en el párrafo anterior no sería aplicable por lo que en las siguientes líneas se describe otra vía.

Recalcando algo ya comentado: el punto de partido son los GD convencionales obtenidos a partir de la definición de una temperatura de consigna y con los históricos climáticos; pero teniendo en cuenta que existen periodos de parada, quizás menos importantes en el sector residencial que el terciario, pero en general bastante influyentes en las demandas de calefacción. Por este motivo se ha creado un parámetro de corrección de los grados días para tener en cuenta este suceso cuando el cálculo de los mismos se hace en base diaria.

Sector residencial

Se debe calcular una temperatura promedio diaria mensual que tenga en cuenta los dos periodos: no operación (NO), y operación en consigna (O). Para residencial, los periodos de no operación se corresponde con la noche. Es decir que se tenga en cuenta la intermitencia constante del equipo de acondicionamiento.

$$T_{INT-PROMEDIO} = (T_{INT-NO} \cdot N_{H-NO} + T_{INT-CONSIGNA} \cdot N_{H-O}) \cdot \frac{1}{24}$$

Ecuación 3-43. Cálculo de la temperatura interior promedio diaria en edificios residenciales

La temperatura promedio en el periodo de no operación se puede aproximar con la siguiente fórmula, en la que se supone dominante la constante principal del sistema para caracterizar la evolución temporal de la temperatura del aire anterior

$$T_{INT-NO} = T_{EXT} + \frac{\tau}{N_{H-NO}} \cdot (T_{INT-CONSIGNA} - T_{EXT}) \left(e^{-\frac{N_{H-NO}}{\tau}} - 1 \right)$$

Ecuación 3-44. Temperatura interior promedio para los periodos de no climatización

La constante de tiempo debe estimarse con la información descrita en el epígrafe del factor de utilización o bien, extraerse de una simulación detallada.

Con esta nueva temperatura interior promedio se obtiene el factor corrector mensual para los grados día usando la siguiente fórmula:

$$FGD_{Mes-i} = \frac{T_{INT-PROMEDIO} - \overline{T_{EXT-i}}}{T_{INT-CONSIGNA} - \overline{T_{EXT-i}}}$$

Ecuación 3-45. Factor corrector de intermitencia para GD en edificios residenciales

Por consiguiente, los grados día modificados para tener en cuenta los periodos de parada resultan:

$$GD_{mod-i} = FGD_{Mes-i} \cdot GD_i$$

Ecuación 3-46. Grados día modificados

Sector terciario

En este caso las dificultades son aún mayores debido a que existen muchas más discontinuidades en lo referido al uso y a la inversión térmica más acusada por culpa de las fuentes internas. Es por este motivo que se recomienda el cálculo de los grados día de forma detallada: integrando hora a hora para cada día. Para ello se requiere conocer los horarios de uso, paradas, festivos... además para su cálculo se tomará como temperatura interior 25°C para la consigna de refrigeración y 20°C para la de calefacción. Si esta vía no fuera posible, es aplicable la vía residencial, no teniendo en cuenta los días de parada total tipo fin de semana.

3.3.3.9. ASSE y ganancias solares

El área solar sur equivalente ASSE, se obtiene a través del cálculo del $ASSE_{ij}$ en cada orientación j para cada mes i , y realizando un promedio ponderado por el área de ventana para orientación, como ya se ha comentado. Por lo que existe un valor del ASSE para cada mes, al depender de la radiación RT_i . Este valor no será corregido por el uso si no que se corregirá el valor integrado de radiación utilizada en el procedimiento RT_{mod-i} , eliminando los días festivos o no considerados en el cálculo de GD, pero no se tendrán en cuenta las horas de parada durante el día.

Cuando los datos procedan de una simulación detallada, se contabiliza como RT_{mod-i} la radiación integrada en los días con demanda, teniendo en cuenta incluso el efecto de las protecciones solares o sombras conocidas sobre cada orientación.

Hay que comentar que en la aplicación “4.4 Aplicación 4: Corrección/Calibración”, se pone como ejemplo el proyecto ENCERTICUS donde directamente se realiza la corrección de las condiciones climáticas y del uso sobre el modelo, sin realizar un cálculo efectivo de los efectos climáticos.

3.4. IDENTIFICACIÓN

La identificación es la interacción de los modelos anteriores con los datos experimentales, es decir, es el cálculo de aquellos coeficientes o parámetros que hacen que los modelos simplificados se ajusten con calidad a los datos experimentales.

El proceso de identificación se puede resumir de forma simplificada con el siguiente esquema.

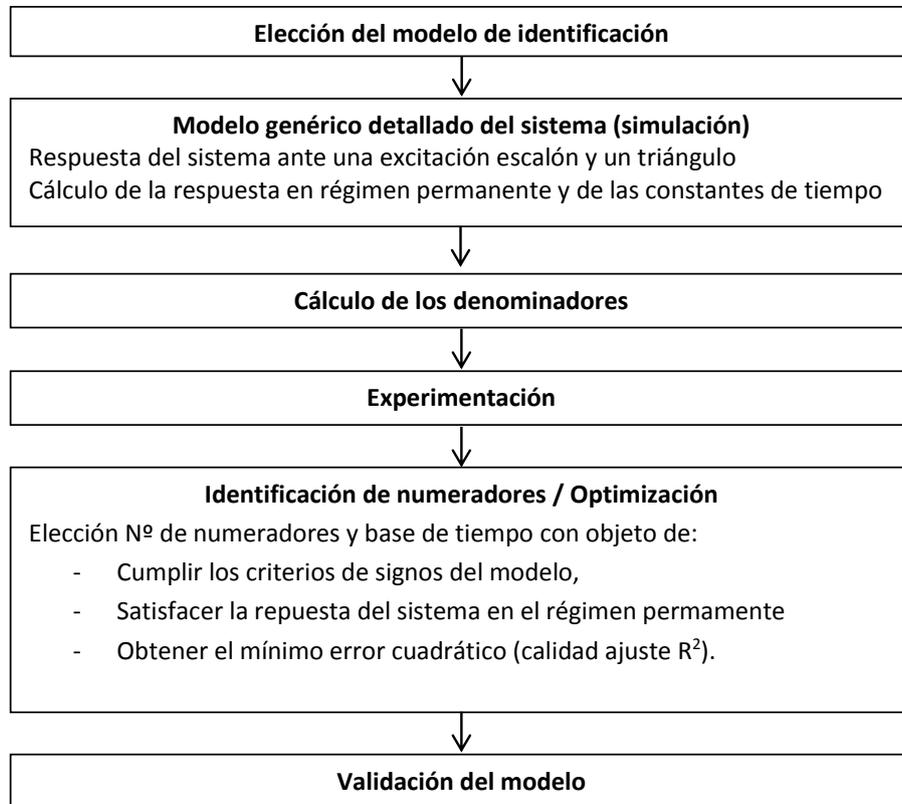


Figura 3-15. Esquema Genérico para la identificación del modelo

Este esquema muestra como el modelo simplificado interactúa con el modelo detallado para la realización del proceso de reducción. Ahora bien, la calidad con la que el modelo detallado refleje la realidad del sistema permitirá fijar o no el valor de los denominadores. Si es posible fijar los denominadores es conveniente hacerlo, ya que las mediciones sobre edificios existentes suelen tener mucho ruido y ser escasas, por lo que la reducción de grados de libertad del modelo para el proceso de identificación se ha demostrado que es positivo.

En el caso de que sea inviable la generación de un modelo detallado el esquema de identificación se ve ligeramente modificado. Las dos figuras siguientes muestran esta modificación.

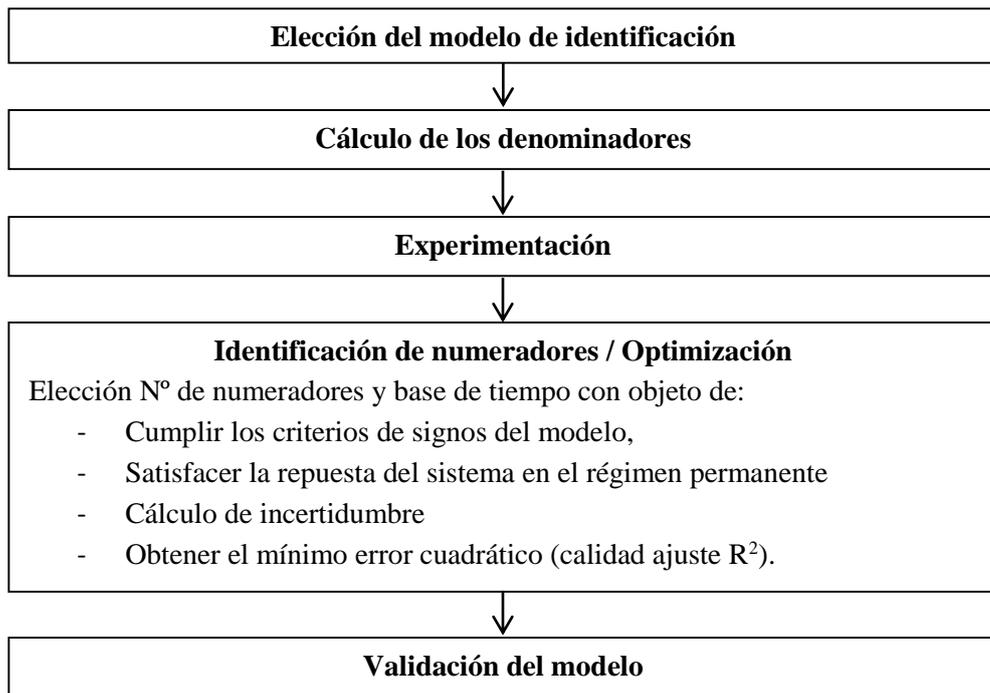


Figura 3-16. Esquema Genérico para la identificación del modelo (opción A)

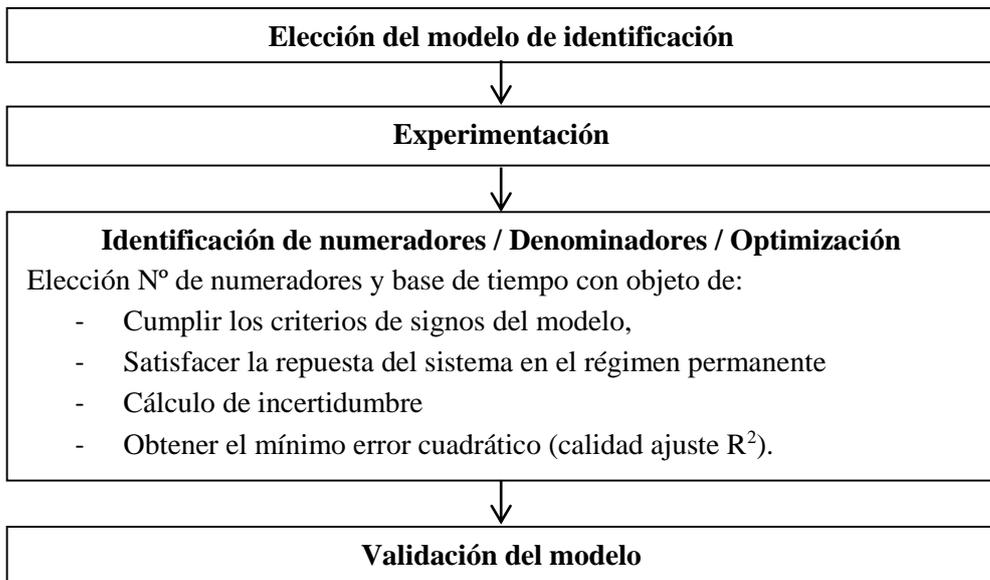


Figura 3-17. Esquema Genérico para la identificación del modelo (opción B)

Aparecen dos opciones para la jerarquía de modelización, de acuerdo a las dos posibles situaciones: opción A, se conozcan / se puedan calcular las constantes de tiempo del sistema, o bien se trabaje en una base de tiempo a nivel horaria; opción B, no se conozcan las constantes de tiempo y la base de tiempo sea diaria o referida al periodo de operación del edificio.

En el ejemplo teórico que se desarrolla en el anexo 5 - aplicación 1, se explica y desarrolla el proceso graficado en las figuras anteriores.

3.5. VALIDACIÓN Y ACEPTACIÓN

Este epígrafe resume las principales pruebas estadísticas a realizar al modelo para validarlo y aceptarlo a partir de los datos experimentales, y a la incertidumbre transmitida desde las variables independientes del modelo (realidad medida), el nivel de ajuste (calidad de la identificación) y aplicación del modelo (validez y extrapolación).

La referencias [7], [175], destacan como algunas de las más referenciadas en el campo de la identificación, proponen el análisis de covarianza. Este análisis consiste en el cálculo de la covarianza asociada al modelo con la siguiente expresión:

$$\text{Cov}(\theta) = \lambda^2 \cdot (\Phi^T \cdot \Phi)^{-1}$$

Ecuación 3-47. Covarianza del modelo

Siendo λ la varianza de los residuos, ϕ la matriz de parámetros identificados que responde al óptimo encontrado.

$$Y = \phi \cdot X + e$$

Ecuación 3-48. Formulación genérica del modelo

Donde Y es la variable objetivo, X son las excitaciones (inputs del modelo) y e son los residuales obtenidos. ϕ es la matriz de numeradores y denominadores asociada al modelo.

La varianza de los residuos queda calculada como:

$$\lambda^2 = 2 \cdot V(\theta) / (N - m)$$

Ecuación 3-49. Varianza de los residuos

Siendo N el número de observaciones, m el número de parámetros (dimensión de ϕ), y θ una variable auxiliar que identifica al estimador de mínimos cuadrados (función objetivo). A su vez $V(\theta)$ es la función de pérdidas, es decir, la variable que relaciona los residuos con los valores de los parámetros identificados.

$$V(\theta) = 0.5 \cdot e^T [I - \phi \cdot (\phi^T \phi)^{-1} \cdot \phi^T] e$$

Ecuación 3-50. Función de pérdidas: relación entre residuos y parámetros identificados

La covarianza tiende a un valor mínimo en función de la calidad del ajuste, en cambio la varianza solo tiende a ese valor a medida que el número de observaciones se hace muy grande. Con la covarianza se juzga el ajuste, con la varianza se puede establecer un criterio de necesidad de más datos experimentales (si la varianza decrece más de un 5% al incrementar 1% los datos experimentales se puede concluir que la muestra obtenida no es suficientemente rica).

La función de pérdidas ayuda a juzgar la necesidad de aumentar el número de parámetros en el modelo, es decir, si hay que ampliar el número de numeradores. Esta función tiene una asíntota a medida que el número de parámetros tiende a infinito como cabía esperar, cuantas más variables jueguen en la regresión mejor podrá ser el ajuste obtenido, siempre y cuando, se verifique la hipótesis de ruido blanco (el ruido tiene como valor medio un número cercano a cero). Esto significa que existe un número de parámetros óptimo, es decir, el mínimo número que verifica el valor mínimo de la función de pérdidas.

No existe una técnica reconocida que permita estimar el número óptimo de parámetros para la tipología de modelo definida MCS, por lo que, la mejor solución es el análisis de la calidad del modelo cuando se aumenta o se reducen el número de parámetros (los parámetros referidos son principalmente el número de numeradores elegidos en el modelo). La solución propuesta es la más extendida en las publicaciones revisadas, no obstante, presenta una interpretación negativa y bastante extendida entre los autores: añadir más parámetros es equivalente a añadir nuevas variables. Estas nuevas variables, como puede ser la apertura de puerta interiores en un edificio o el consumo de electricidad en los enchufes de un espacio,

no son conocidas ni medibles con la calidad suficiente que exige la caracterización física del sistema.

La validación del modelo debe satisfacer:

- Flexibilidad del modelo de acuerdo a los datos existentes y a los posibles
 - Función de pérdidas para evaluar el número de numeradores elegido
 - Propiedades singulares de la matriz de coeficientes: ceros, cancelaciones...
 - Consistencia: verificación de permanentes y propiedades físicas exigibles.
- Test estadísticos sobre las tendencias y las salidas del modelo:
 - Autocorrelación de residuales
 - Correlación cruzada
 - Cambios en los residuales
 - Robustez en la presencia de outliers
 - Invarianza
 - Feedback, no hay dependencia de los residuales futuros con la salida actual del modelo
 - R2
 - Errores de regresión
 - Errores en los parámetros

Por consiguiente, de la revisión bibliográfica realizada y de las aplicaciones desarrolladas se concluye que la validación del modelo de mayor seguridad es la ejecución del modelo con otros datos experimentales y comparar los resultados del modelo con los datos reales medidos en estas nuevas condiciones. Con esos datos nuevos datos experimentales conviene realizar los test estadísticos anteriores en el caso de que la prueba haya sido favorable.

3.6. EXPLOTACIÓN DE MCS

3.6.1. Evaluación y Verificación de ahorros

La siguiente figura muestra la necesidad de que el MCS proporcione el consumo de energía que “hubiese habido” si el edificio no hubiera sido mejorado, es decir, si el edificio se conservará en la situación de partida.

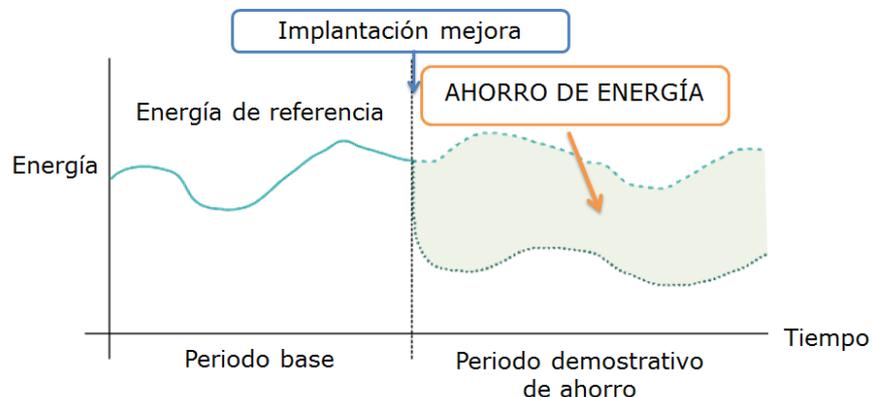


Figura 3-18. Esquema del procedimiento para la evaluación de ahorros o análisis de sensibilidad

Ahora bien la obtención del modelo requiere realizar un periodo de monitorización sobre la situación de partida del edificio, es decir, requiere la monitorización de un periodo base que represente el

comportamiento energético del edificio. Una vez elegido ese periodo e inventariada esa situación de referencia se procede con el esquema de caracterización, tal y como muestra la siguiente figura:

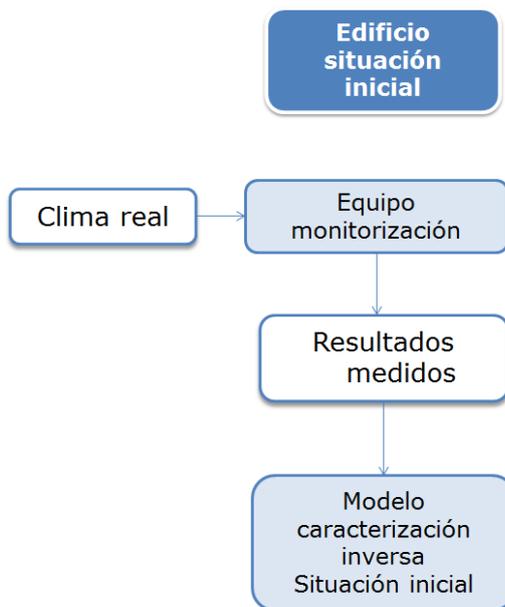


Figura 3-19. Esquema del procedimiento para la evaluación de ahorros o análisis de sensibilidad

Por último, teniendo el MCS identificado, se procede a excitarlo con los datos medidos de la situación mejorada, es decir, con las condiciones climáticas y/o interiores reales. Con estas excitaciones resultarán esos consumos que se perseguían, es decir, los consumos que hubiera habido si no se hubiera modificado el edificio o sus sistemas.

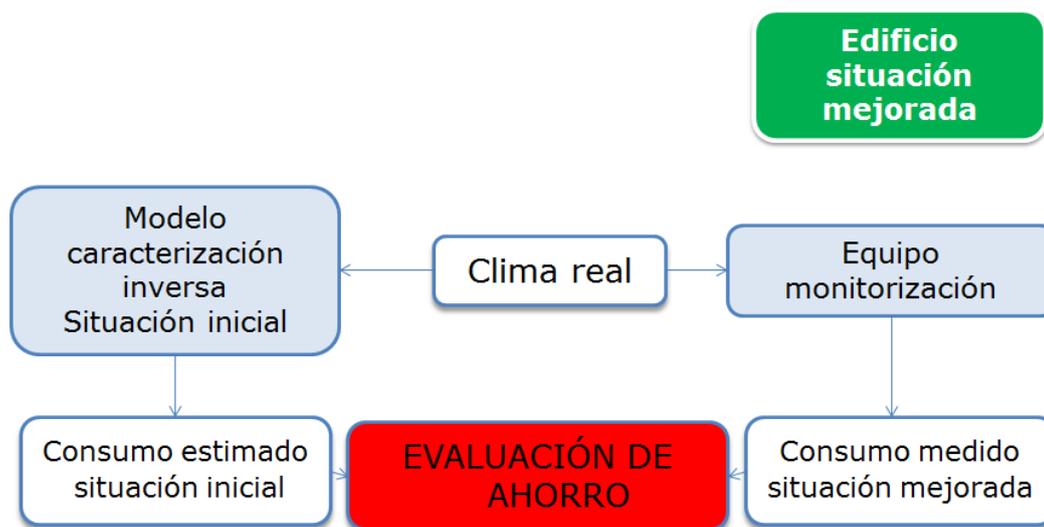


Figura 3-20. Esquema del procedimiento para la evaluación de ahorros o análisis de sensibilidad

A la vista de la figura cabe señalar que el ahorro se obtiene directamente comparando el valor real medido de la situación actual y mejorada del edificio, con el valor estimado por el MCS con las excitaciones reales de la situación mejorada medida.

3.6.2. Gestión energética

Para demostrar la explotabilidad del MCS como herramienta de predicción de consumos en Gestión Energética se usan los datos medidos sobre el edificio BLUENET (Sevilla) obtenidos en el marco del proyecto CHORUS. Estos datos están referidos al consumo de fuerza. El objetivo principal es mostrar la

capacidad de adaptación y aprendizaje del MCS estimando consumos integrados en paso de tiempo horario. Para ello se muestran los resultados obtenidos en la predicción del consumo de Fuerza (KWh) de los días 7, 8, 9 y 10 de Octubre, comenzando la estimación en diferentes horas del día y tomando como cierto los instantes anteriores.

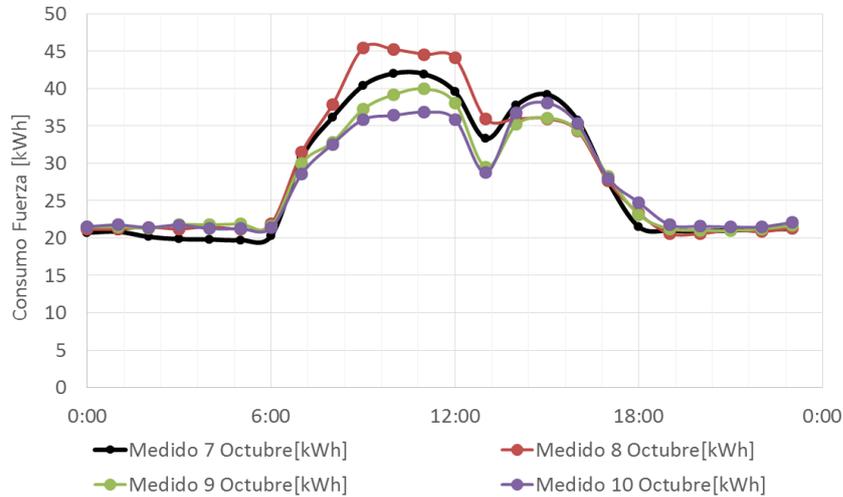


Figura 3-21. Consumo medido de Fuerza (KWh)

- Predicción 7 Octubre

En el caso del Lunes a predecir (7 de Octubre), la estimación cuando se arranca a las 0:00 ya es ajustada al consumo real medido para dicho día, lo cual era de esperar debido a la similitud de la evolución del consumo de ese día con respecto a los días tipo Lunes incluidos en la creación de patrón y modelo.

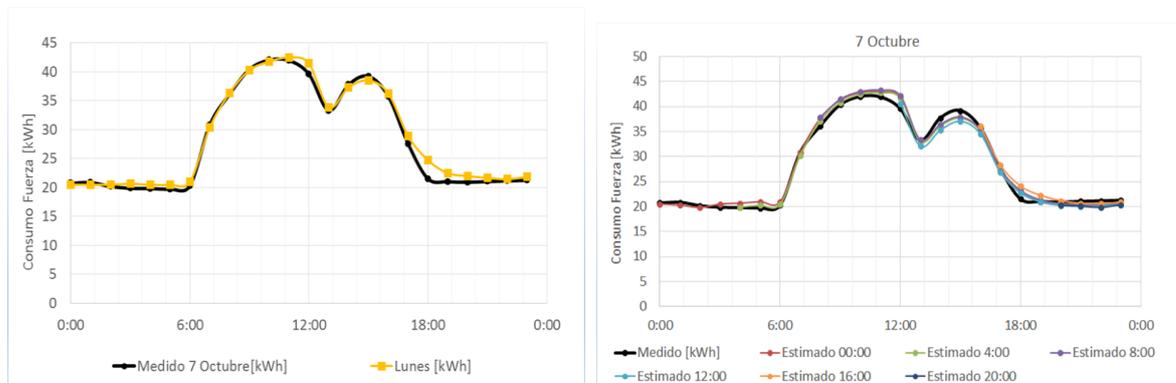


Figura 3-22. Estudio de la predicción realizada el día 7 de Octubre para Fuerza (KWh)

En el caso de martes, miércoles y jueves como se puede observar en las figuras mostradas a continuación, se produce una variación claramente diferenciada a la evolución tipo para los mismos.

- Predicción 8 de Octubre

En el caso del Martes, si la predicción arranca a las 0:00, se puede observar como tiende a estimar la evolución del consumo para dicho día similar a la evolución típica de los Martes y por tanto comete errores elevados por ejemplo de 12-18 h en el consumo de Fuerza, pero se observa como arrancando el modelo a las 16:00, y considerando como cierto todo lo anterior, el mismo ha sido capaz de adaptarse a la “no subida” del consumo que era producida a las 12:00.

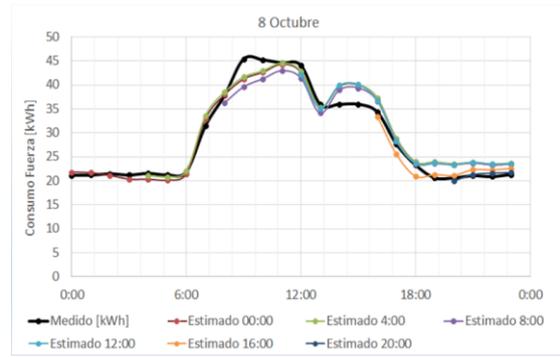
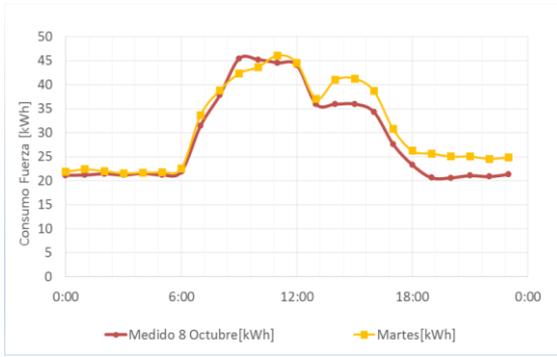


Figura 3-23. Estudio de la predicción realizada el día 8 de Octubre para Fuerza (KWh)

- Predicción 9 de Octubre

En este caso también se comprueba la adaptabilidad del modelo viendo como arrancando la predicción a las 12:00, la estimación tiende a bajar ya que el modelo se está alimentando de la bajada real que se produce con respecto al consumo tipo para dicho día.

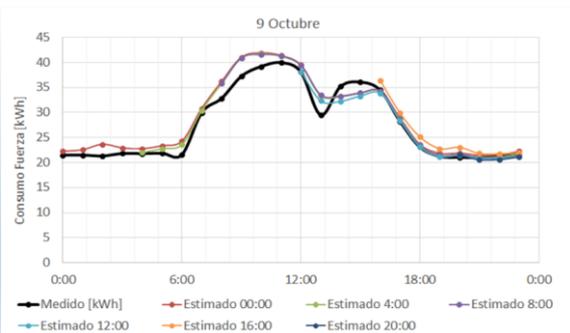
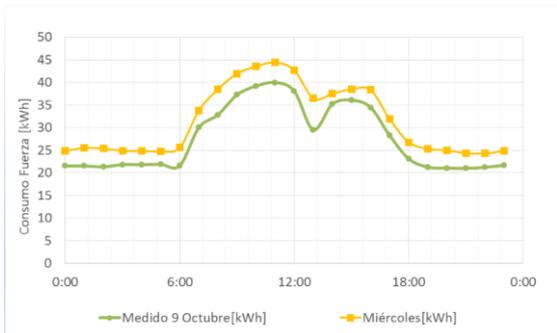


Figura 3-6. Estudio de la predicción realizada el día 9 de Octubre para Fuerza (KWh)

- Predicción 10 de Octubre

En el último caso también se observa una clara adaptabilidad del modelo. La curva de evolución del consumo para el día 8 de Octubre está desplazada hacia abajo en comparación a la curva representativa del día de la semana a estudio. El arranque del modelo a las 0:00 y 4:00 aún no ven dicho descenso, sin embargo a partir del arranque a las 8:00, y como en casos anteriores, tomando como cierto los instantes anteriores, el modelo adapta claramente la estimación al consumo real medido para dicho día.

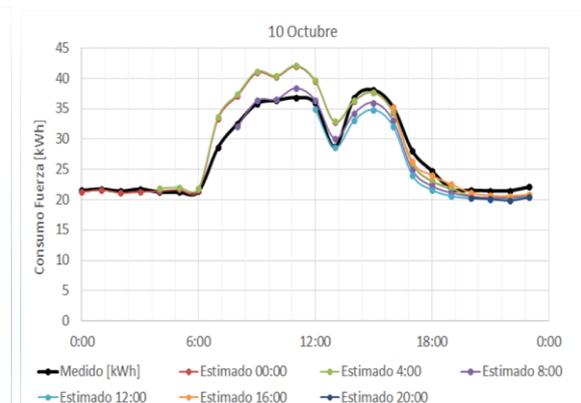
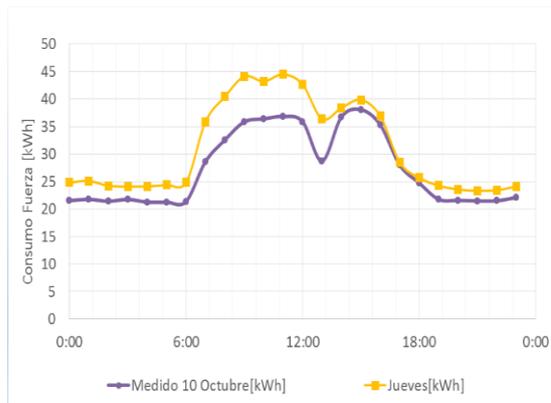


Figura 3-7. Estudio de la predicción realizada el día 10 de Octubre para Fuerza (KWh)

Este ejemplo queda complementado con el texto desarrollado en la "Aplicación 3 – CHORUS", donde se usa el MCS para estimar consumos integrados en diferentes bases temporales.

3.6.3. Caracterización de componentes o sistemas

Este producto responde a la necesidad de caracterizar nuevos componentes o sistemas innovadores probablemente a nivel prototipo. Esta caracterización esta exigida para el desarrollo de estas soluciones innovadoras como se ve a continuación. Pero antes se muestra el esquema de actuación sobre el prototipo a estudio:

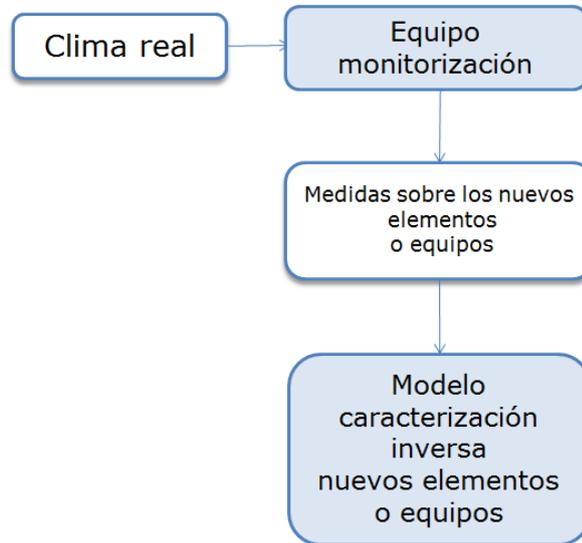


Figura 3-8. Esquema de caracterización de componentes o sistemas

La realización de una serie de ensayos sobre el Sistema/componente permite la identificación del MCS. En la mayoría de los casos ambas utilidades requieren un entorno para ejecutarse y también para referenciarse. Es por ello que una opción, en energética edificatoria, es vincular este MCS identificado para el sistema/componente en una herramienta de simulación detallada BEPS. De esta forma se tiene una herramienta calibrada

Obtenido el modelo identificado del componente o sistema destacan las dos grandes utilidades:

- Análisis de sensibilidad: herramienta de diseño con mayor exactitud que los modelos analíticos por eliminar la necesidad de hipótesis y los gastos computacionales asociados.
- Verificación de ahorros: herramienta de evaluación y estimación de ahorros si se hace sobre una herramienta BEPS no calibrada, y herramienta de verificación de ahorros si la herramienta BEPS ha sido calibrada previamente.

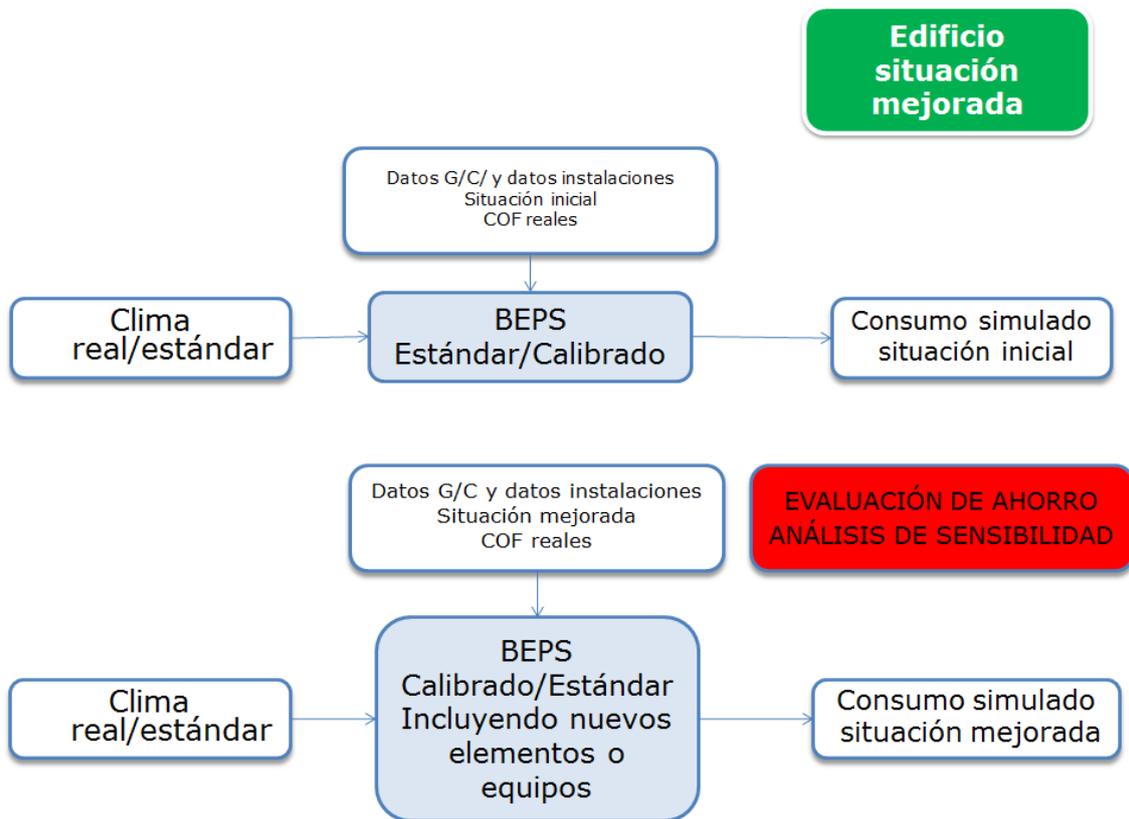


Figura 3-9. Esquema del procedimiento para la evaluación de ahorros o análisis de sensibilidad en base de diseño de componentes/sistemas innovadores

Finalmente, la herramienta de simulación del comportamiento energético del edificio BEPS calibrado o estándar, pero con el sistema/componente definido en el edificio al integrar en el BEPS el MCS identificado, puede ejecutarse con el clima real o el clima estándar que se desee siendo una herramienta de enorme utilidad.

3.6.4. Calibración de software detallado BEPS

Este producto de la tesis está vinculado a la caracterización térmica de edificios y la calibración de herramientas de simulación del comportamiento energético de los mismos. La metodología aplicada de caracterización térmica inversa para edificios es un protocolo innovador, que persigue dar solución a las aplicaciones vinculadas a la monitorización de edificios. Las dos aplicaciones más importantes son: la evaluación y verificación de ahorros, y la corrección y validación de herramientas de simulación del comportamiento energético de edificios BEPS.

En síntesis, la aplicación de la metodología de caracterización térmica inversa para edificios debe permitir:

- Obtener un modelo simplificado a partir del conocimiento reducido de un modelo detallado
- Poder identificar los parámetros del modelo simplificado a partir de datos experimentales, de esta forma obtener un modelo de caracterización simplificado, que sea válida para una amplia variedad de sistemas (componentes, zonas, elementos, edificios completos...), de diferentes inercias. Debe permitir ser válido para diferentes pasos de tiempo.
- Validación del modelo detallado a partir de datos procedentes del edificio, medidas puntuales o inventario energético. En su defecto corrección.
- Calibración/identificación del modelo detallado a partir del modelo simplificado, es decir, transformar el modelo simplificado en un "laboratorio ideal".

El siguiente esquema muestra todas estas conclusiones integradas: cómo los datos reales no se relacionan directamente con la herramienta detallada, sino que se pasa por el modelo de caracterización simplificado. De esta forma todo lo que vea el modelo de caracterización simplificado se podrá calibrar en la herramienta detallada, eliminando cualquier influencia no medida o no caracterizada en la vía simplificada. Este paso intermedio supone una etapa innovadora, tal y como se justifica en la revisión específica del estado del arte junto con la información referente al procedimiento de calibración.

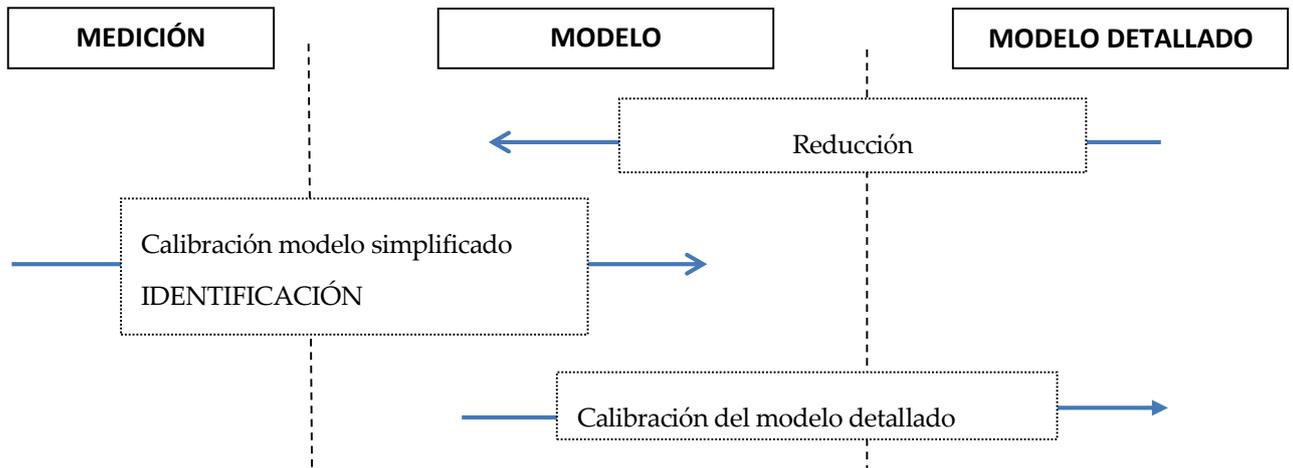


Figura 3-10. Esquema del proceso básico que define la metodología aplicada de caracterización inversa para edificios

Cabe comentar que a lo largo del trabajo doctoral se analizó la posibilidad de vincular los datos experimentales directamente con el modelo detallado, tal y como aparece en algunas referencias. Dentro del marco de la línea propuesta por la tesis esta opción aparece de la siguiente forma:

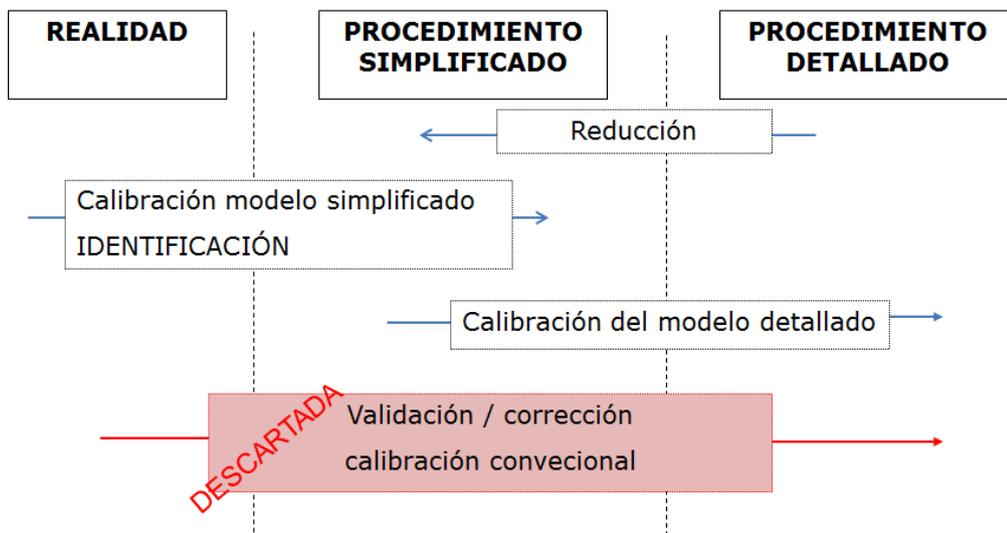


Figura 3-11. Esquema del proceso básico que define la metodología aplicada de caracterización inversa para edificios – versión ampliada

En la tesis se descarta la opción de calibrar un procedimiento detallado comparándolo únicamente y directamente con los datos experimentales medidos; sino que en la tesis se apuesta por la calibración combinada entre, la comparación del procedimiento detallado con el procedimiento simplificado y la modificación de la herramienta detallada con los parámetros característicos del edificio y sus sistemas medidos de una auditoría energética o de campañas experimentación en detalle del edificio. De esta forma el procedimiento queda:

1. Obtención del procedimiento simplificado a partir de la reducción del procedimiento detallado
2. Identificación del modelo o procedimiento simplificado
3. Auditoría energética para el cálculo de parámetros característicos: rendimiento, caudales, pérdidas de carga, pérdidas, coeficiente global de transferencia, caudales de infiltraciones....
4. Por último, calibración del procedimiento detallado modificado según punto 3, a partir de la comparación con el procedimiento simplificado.

En la tesis se hace referencia a calibración cuando se modifican los parámetros de definición del modelo (variables de entrada e hipótesis) para obtener resultados parecidos a la realidad; y corrección cuando directamente se establecen unas leyes de modificación de los resultados obtenidos con la herramienta. No obstante, aún así los estudios realizados muestran que es siempre más ventajoso pasar por un modelo intermedio simplificado incluso para realizar la corrección (véase el capítulo PSCEEM donde se amplia más información de este desarrollo).

Entre las muchas utilidades que tiene obtener una herramienta de simulación detallada del comportamiento térmico de edificio BEPS destaca la verificación de ahorros como ya se ha comentado antes.

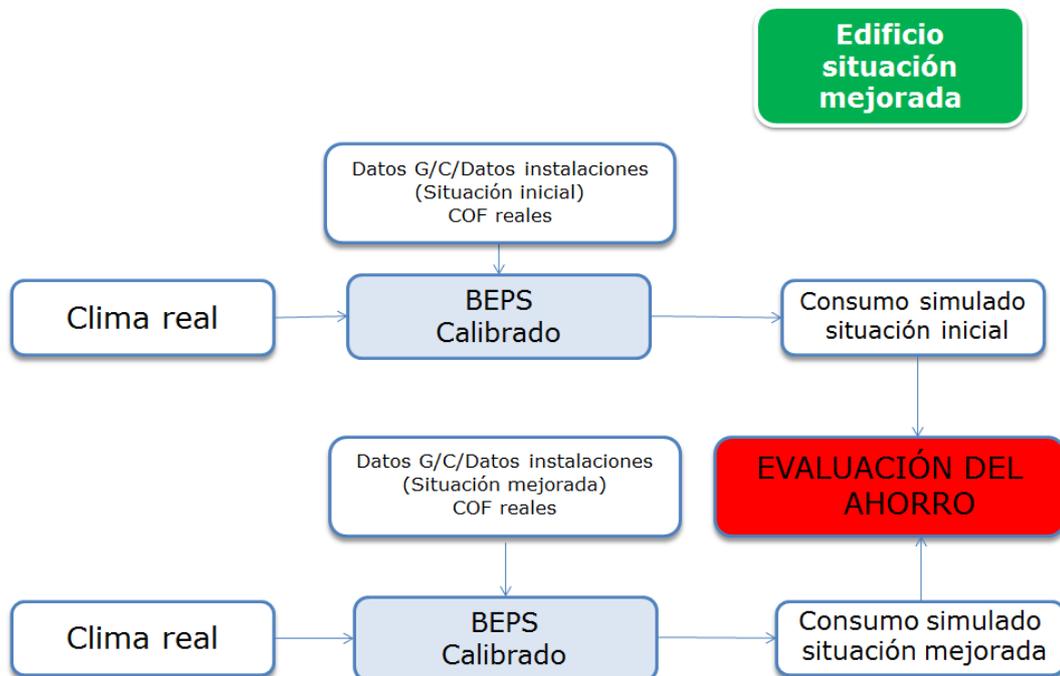


Figura 3-12. Verificación de ahorros a través de BEPS calibrado

4. APLICACIONES MCS

Este capítulo muestra tres de las aplicaciones realizadas en el marco del trabajo doctoral para probar la validez y aplicabilidad del modelo de caracterización simplificado. Las tres aplicaciones elegidas muestran las capacidades del MCS a varios niveles: la aplicación 1 como protocolo de verificación de ahorros, la aplicación 2 como herramienta de diseño de componentes o sistemas innovadores, y la aplicación 3 como solución para la gestión energética como modelo predictivo. Además a lo largo de las aplicaciones se desarrollan y justifican los modelos elegidos.

4.1. APLICACIÓN 1 – SINHOR

4.1.1. Descripción

El modelo de caracterización simplificado atiende a las directrices establecidas en el capítulo dos “Modelo de Caracterización”. Es por ello que en las siguientes líneas se analiza y aplica este producto de la tesis sobre el caso a estudio.

Los principales objetivos son:

- Demostrar las interpretaciones físicas inherente al modelo simplificado
- Demostrar la coherencia del modelo simplificado cuando se cambia de base de tiempo
- Analizar los parámetros estáticos y dinámicos del sistema a través de las relaciones de sus coeficientes
- Discutir las diferentes restricciones físicas establecidas en el proceso de identificación y en muchas ocasiones limitadas por la calidad de datos experimentales

Para llevar a cabo todos los hitos anteriores se usa el prototipo construido en el marco del proyecto financiado por la Agencia de Obra Pública de la Junta de Andalucía. Consejería Fomento y Vivienda. Junta de Andalucía y con título “SINHOR -Análisis del comportamiento energético de cerramientos de homigón para maximizar los beneficios de la inercia térmica”, cuyas características se describen a continuación.

El prototipo en el que se integró la solución SINHOR se construyó en la fábrica de cemento de Alcalá de Guadaira por cortesía del Grupo Cementos Portland Valderrivas.

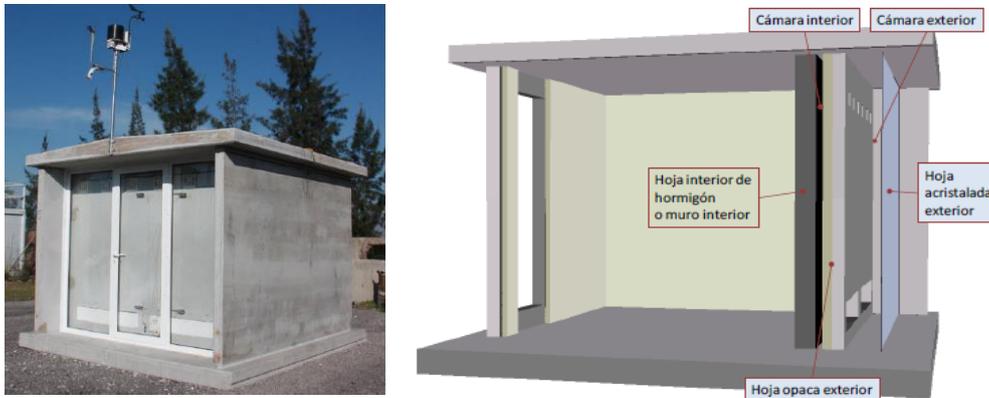


Figura 4-1. Prototipo enclavado en Alcalá de Guadaira

El prototipo se compone de tres tipos de cerramientos: el cerramiento sur, que no está aislado pero tiene una cámara de aire entre dos capas de hormigón; los cerramientos norte, este y oeste, formado por una capa de hormigón y aislante interior; y la cubierta que está aislada en su interior y en mitad de las dos capas de hormigón que la forman. Además el prototipo se encuentra construido encima de una losa de hormigón. El único elemento no opaco que conforma la epidermis es una puerta metálica convencional que también se aísla por el interior con 8cm de poliestireno expandido como el resto de cerramientos a excepción del muro sur.

En cuánto a su geometría, por no entrar en el detalle, se puede asociar a un prisma de base cuadrangular de 3m y altura de 2.4m.

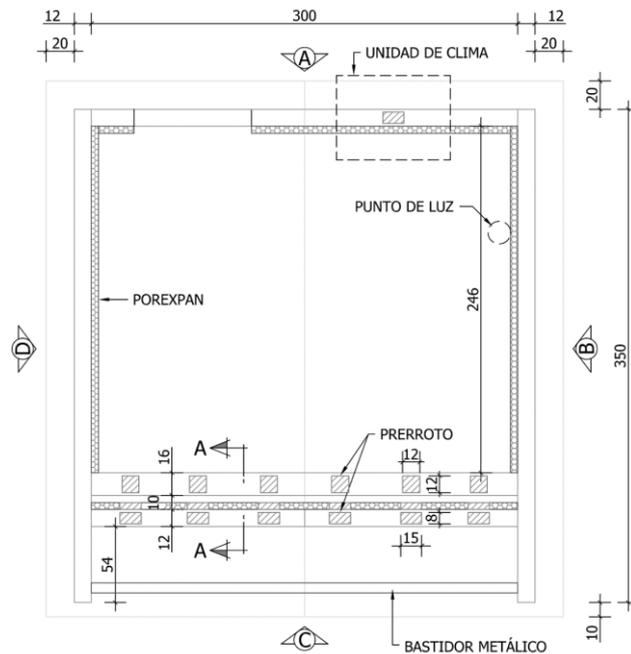


Figura 4-2. Detalle constructivo del prototipo

En lo referido a la sensorización de la experimentación, es necesario conocer los siguientes datos:

- Flujo de calor aportado o retirado de la caseta
- Flujo de calor aportado o retirado por el aire de la cámara
- Condiciones de confort generadas por la solución constructiva
- Condiciones de contorno de la solución constructiva
- Condición operacional de la solución constructiva

En general, el conocimiento de las variables anteriores no se puede determinar por medio de mediciones directas, si no con una combinación de variables. Los sensores de temperatura durante esta etapa de la experimentación fueron:

- 24 termopares tipo T para la medición de temperaturas superficiales y de aire de la cámara
- 8 PT100 para la medición de temperatura del aire interior
- 8 sensores-datalogger Testo para temperatura de aire interior (redundantes con los PT100)
- 1 PT100 para lectura la temperatura exterior
- 1 sensor de temperatura exterior de la estación meteorológica. (se describe junto con la estación meteorológica)

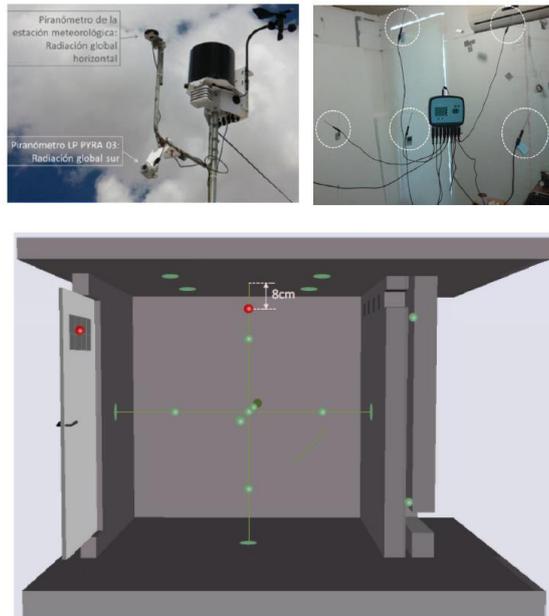


Figura 4-3. Sensores y esquema de monitorización del prototipo

La estación meteorológica, junto con el Piranómetro para la medición de la radiación sur, se ubicó en el techo de la caseta en el extremo sur, dado que en este punto se minimizan los efectos indeseados de sombras externas al experimento y alteraciones en la temperatura y el viento.



Figura 4-4. Vista de la caseta en la que se aprecia la posición de la estación meteorológica

Y por último, los objetivos de esta aplicación en el marco de la tesis doctoral están en consonancia con algunos de los del proyecto, que son:

- Llevar a cabo la construcción de un elemento especial de hormigón, desarrollando la base del conocimiento necesaria para su ejecución en edificios reales.
- Verificar el impacto energético que supone esta medida de ahorro
- Verificar el ahorro energético que supone la ventilación nocturna

Además, en la siguiente aplicación se continúa con el estudio del mismo prototipo pero en este caso cuando se pone a funcionar el elemento especial y la ventilación nocturna como medidas de mejora del caso a estudio actual.

4.1.2. Modelo de caracterización MCS

Este epígrafe describe los modelos de caracterización simplificados en base de tiempo diaria y horaria para la temperatura interior del aire del prototipo y la energía absorbida por el sistema de climatización.

La justificación del número de denominadores y numeradores aparece en el punto “Reducción”. En este se enuncian las herramientas usadas para establecer el orden del modelo.

4.1.2.1. MCS Diario

Temperatura interior en evolución libre

$$\overline{T}_{INT-F}(d) = a_{d00} \cdot \overline{T}_{EXT}(d) + a_{d01} \cdot \overline{T}_{EXT}(d-1) + b_{d00} \cdot RAD(d) + b_{d01} \cdot RAD(d-1) + d_{d01} \cdot \overline{T}_{INT-F}(d-1) + CTE_{d00}$$

Dónde las variables quedan referidas al día d:

$\overline{T}_{INT-F}(d)$ [°C] es temperatura promedio interior

$\overline{T}_{EXT}(d)$ [°C] es temperatura promedio exterior

$RAD(d)$ [Wh] integral de la radiación global horizontal incidente durante el día d

CTE_{d00} [°C] es el efecto de las ganancias internas, principalmente.

Ecuación 4-1. MCS diario – Temperatura promedio interior [°C]

Una de las principales restricciones del modelo es el cumplimiento del régimen permanente básico:

$$1 - d_{d01} = a_{d00} + a_{d01}$$

Es decir, cesados los efectos radiantes y las fuentes internas, la temperatura del prototipo tendería a la temperatura exterior.

Analizando el modelo, se pueden ver los parámetros discutidos en los epígrafes de caracterización de las excitaciones climáticas y las fuentes internas:

- Relación entre la variación de temperatura interior debida al efecto de la radiación incidente y la variación de temperatura debida a la transferencia de calor con el reservorio representado por la temperatura del aire exterior.

$$K' = 24 \cdot \frac{b_{d00} + b_{d01}}{1 - d_{d01}} = \frac{b_{d00} + b_{d01}}{a_{d00} + a_{d01}}$$

- Efecto estacionario de las fuentes internas

$$\Delta T_{FI} = \frac{CTE_{d00}}{1 - d_{d01}}$$

Ambos parámetros K' y ΔT_{FI} hacen referencia a la parte de la respuesta en régimen permanente debida a la radiación y fuentes internas respectivamente. Véase el capítulo 2 para más información.

Energía absorbida por el equipo HVAC

$$E_{HVAC}(d) = a_{d10} \cdot \Delta T_{INT}(d) + a_{d11} \cdot \Delta T_{INT}(d-1) + d_{d10} \cdot E_{HVAC}(d-1) + CTE_{d10}$$

Dónde las variables quedan referidas al día d:

$\Delta T_{INT}(d)$ [°C] es la diferencia entre el promedio diario de temperatura interior estimada por el modelo anterior y el promedio real. Es decir la diferencia entre la temperatura que “se hubiera alcanzado” en el prototipo si no hubiera operado el sistema HVAC y la real medida.

$E_{HVAC}(d)$ [kWh] es la energía absorbida del aire por el equipo

Ecuación 4-2.. MCS Diario Energía absorbida por el equipo HVAC [kWh]

A través de este modelo se obtienen el principal parámetro estático de caracterización del prototipo: UA_{eq} [kWh/°C]

$$UA_{eq} = \frac{a_{d11} + a_{d10}}{1 - d_{d11}}$$

Es importante destacar que salvo en edificios de gran inercia, suele dar buenas estimaciones la siguiente aproximación:

$$E_{HVAC}(d) \sim UA_{eq} \cdot \Delta T_{INT}(d) + CTE_{d10}'$$

En este caso el término constante debería aproximarse a $CTE_{d10}/(1 - d_{d11})$ más menos la posible desviación que conlleva el proceso de regresión.

4.1.2.2. MCS Horario

Temperatura interior en evolución libre

$$\begin{aligned} \overline{T}_{INT-F}(h) = & a_{h00} \cdot \overline{T}_{SA}(h) + a_{h01} \cdot \overline{T}_{SA}(h-1) + a_{h02} \cdot \overline{T}_{SA}(h-2) + a_{h03} \cdot \overline{T}_{SA}(h-3) + a_{h04} \cdot \overline{T}_{SA}(h-4) + d_{h01} \cdot \overline{T}_{INT-F}(h-1) \\ & + d_{h02} \cdot \overline{T}_{INT-F}(h-2) + d_{h03} \cdot \overline{T}_{INT-F}(h-3) + CTE_{h00} \end{aligned}$$

Ecuación 4-3. MCS horario– Temperatura promedio interior [°C]

Dónde las variables quedan referidas a la base de tiempo horaria en su valor promedio. Cabe mencionar que la temperatura equivalente sol-aire se calcular a partir del parámetro K' anterior, la radiación incidente promediada durante esa hora y temperatura promedio exterior.

A su vez, la relación entre el modelo diario y el horario aparece de forma implícita y explícita. En primer lugar el efecto de las ganancias internas calculas anteriormente fija el valor de la constante a:

$$CTE_{h00} = \frac{\Delta T_{FI}}{1 - d_{h01} - d_{h02} - d_{h03}}$$

La otra relación se debe a las constantes de tiempo estimadas a partir del valor que toman los denominadores del modelo horario. Es por tanto, la constante principal del sistema la que se relaciona con el valor del único denominador establecido en el modelo diario.

No hay que olvidar la restricción del permanente cuando cesa el efecto de las fuentes internas.

$$I = \frac{a_{h00} + a_{h01} + a_{h02} + a_{h03} + a_{h04}}{1 - d_{h01} - d_{h02} - d_{h03}}$$

Energía absorbida por el equipo HVAC

$$\begin{aligned} E_{HVAC}(h) = & a_{h10} \cdot \Delta T_{INT}(h) + a_{h11} \cdot \Delta T_{INT}(h-1) + a_{h12} \cdot \Delta T_{INT}(h-2) + a_{h13} \cdot \Delta T_{INT}(h-3) + a_{h14} \\ & \cdot \Delta T_{INT}(h-4) + d_{h11} \cdot E_{HVAC}(d-1) + d_{h12} \cdot E_{HVAC}(d-2) + d_{h13} \cdot E_{HVAC}(d-3) \\ & + CTE_{h11} \end{aligned}$$

Dónde:

$E_{HVAC}(h)$ [kWh] absorbido en el aire durante el paso de tiempo.

$\Delta T_{INT}(h)$ [°C] es la diferencia de temperaturas entre el promedio real con el equipo funcionando y la temperatura interior promedio que hubiera habido si no se hubiera conectado el equipo, más concretamente el resultado de la aplicación del modelo de temperatura anterior.

Ecuación 4-4. MCS Horario Energía absorbida por el equipo HVAC [kWh]

En la aplicación 1 se ha demostrado como los denominadores de ambos modelos son los mismos, ya que están ligados a las constantes de tiempo del sistema. Por lo que resultan las siguientes restricciones:

$$d_{h11} = d_{h01}$$

$$d_{h12} = d_{h02}$$

$$d_{h13} = d_{h03}$$

Sin embargo la principal restricción del modelo se extrae del modelo diario, es decir, por coherencia y relación el régimen permanente del prototipo debe quedar verificado. Esto se traduce en:

$$UA_{eq} = \frac{a_{d11} + a_{d10}}{1 - d_{d11}} = \frac{a_{h10} + a_{h11} + a_{h12} + a_{h13} + a_{h14}}{1 - d_{h11} - d_{h12} - d_{h13}}$$

4.1.3. Reducción

4.1.3.1. Número de denominadores

Como se ha explicado en el capítulo dos, el número de denominadores está ligado al paso de tiempo y las constantes de tiempo del sistema. En el procedimiento se toma la decisión de que habrá tanto denominadores como constantes de tiempo se consideren significativas para el paso de tiempo elegido.

Es por este motivo que en primer lugar se necesita tener una estimación de los valores de las constantes de tiempo del sistema para ello se recurre al análisis de funciones de transferencia de los cerramientos

El objetivo de este análisis es obtener una estimación teórica de las constantes de tiempo superficie-superficies asociadas a las funciones de transferencia teóricas de los cerramientos del prototipo. Para ello se usa una herramienta comercial de cálculo numérico. Este orden de magnitud de las constantes de tiempo de los elementos por separado como punto inicial de arranque para el procedimiento.

El análisis aproximado de las constantes de tiempo asociadas a los elementos que componen los elementos constructivos del prototipo se tiene:

Muro Sur (h)

Primera constante de tiempo: 4.44 h

Segunda constante de tiempo: 1.52 h

Tercera constante de tiempo: 0.70 h

Cubierta (h)

Primera constante de tiempo: 0.55 h

Segunda constante de tiempo: 0.38 h

Muros Norte, Este y Oeste (h)

Primera constante de tiempo: 2.00 h

Segunda constante de tiempo: 0.24 h

Hay que comentar que el suelo está en contacto con el terreno, por lo las constantes de tiempo asociadas al mismo van a ser más elevadas que las presentadas, es decir, va a ser un elemento con una respuesta en lenta en comparación con la de los elementos estudiados. Es por ello que se han considerados los analizados suficientes para las decisiones tomadas.

A la vista de los resultados teóricos se puede concluir que para un paso de tiempo de una hora existen bastantes posibilidades de que la fracción de la respuesta asociada a la tercera constante de tiempo siga siendo relevante, ya que el valor que toma para el muro sur es del orden de una hora por lo que según las directrices enunciadas en el capítulo 2, habría que considerar la posibilidad de que la respuesta del sistema asociada a la tercera constante de tiempo no sea despreciable en un paso de tiempo de una hora. Es por esto, que el número de denominadores máximo sería de tres siempre y cuando los datos experimentales tengan la calidad suficiente como para identificar los efectos de la inercia. En el caso en cuestión, se decide tomar un número de denominadores igual a dos, ya que el análisis de los datos experimentales (excitaciones-respuesta) muestra la necesidad de eliminar el grado de libertad que

confiere un tercer denominador en el proceso de identificación.

4.1.3.2. Número de numeradores

El número de numeradores mínimo será mayor o igual al de denominadores, pero para fijar el mismo, se procede a satisfacer los permanentes del modelo detallado definido.

Puesto que en el prototipo no existen elementos vidriados, las ganancias solares se deben a la absorción de los elementos opacos. Por ello las excitaciones de mayor importancia para el modelo son la temperatura del aire interior y exterior del prototipo.

Para este estudio, y de forma análoga a la estándar ASHRAE 1052-RP [176], se definen una serie de excitaciones sucesivas de carácter independiente, cuya nomenclatura y descripción es la siguiente:

TC1: temperatura del aire interior mantenida a 20°C, cuando se excita con incrementos de temperatura exterior constante. El objetivo es calcular el coeficiente global de transferencia.

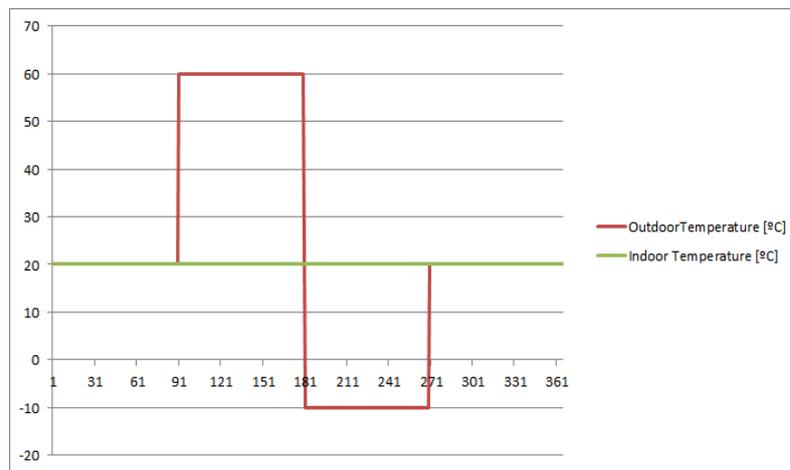


Figura 4-5. Excitación tipo TC1 en temperatura exterior de procedimiento [134]

TC2: idéntico a TC1, pero es la temperatura exterior al que es constante durante los 365 días (8760h), y la interior la que varía como antes lo hacía la exterior.

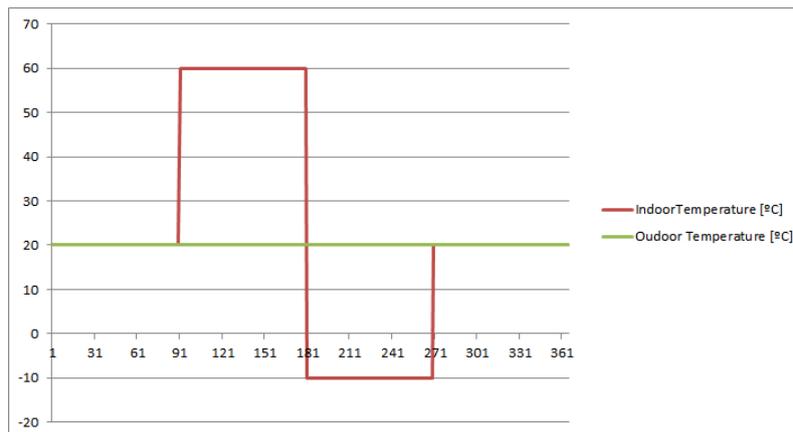


Figura 4-6. Excitación tipo TC1 en temperatura interior de procedimiento [134]

TC3: este tercer experimento consiste en excitaciones sinusoidales de amplitudes diferentes T_{AMP} y diferentes frecuencias P . Las frecuencias que se trabajaran son 6h, 12h y 24h; y las amplitudes, 5°C, 10°C y 20°C. $T(t) = T_0 + T_{AMP} \cdot \sin\left[\frac{2 \cdot \pi \cdot t}{P}\right]$

Existen más excitaciones en la norma comentada, sobre todo para el análisis de los efectos radiantes de

corta y larga. No obstante las más relevantes en el prototipo a estudio, y en la mayoría de los edificios existentes son las que se han extraído. Con la salvedad, de que la radiación va a ser asociada a la temperatura exterior de tal forma que sean válidas las conclusiones que aquí se toman.

Así que, a partir de excitaciones tipo escalón para caracterizar los parámetros estáticos (transmisión+infiltración y ganancias solares), y tipo seno para los parámetros dinámicos (desfase y amortiguamiento), se estima el número de numeradores. Hay que recordar que son estos coeficientes los que encierran los parámetros estáticos comentados, y los denominadores los parámetros dinámicos.

Puesto que la variación en frecuencia y amplitud de las excitaciones medidas es pequeña, se decide hacer un estudio analítico para conocer como afecta a la calidad del ajuste esa variación en frecuencia. El objetivo es saber si el número de numeradores requerido debe variar para mantener la misma calidad del modelo cuando las excitaciones varían en frecuencia y amplitud.

- Se prueba que para un espectro de frecuencia desde 6h hasta 24h, las conclusiones a las que se llegan son iguales, es decir, la mejor aproximación al régimen permanente se alcanza con 3 denominadores y 4 numeradores
- Si se crea un modelo común, teniendo en cuenta datos de los tres experimentos se llegan a los siguientes resultados:

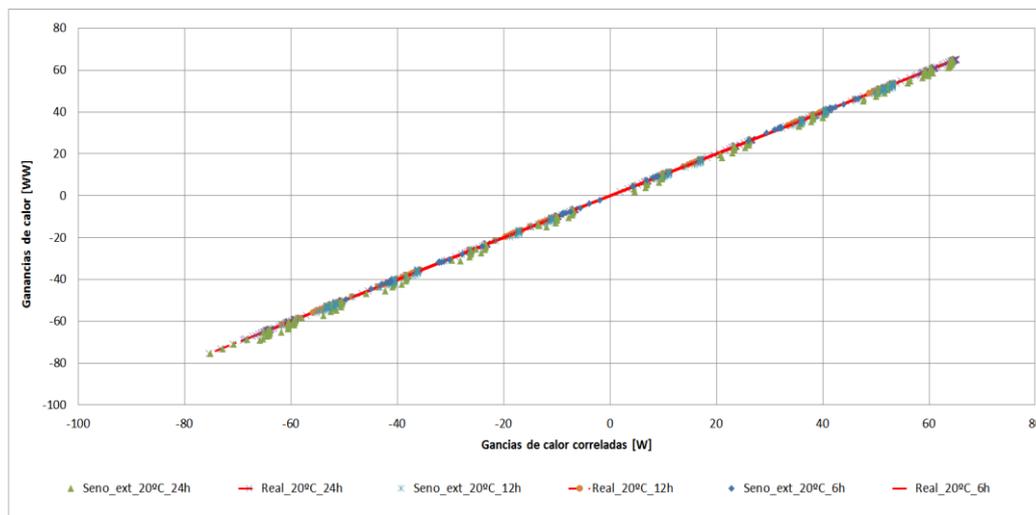


Figura 4-7. Resultados de la identificación del modelo de caracterización sobre datos de simulación variando la frecuencia de las excitaciones sinusoidales

Los resultados que aparecen en la gráfica se han obtenido con pasadas masivas sobre una herramienta de cálculo directo de cargas térmicas sobre edificios propia. En ellas se puede ver como la calidad del ajuste no tiene variaciones importantes cuando varía la frecuencia de la función seno que representa a la temperatura del aire exterior. Por consiguiente, se demuestra que estructura del modelo simplificado es indiferente con la frecuencia de la excitación.

Para cerrar este estudio se analiza la influencia de la amplitud de la temperatura del aire exterior en la calidad del modelo. Para ello se toma un periodo de 24h y una amplitud variable desde 5 a 20°C.

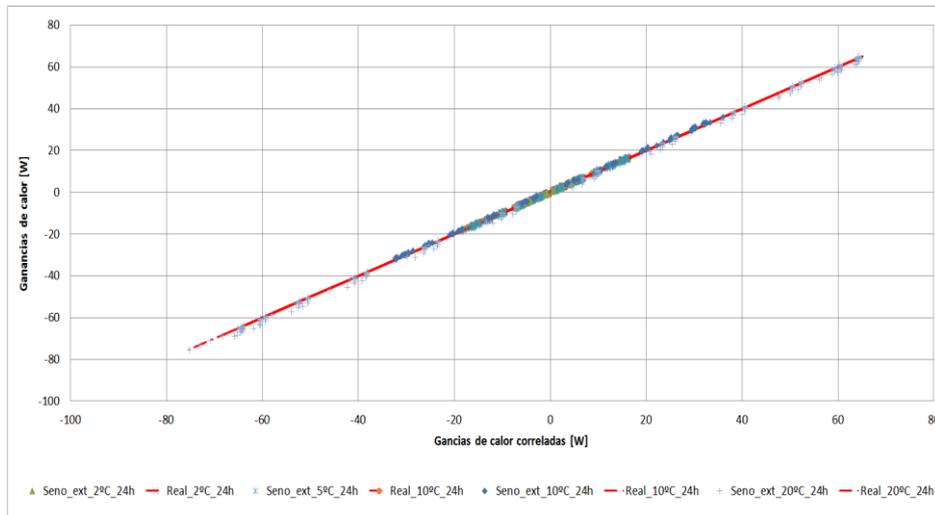


Figura 4-8. Resultados de la identificación del modelo de caracterización sobre datos de simulación variando la amplitud de las excitaciones sinusoidales

Ahora bien, conocido que la variación en frecuencia y amplitud de las excitaciones no afecta al número de numeradores necesario para tener un ajuste aceptable del modelo, hay que tomar una decisión respecto al número de numeradores necesario. Esta última decisión supone el final del proceso de reducción, ya que el número de denominadores ya se ha discutido anteriormente.

Así pues, se decide elegir aquella combinación de número de denominadores y numeradores que garantiza el mejor ajuste de las condiciones en régimen permanente resultantes de la simulación en la herramienta detallada (herramienta propia). No obstante, tal y como se ha dicho, se tienen ciertas dudas de la posibilidad de eliminar el tercer denominador, por eso, además de analizar el número de numeradores, se va a dejar un segundo grado de libertad que será si dos o tres denominadores.

Por ejemplo, el *caso 2 denominadores y 4+1 numeradores* estima un valor del UA de 7.2 W/K frente al estimado de forma analítica con el experimento TC1 [176] de 9.61 W/K. En cambio, en el *caso 3 denominadores y 4+1 numeradores* se obtiene un valor de UA estimado asciende a 9.79 W/K frente al estimado de forma analítica con el experimento TC1 [176] de 9.61 W/K. Este último caso, con un 2% de error el que mejor se ajusta, incluso entra dentro de los criterios de aceptación de AHSRAE 1052 [176].

Por tanto, y tal como se esperaba, a medida que aumenta el número de numeradores el modelo simplificado tiende en régimen permanente a la respuesta del modelo detallado. Y que esta tendencia es se alcanza con menor número de numeradores si se añaden denominadores.

En conclusión, el número de numeradores a elegir está vinculado con el error que se esté dispuesto a asumir, en este caso de 4. Y el número de denominadores a tomar en esta aplicación debe ser de tres.

4.1.3.3. Conclusiones

Los resultados de la teoría desarrollada en el capítulo dos dice que eligiendo el paso de tiempo, queda elegida la última constante de tiempo significativa. Igualmente se marca el límite a partir del cual la respuesta de esa excitación puede ser despreciada.

$$\frac{\tau_n}{2} < \Delta t < 5 \cdot \tau_1$$

En el límite, cuando existen dudas de esas constantes de tiempo, se puede llevar al extremo la cota inferior cuando se tienen dudas del valor de las constantes de tiempo:

$$\tau_n < \Delta t < 5 \cdot \tau_1$$

La explicación de la inecuación es la siguiente: una vez estimadas las constantes de tiempo del sistema

modelado en el procedimiento detallado y elegido el paso de tiempo deseado, la última constante de tiempo a tener en cuenta τ_n es aquella cuyo valor sea parecido al del paso de tiempo sin pasarse. Sin embargo, hay que verificar que la primera constante de tiempo despreciada es menor que la mitad de la última considerada para garantizar que los efectos dinámicos son caracterizables con calidad en el MCS.

Hay que comentar que si el paso de tiempo es mayor que 5 veces la constante de tiempo principal del sistema, quizás, no merezca la pena tener en cuenta los efectos dinámicos en el sistema, por lo que el número de denominadores sería de cero.

Por consiguiente, las constantes de tiempo estimadas dejan ver que para un paso de tiempo de una hora hasta la tercera constante de tiempo es significativa. Y esto es así porque para el elemento sur asciende a 0.7h, por lo que la tercera constante de tiempo del sistema puede ser del mismo orden.

Tres denominadores

El número de numeradores apropiado cuando se toman tres denominadores asciende a cuatro, con objeto de tener una buena precisión en la captura del régimen permanente.

Cuatro numeradores

A modo de cierre, las conclusiones de la reducción realizada son:

- Se requieren 3 denominadores para la caracterización dinámica del prototipo
- A su vez, la caracterización del permanente tiene sentido para un número de numeradores de 4 más el referido al tiempo actual.

4.1.4. Caracterización de las excitaciones climáticas

El efecto climático se tiene en cuenta de forma combinada entre la temperatura exterior y la radiación incidente. Si bien es cierto, existen más excitaciones que influyen en el comportamiento energético de un edificio; principalmente, los efectos radiantes de larga debido a los sólidos existentes en los alrededores del edificio y al cielo. Es por esto que la primera hipótesis, es suponer que la medición de la temperatura exterior y de la radiación global horizontal incidente, junto con la posición solar, permiten caracterizar las excitaciones exteriores predominantes que afectan al prototipo.

Dicho esto, y asumiendo que en el interior del espacio las bajas cargas internas existentes forman parte del ruido, la energía térmica necesaria para mantener una cierta temperatura de consigna podría aproximarse como:

$$Q \sim \int_{i=1}^6 U_i \cdot A_i \cdot [\overline{T_{EXT}} - T_{INT}] \cdot dt + \int_{i=1}^6 U_i \cdot A_i \cdot \left[\frac{\alpha_i \cdot I_i}{he_i} - T_{INT} \right] \cdot dt$$

Dónde:

- $U_i \cdot A_i$ son el coeficiente global de transferencia de cada elemento (4 muro, cubierta y puerta) [W/m²·K], y el área respectivamente [m²].
- $\overline{T_{EXT}}$ es la temperatura exterior promediada durante el paso de tiempo fijado [°C].
- T_{INT} consigna interior elegida [°C].
- α_i absorptividad del elemento i
- I_i radiación global incidente sobre el elemento i [W/m²]
- he_i es el coeficiente de transferencia convectivo exterior de cada elemento [W/m²·K]

Ecuación 4-5. Flujo de calor por transmisión en el prototipo

La expresión anterior es válida para el caso a estudio por no tener elementos semitransparentes en su epidermis, y un nivel de fuentes internas.

Se puede asumir que tanto la absorptividad como el coeficiente convectivo exterior de cada elemento pueden asumirse iguales para todos ellos; hipótesis razonada por la imposibilidad experimental de conocer con certeza ambos valores. Ahora bien, sumado a esto se toma como base de integración la diaria, resultando:

$$Q \sim \bar{U}_i \cdot A_T \cdot [\overline{T_{EXT}} - T_{INT}] \cdot 24 + \frac{\alpha}{he} [U_N \cdot A_N \cdot I_N + U_E \cdot A_E \cdot I_E + U_O \cdot A_O \cdot I_O + U_P \cdot A_P \cdot I_N + U_S \cdot A_S \cdot I_S]$$

Dónde:

- $\bar{U}_i \cdot A_T$ son respectivamente el coeficiente global de transferencia promedio del prototipo, y el área total del mismo en contacto con el aire exterior.
- $U_N \cdot A_N$ son respectivamente el coeficiente global de transferencia del elemento opaco al norte junto con su área. El subíndice O: oeste, E: este, S: sur, P: puerta que se encuentra al norte, y C: cubierta.
- I_N es la radiación incidente integrada durante todo el día, en este caso en la orientación norte pero con la misma filosofía del subíndice anterior.

Ecuación 4-6. Flujo de calor por transmisión en el prototipo (desarrollo)

Sin embargo, es bien conocido el problema de cuantificar la radiación real incidente, a lo que se suma el paso a radiación total absorbida. Es por ello, que se decide optar por la radiación global horizontal como variable independiente única, ya que es la radiación medida. Quedando la formulación anterior de la siguiente manera:

$$Q \sim \bar{U}_i \cdot A_T \cdot [\overline{T_{EXT}} - T_{INT}] \cdot 24 + \frac{\alpha}{he} \cdot I_H \cdot [U_N \cdot A_N \cdot F_{HN} + U_E \cdot A_E \cdot F_{HE} + U_O \cdot A_O \cdot F_{HO} + U_P \cdot A_P \cdot F_{HN} + U_S \cdot A_S \cdot F_{HN} + U_C \cdot A_C]$$

Aparecen unos factores que solo dependen de la posición solar como son F_{Si} , como el cociente entre la radiación total sur incidente y la total incidente en la orientación i. Se asume que no hay sombras en esta formulación, y que será la identificación la que añada esa influencia.

Si se analiza la fórmula anterior se puede ver como se alcanza la siguiente expresión:

$$Q \sim \bar{U}_i \cdot A_T \cdot [\overline{T_{EXT}} - T_{INT}] \cdot 24 + \frac{\alpha}{he} \cdot K \cdot I_H$$

Dónde:

$$K = U_N \cdot A_N \cdot F_{HN} + U_E \cdot A_E \cdot F_{HE} + U_O \cdot A_O \cdot F_{HO} + U_P \cdot A_P \cdot F_{HN} + U_S \cdot A_S \cdot F_{HN} + U_C \cdot A_C$$

Finalmente, las conclusiones adoptadas son:

En primer lugar, cabe destacar que la formulación realizada ha sido particularizada para el caso a estudio, siendo extrapolable a todo tipo de edificios teniendo en cuenta el resto de fenómenos que aparezcan, como pueden ser huecos vidriados en la fachada.

Tanto la variable K como el ASSE, son variables con el tiempo por lo que las asunciones realizadas para una base de tiempo diaria deberían ser estudiadas en una base de tiempo inferior para valorar las implicaciones que tiene admitirlas como ciertas. No obstante, siempre hay que valorar la cantidad y calidad de la monitorización presente, y las posibles incertidumbres que se van a tener en edificios existentes para mejorar esta formulación.

Tratar la radiación combinada con la temperatura exterior, pero explícita en el modelo, permite ser coherente con la formulación en una base de tiempo mayor, tipo mensual o estacional. Lo que la integra de una forma eficaz en los objetivos de la tesis.

Si se observa la última expresión de la energía térmica para mantener la consigna, se puede observar que en el caso de que no se tenga un equipo de climatización y se deje evolucionar libremente hasta alcanzar el régimen permanente resulta lo siguiente:

$$0 \sim \bar{U} \cdot A_T \cdot (\overline{T_{EXT}} - T_{INT}) \cdot 24 + \frac{\alpha}{he} \cdot K \cdot I_H$$

Es decir:

$$T_{INT} \sim \overline{T_{EXT}} + \Delta T_{INT-RAD} \quad \Delta T_{INT-RAD} = \frac{\alpha}{he} \cdot K \cdot I_H / [\bar{U} \cdot A_T \cdot 24] = K' \cdot I_H$$

La radiación supone un incremento de la temperatura interior con respecto al valor promedio de la temperatura exterior, ya que si no existiese esta excitación radiante, la temperatura promedio del aire en el interior del prototipo debería coincidir con la temperatura promedio de la temperatura del aire exterior.

Además este cambio de nomenclatura describe una variable que denotaremos K' que liga los parámetros estáticos asociados a la radiación con los vinculados a la temperatura exterior.

$$K' = \frac{\alpha}{he} \cdot K / [\bar{U} \cdot A_T \cdot 24]$$

Y lo más importante, este parámetro K' permite vincular el efecto de la radiación con el de la temperatura exterior en una sola temperatura equivalente. En el desarrollo de la tesis se hace acopio de la temperatura sol-aire para esta temperatura equivalente. Este paso persigue la reducción de inconveniente matemáticos ligados al número de coeficientes a identificar y a la calidad/cantidad de los datos.

En el paso de tiempo horario y para el ejemplo desarrollado en la formulación anterior, que es donde tiene sentido el uso de la temperatura sol-aire, ésta queda:

$$T_{SA} = T_{EXT} + 24 \cdot K' \cdot I_H$$

Siendo la temperatura exterior y la radiación el valor promedio referido a esa hora.

4.1.5. Fuentes internas

El prototipo a estudio tiene un volumen neto de aire de 16 m³ aproximadamente. En su interior se encuentra un ordenador de sobremesa en funcionamiento 24h, calentando al aire con una potencia de 150 W aproximadamente. Es por ello que las ganancias internas por las especiales características y dimensiones del prototipo no son despreciables.

Las ganancias internas existentes suponen un incremento de temperatura del prototipo, por lo que usando el razonamiento anterior, en el régimen permanente del modelo diario supondrá la existencia de un término constante. Véase modelo de caracterización diario.

4.1.6. Identificación

En este epígrafe se muestran los resultados referentes a la identificación y validación del modelo. Los datos experimentales pertenecen al periodo comprendido entre el 20 de abril de 2014 y el 21 de mayo de 2014. Durante este periodo se han llevado a cabo dos tipos de experimentos: experimento en evolución libre, es decir, sin equipo de acondicionamiento; y con equipo de acondicionamiento en una temperatura de consigna fija.

Cabe destacar del experimento a temperatura constante que se ha llevado a cabo cuando, la predicción climática aseguraba que las temperaturas exteriores iban a oscilar por encima de la consigna establecida en el equipo, de tal forma que durante varios días la transferencia de calor tuviera un sentido seguro: del exterior al interior. De esta forma se ha garantizado un funcionamiento continuo de 24h. Esto último se ha hecho así para eliminar el ruido de las paradas de las conclusiones que más abajo aparecen, quedando esto último como desarrollo de la siguiente aplicación.

4.1.7. MCS Diario

Como ya se ha dicho, se tienen dos modelos anidados, ya que el modelo de energía necesita del modelo de evolución libre para calcularse.

Temperatura interior en evolución libre

$$\overline{T_{INT-F}}(d) = 0.3662 \cdot \overline{T_{EXT}}(d) + 0.3009 \cdot \overline{T_{EXT}}(d-1) - 0.0001 \cdot RAD(d) + 0.0002 \cdot RAD(d-1) + 0.3410 \cdot \overline{T_{INT-F}}(d-1) + 2.1440$$

$$\Delta T_{FI} = 3.25 \pm 0.4 [^{\circ}C] \quad K' = 0.0034 [m^2 \cdot ^{\circ}C/W]$$

Ecuación 4-7. MCS Diario Identificado Temp. Interior [°C]

En las siguientes gráficas se muestran los resultados tanto para los días usados en la identificación del modelo como los empleados en la validación del mismo.

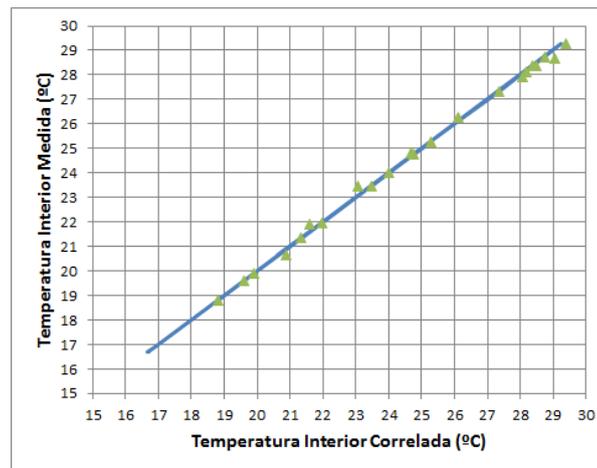


Figura 4-9. Comparación del valor promediado medido con el resultante de la aplicación del modelo de caracterización identificado para los días del 16 de abril al 10 de mayo de 2014

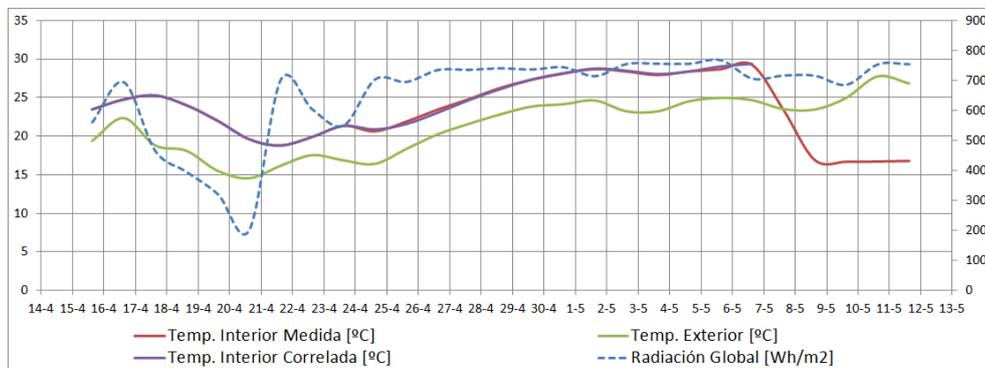


Figura 4-10. Evolución de las variables climáticas, temperatura exterior, y radiación global horizontal incidente integrada junto con la temperatura promedio interior medida y la resultante de aplicar el modelo (Temperaturas en eje izquierdo y radiación en eje derecho).

La gráfica superior muestra los resultados de la aplicación del modelo diario sobre los datos usados para su identificación, pero también sobre los primeros días del periodo (16-18 de Abril) y últimos (4-7 Mayo), no usados en la identificación y por tanto indicadores de validación.

Energía absorbida por el equipo HVAC

$$E_{HVAC}(d) = 1.8927 \cdot \Delta T_{INT}(d) + 0.7293 \cdot \Delta T_{INT}(d-1) + 0.8699 \cdot E_{HVAC}(d-1) + 1.1563$$

$$UA_{eq} = 25.7274 \pm 1.2930 [W/^{\circ}C]$$

Ecuación 4-8. MCS Diario Identificado Energía Absorbida por HVAC [kWh]

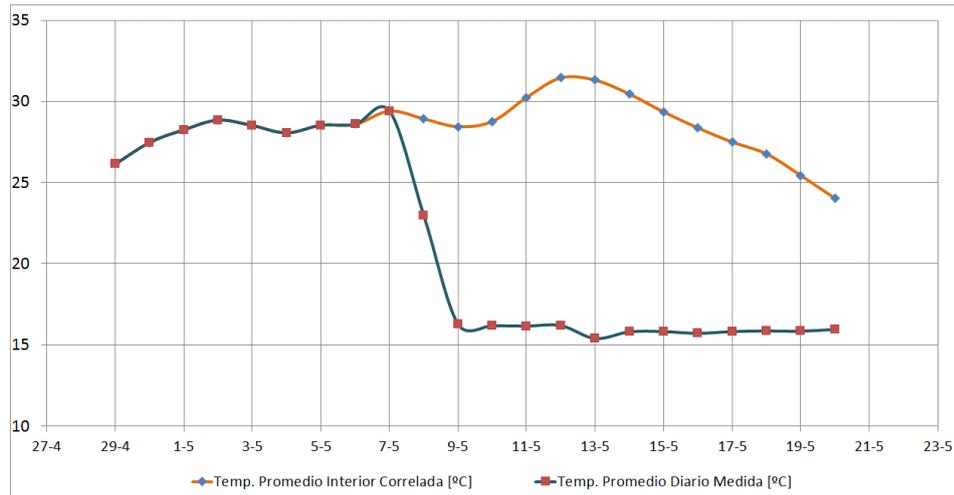


Figura 4-11. Aplicación del modelo diario de evolución del prototipo sin HVAC comparado con la medición real de temperatura cuando el equipo ha operado.

En la gráfica anterior se puede ver el salto de temperaturas que supone el funcionamiento del equipo en el aire interior. Ese salto de temperaturas se debe a una energía frigorífica suministrada que está ligada a las cargas térmicas del espacio para mantenerse, aproximadamente, a 15°C.

En este caso se muestran los resultados de los días del final del periodo correspondiente con el final de los días de identificación y comienzo de los días de validación.

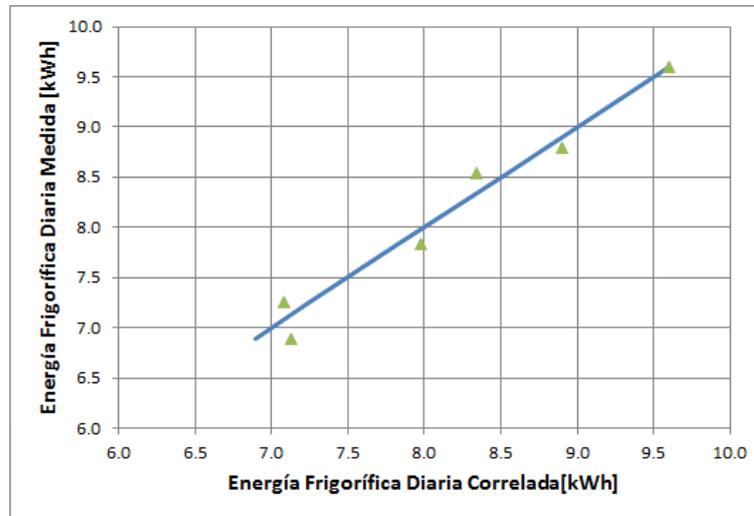


Figura 4-12. Comparación entre el valor de energía integrada medida absorbida del aire (ordenadas) con la estimación que produce el modelo (abcisas).

4.1.8. MCS Horario

El modelo horario se entiende como el paso corto, donde los efectos dinámicos son realmente relevantes. Idéntico al anterior se compone de un modelo de temperatura cuando el prototipo se encuentra en evolución libre, y en energía aportada al espacio cuando el equipo de acondicionamiento opera. Ambos comparten el valor de los denominadores por ser una función de las constantes de tiempo del sistema. Además el modelo horario, como ya se ha dicho, está restringido con los valores en permanente obtenidos del modelo diario.

Temperatura interior en evolución libre

El modelo horario arrastra tres constantes de tiempo representativas y con ellas tres denominadores:

$$\overline{T_{INT-F}}(h) = 0.0020 \cdot \overline{T_{SA}}(h) + 0.0106 \cdot \overline{T_{SA}}(h-1) + 0.0020 \cdot \overline{T_{SA}}(h-2) - 0.0048 \cdot \overline{T_{SA}}(h-3) + 0.0033 \cdot \overline{T_{SA}}(h-4) + 1.9696 \cdot \overline{T_{INT-F}}(h-1) - 1.2974 \cdot \overline{T_{INT-F}}(h-2) + 0.3147 \cdot \overline{T_{INT-F}}(h-3) + 0.0427$$

Ecuación 4-9. MCS Horario Identificado Temp. Interior [°C]

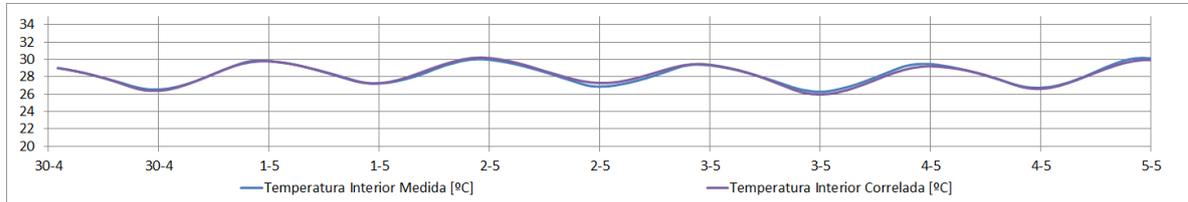


Figura 4-13. Modelo horario: evolución libre del prototipo medida (azul) y valor estimado por el modelo (morado).

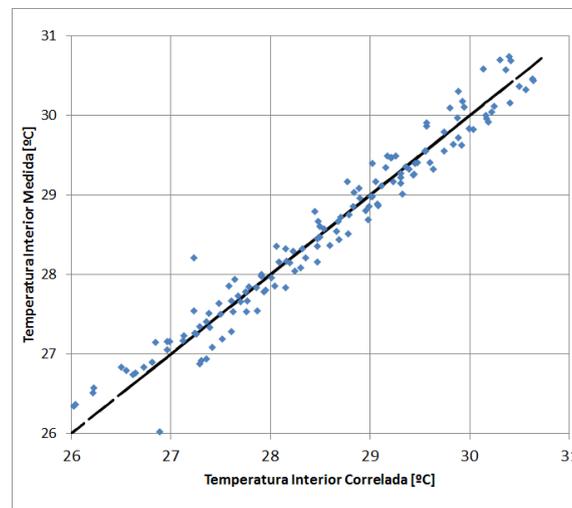


Figura 4-14. Comparación de los valores medidos (ordenadas) con el valor estimado por el modelo horario de temperatura interior en evolución libre (abscisas)

Las constantes de tiempo (aprox.) asociadas al espacio son de 24h la primera, 3h la segunda y 1h la tercera. Se habla de aproximadas porque el problema está mal condicionado y existen varias soluciones matemáticas al mismo.

Energía absorbida por el equipo HVAC

Análogo al modelo anterior, se conserva el valor de los denominadores por ser la respuesta en flujo asociada a la temperatura del aire anterior.

Además hay que destacar que el modelo horario, en semejanza con el modelo diario, tiene como variable independiente la diferencia de temperaturas entre la temperatura que hubiera habido en la célula si no hubiera operado el sistema de acondicionamiento y la temperatura real medida establecida. De esta forma se tiene en cuenta de forma implícita el efecto climático, pudiendo ligar el consumo de energía con la evolución libre de temperaturas.

$$E_{HVAC}(h) = 0.0235 \cdot \Delta T_{INT}(h) - 0.0246 \cdot \Delta T_{INT}(h-1) + 0.0112 \cdot \Delta T_{INT}(h-2) - 0.0266 \cdot \Delta T_{INT}(h-3) + 0.0168 \cdot \Delta T_{INT}(h-4) + 1.9696 \cdot E_{HVAC}(d-1) - 1.2974 \cdot E_{HVAC}(d-2) + 0.3147 \cdot E_{HVAC}(d-3) + 0.0015$$

Ecuación 4-10. MCS Horario Identificado Energía Absorbida por HVAC [kWh]

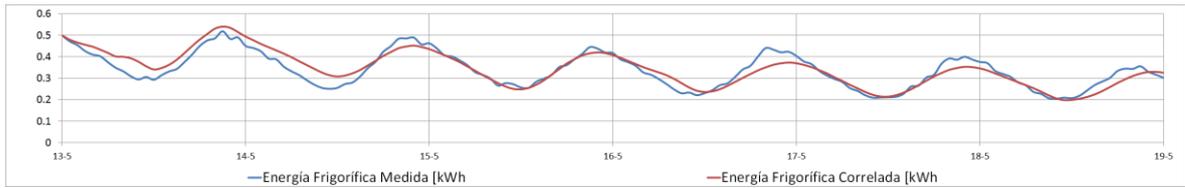


Figura 4-15. Modelo horario: energía absorbida del aire (azul) y valor estimado por el modelo (rojo).

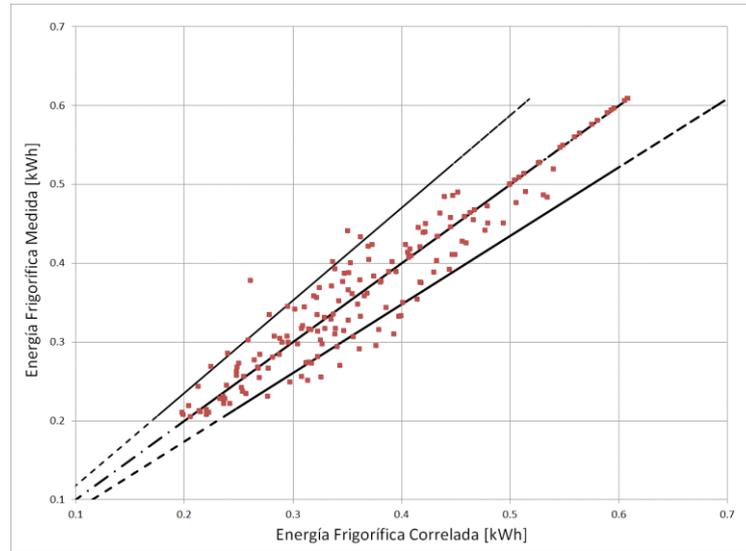


Figura 4-16. Modelo horario: evolución libre del prototipo medida (azul) con el valor estimado por el modelo (morado). Las rectas negras superior e inferior indican la franja del 20% de error con respecto al valor medido.

Los resultados para el modelo horario de temperaturas y de energía frigorífica son aceptables, incluso útiles para realizar una continuación del trabajo hasta una posible calibración de una herramienta detallada. Es más el modelo el modelo cumple las siguientes restricciones:

- El término constante en el modelo horario de temperaturas está vinculado al incremento de temperaturas debido a fuentes internas calculado en el modelo diario
- El régimen permanente del modelo horario de energía satisface el valor de UA (W/K) calculado con el modelo diario y antes presentado. Se verifica que la suma de numeradores asciende a $3.4 \cdot 10^{-4}$ kWh/K; y 1 menos la suma de denominadores toma el valor de 0.0113, con lo que el cociente entre ambos resulta aproximadamente 26 W/K

No obstante, en el marco del trabajo doctoral y vinculado al proyecto de investigación, se tiene como tarea verificar el ahorro que suponen las dos medidas de ahorro que se han implantado en la célula.

4.1.9. Verificación de ahorros

En esta sección se lleva a cabo la verificación/demostración del ahorro que supone llevar a cabo las siguientes medidas:

- Funcionamiento de ventiladores en la cámara para el enfriamiento del elemento especial: activación de inercia.
- Enfriamiento nocturno mediante extracción del aire a través de la puerta del prototipo y entrada a través de la fachada sur.

En los siguientes epígrafes se analizan por separado cada una de ellas.

4.1.9.1. Activación de la inercia

4.1.9.1.1. Descripción

La solución de mayor potencial debía ser capaz de reducir la demanda energética de calefacción durante los meses de invierno y la demanda energética de refrigeración durante los meses de verano sin necesidad de modificaciones sustanciales de su diseño.

Con este objetivo, se desarrolla una solución compuesta de tres hojas: un vidrio exterior, un muro intermedio con aislamiento en la cara interna y provisto de una batería de ventiladores y un muro interior de hormigón que se usará como elemento de alta inercia térmica para la carga y la descarga.

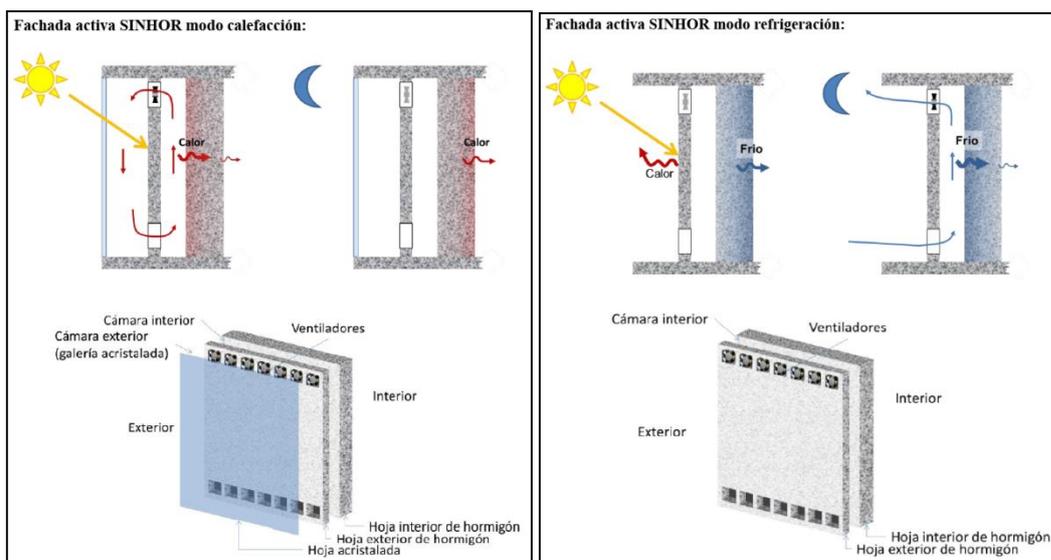


Figura 4-17.

Esquema de la solución para invierno (izquierda) y verano (derecha)

La principal modificación que sufre la solución SINHOR en el paso de invierno a verano es la eliminación de la cristalera que forma la hoja exterior de la cámara. En la práctica, no es necesario eliminar la cristalera, siendo suficiente ventilar dicha cámara para evitar el efecto invernadero. Este objetivo se puede conseguir de manera sencilla con un mecanismo de paneles plegables.

Los ventiladores del muro intermedio permiten activar la convección forzada para transferir el calor solar en invierno a la hoja inerte y permitir la disipación de calor al aire exterior durante las noches de verano.

4.1.9.1.2. Resultados

Durante el mes de agosto y comienzos de septiembre de 2014, se ha llevado a cabo experimentos de evolución libre, es decir, se dejaba evolucionar libremente la temperatura del aire en el interior del prototipo, pero cuando la temperatura del aire exterior era inferior a la temperatura del elemento se hacía

pasar aire por la cámara. De esta forma se enfriaba la masa térmica de la fachada sur, consiguiendo un almacenamiento del frío. Estas condiciones se producen durante las horas nocturnas y por la mañana.

Por consiguiente, el objetivo es medir la temperatura interior medida durante el periodo entre el 2 de septiembre y el 9 de septiembre de 2014, cuando se tenía implementada la medida anterior; de cara a comparar estos datos con la temperatura interior que hubiéramos tenido en la situación de referencia para esos mismos días, es decir, en la situación sin llevar a cabo esta medida de ahorro.

La siguiente gráfica muestra esta comparación:

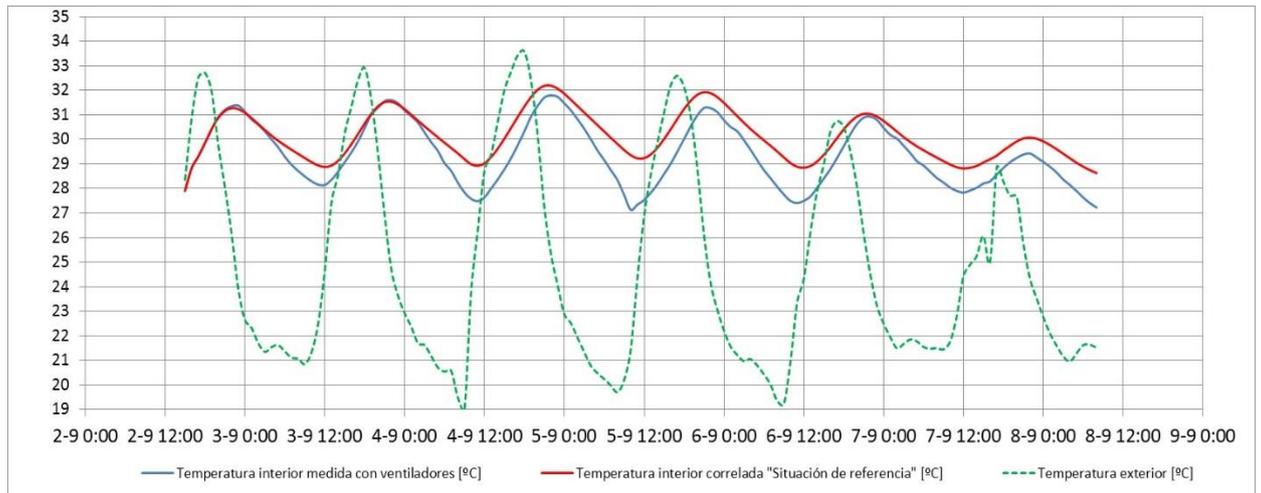


Figura 4-18. Temperatura interior medida (azul), temperatura interior estimada para la situación de referencia (roja) y temperatura exterior (verde) durante el periodo comprendido del 2 al 9 de septiembre de 2014.

Se puede ver claramente como cuando operan los ventiladores de la cámara se produce un enfriamiento del hormigón, que se traduce en una reducción de la temperatura interior. Este enfriamiento es importante en las horas de mañana cuando la temperatura exterior es bastante fría, por lo que se produciría una reducción considerable en el pico de consumo que tienen los equipos de climatización.

4.1.9.2. Enfriamiento Nocturno

4.1.9.2.1. Descripción

Esta medida consiste en renovar el aire del espacio en las horas nocturnas y de mañana en las que la temperatura del aire exterior es 5 grados inferior a la temperatura del aire interior. Para ello se activan unos ventiladores axiales instalados en la puerta (1 y 2), que aspiran el aire a través de las rejillas instaladas en la zona inferior de la fachada sur (3). El aire asciende por la cámara de aire para entrar en el espacio a través de unos agujeros practicados en el elemento de hormigón interior de la fachada sur (4).



Figura 4-19. 1. Detalle de los ventiladores instalados en la puerta. 2. Nueva puerta instalada. 3. Deflectores instalados en la parte inferior de la fachada sur. 4. Detalle del movimiento de aire cuando se activa la ventilación nocturna.

De esta forma se consigue enfriar el elemento masivo, renovar el aire interior y con el enfriar el resto de la célula, también masiva. La corriente de aire está próxima al techo, hecho que se tiene en cuenta para la colocación de los sensores y registrar adecuadamente el nuevo campo de temperaturas.

Debido a que se deseaba registrar la evolución de la temperatura de la corriente de aire, se instalaron dos sensores de temperatura nuevos, tal como se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

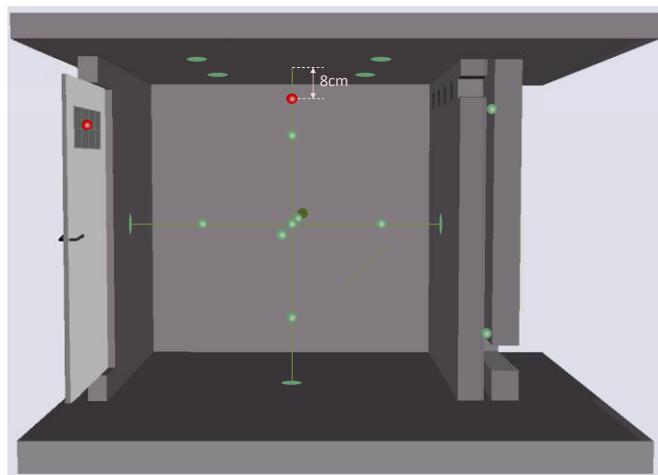


Figura 4-20. Puntos de medición de temperatura. Los puntos verdes representan los puntos de medición existentes previamente y los puntos rojos, representan los nuevos puntos de medida.

El sensor ubicado en la zona superior permite registrar la temperatura de la corriente de aire en la zona central de la caseta. La temperatura de entrada a la caseta queda registrada por los sensores ya existentes ubicados en la cámara de aire y la temperatura de salida de la corriente de aire se registra en la justa a la entrada de los ventiladores ubicados en la puerta de la caseta.

4.1.9.2.2. Resultados

De manera análoga a lo anterior, se lleva a cabo en el periodo del 4 de septiembre en adelante los experimentos de enfriamiento nocturno.

Esta medida, si está bien diseñada, debería producir un efecto más importante que la anterior, ya que el aire exterior frío cuando entra en el espacio debe incidir en los elementos inertes para enfriarlos, es decir, debería activar en mayor o menor medida el elemento además del resto de cerramientos.

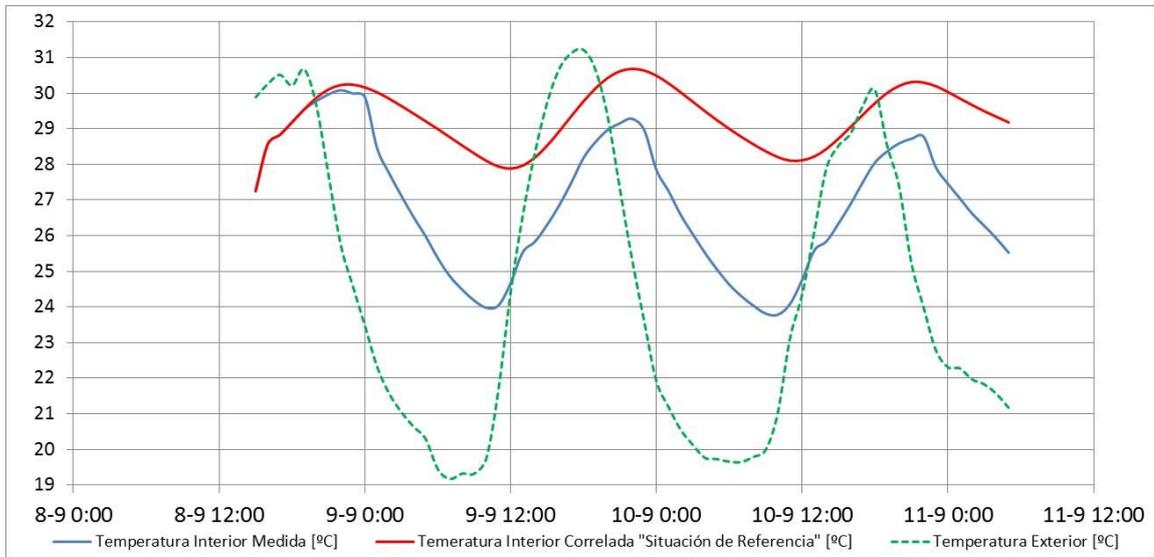


Figura 4-21. Temperatura interior medida (azul), temperatura interior estimada para la situación de referencia (roja) y temperatura exterior (verde) durante el periodo comprendido del 4 al 11 de septiembre de 2014.

Tal y como cabía esperar en el momento que el sistema de extracción opera la temperatura interior cae fuertemente, ya que la temperatura exterior es bastante inferior durante esas horas. Este enfriamiento tan acusado se traduce en una reducción importante en el nivel térmico durante el día, y es por ello que la temperatura interior se coloca incluso en la banda de confort, pudiendo tomarse la decisión de no requerir sistema de climatización.

Nótese en la gráfica anterior como la temperatura interior a lo largo del día alcanzaba el valor estimado para la celda de referencia, es decir, como el enfriamiento producido durante el funcionamiento de los ventiladores no consigue colocar la temperatura interior en la banda de confort como esta medida.

4.2. APLICACIÓN 2 – MECLIDE

4.2.1. Descripción y objetivos

El elemento evaluado consiste en una fachada ventilada que incorpora en la cámara de aire aletas con material PCM en su interior. En las figuras x a y, se pueden ver con detalle. El elemento completo está formado por cuatro elementos: el muro interior, el elemento exterior acristalado, las aletas de PCM y la cámara de aire.

El objetivo es caracterizar las pérdidas a través del elemento exterior. Para ello se requiere modelar la respuesta del muro interior y conocer la cantidad de energía almacenada/cedida en las aletas de PCM.

El acoplamiento entre los elementos se va a calcular a partir de los coeficientes de transferencia convectivo-radiantes.

Las aletas se han colocado longitudinales al flujo de aire para poder maximizar el área de transferencia y la cantidad de material PCM en el interior de la cámara, sin incurrir en una excesiva pérdida de carga.

La siguiente figura muestra una fotografía del experimento y un esquema del mismo sin el aislante exterior.

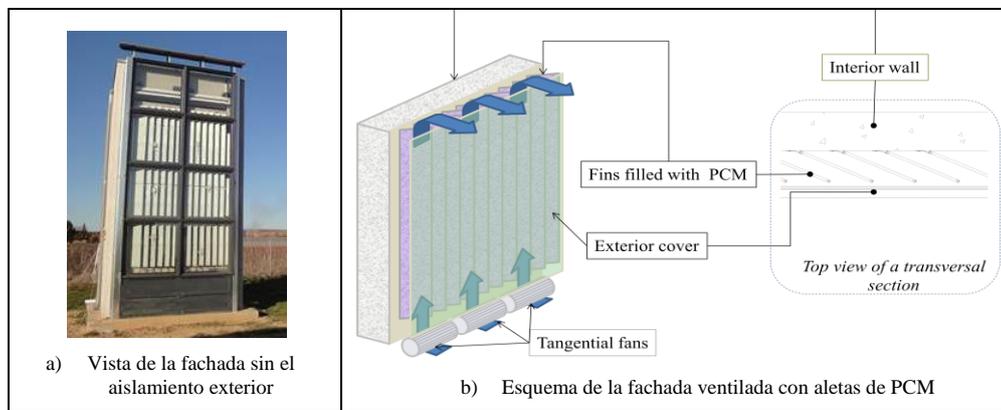


Figura 4-22. Collage del prototipo experimental fuente [177]

La operación de la fachada es automática debido al control implementado, para la operación de ventiladores y del cierre o apertura de compuertas. Los tres modos de operación son los que aparecen reflejados en la siguiente tabla.

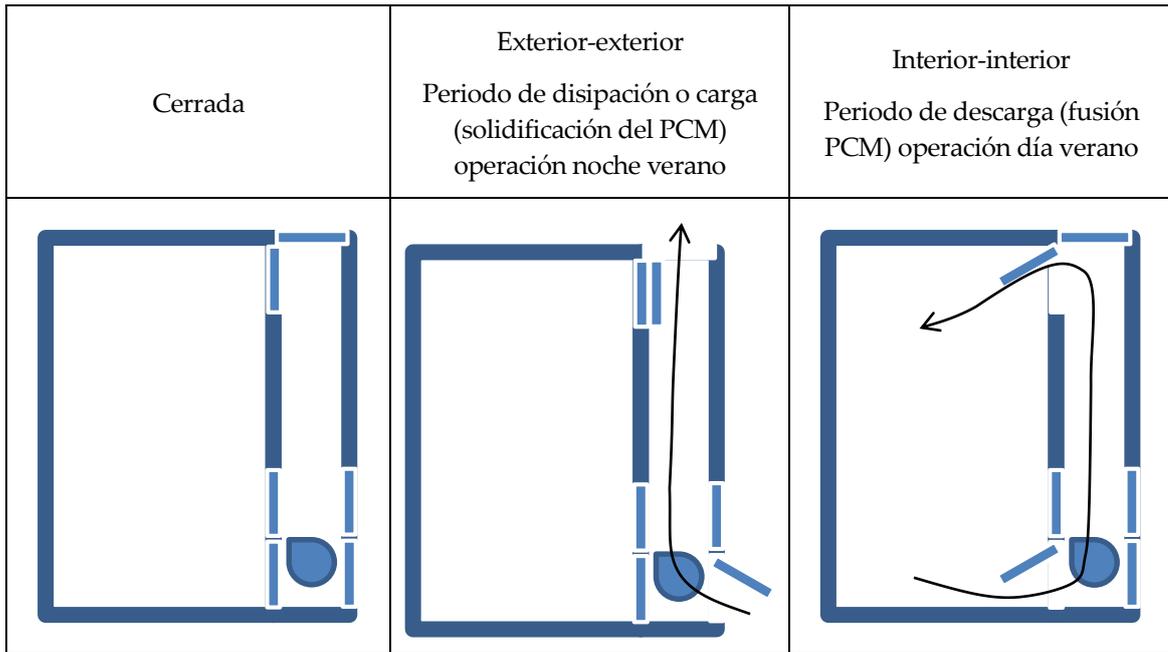


Figura 4-23. Modos de operación de la fachada ventilada

Se van a realizar experimentos de carga y descarga de las aletas de PCM, para ello se hace pasar aire por el interior de la fachada de forma cíclica. Cada ciclo consta de dos etapas.

Puesto que los experimentos se realizan durante invierno, el aire con el que se cargan las aletas (solidifican) es el procedente del exterior, puesto que está a baja temperatura; para descargar las aletas se introduce en la cámara aire procedente del interior del habitáculo que está acondicionado con una bomba de calor (consigna 30°C).

Las principales variables medidas de cara a los requerimientos de la aplicación, son:

- Temperatura del aire: en varias localizaciones del interior de la cámara, interior de la celda, y exterior.
- Temperatura superficial a nivel aletas, elemento interior, y elemento exterior, para varias localizaciones. Y de los propios elementos en ambas caras.
- Velocidad del aire en el interior de la cámara para varios puntos representativos.
- Temperatura del material PCM en diferentes aletas, y diferentes localizaciones de las mismas.

Existe más de 70 variables medidas, pero solo se comentan aquellas que son requeridas para el objetivo de esta aplicación.

4.2.2. Caracterización del elemento opaco interior

4.2.2.1. Formulación

El objetivo de esta sección es describir los resultados de la aplicación de la metodología de caracterización sobre el elemento interior de la fachada ventilada, es decir, sobre el muro. Se persigue por tanto, encontrar la respuesta en flujo de la superficie exterior (contacto con la cámara de aire), como función de la temperatura superficial interior (excitación interior) y de la temperatura equivalente de transferencia convectiva-radiante de la cámara (excitación exterior).

En primer lugar se analiza la formulación típica de funciones de transferencia reducidas aplicadas en la simulación de la transferencia por conducción en elementos opacos. La formulación sería:

$$Q_{SE}(t) = \sum_{i=0}^n a_i \cdot T_{SE}(t-i) + \sum_{i=0}^n b_i \cdot T_{SI}(t-i) - \sum_{i=1}^n d_i \cdot Q_{SE}(t-i)$$

Ecuación 4-11. Flujo de calor por conducción

Donde los coeficientes a_i son los numeradores asociados a la excitación superficial de esa misma cara exterior (SE), b_i los numeradores asociados a la excitación en la otra superficie, y d_i los denominadores que relacionan la respuesta con el valor de la misma en los instantes anteriores.

Si se conociera el coeficiente que relaciona la transferencia convectivo-radiante en el interior de la cámara de aire con la temperatura superficial, se podría transformar la fórmula anterior en la siguiente:

$$Q_{SE}(t) = h_{CR} \cdot [T_{EQ}(t) - T_{SE}(t)]$$

Ecuación 4-12. Flujo de calor convectivo-radiante en la cara exterior del muro

$$T_{SE}(t) = \frac{1}{(1 + \frac{a_0}{h_{CR}})} \left(\sum_{i=0}^n d_i \cdot T_{EQ}(t-i) - \sum_{i=0}^n \frac{b_i}{h_{CR}} \cdot T_{SI}(t-i) - \sum_{i=1}^n (d_i + \frac{a_i}{h_{CR}}) \cdot T_{SE}(t-i) \right)$$

Ecuación 4-13. Temperatura superficial del muro en función de las excitaciones

Esta nueva formulación tiene con gran ventaja que la variable objetivo más clara y medible, como es la temperatura superficial exterior, y las excitaciones son la temperatura equivalente y la temperatura superficial interior. Además si deshace el cambio, y se vuelve a obtener el flujo de calor, de cara a posteriores estudios energéticos se obtiene, este mismo como función de las variables excitadores.

$$Q_{SE}(t) = \frac{1}{(1 + \frac{a_0}{h_{CR}})} \left(\sum_{i=0}^n a_i \cdot T_{EQ}(t-i) + \sum_{i=0}^n b_i \cdot T_{SI}(t-i) - \sum_{i=1}^n (d_i + \frac{a_i}{h_{CR}}) \cdot Q_{SE}(t-i) \right)$$

Ecuación 4-14. Flujo de calor convectivo-radiante

Analizada la formulación precedente del fundamento de funciones de transferencia, se procede a la aplicación del modelo de caracterización propuesto en el capítulo anterior. Como variable objetivo la temperatura superficial exterior del elemento, y como variables independientes o excitaciones la temperatura equivalente de la cámara y la temperatura superficial interior.

$$T_{SE}(t) = \sum_{i=0}^n a'_i \cdot T_{EQ}(t-i) + \sum_{i=0}^n b'_i \cdot T_{SI}(t-i) - \sum_{i=1}^n d'_i \cdot T_{SE}(t-i)$$

Ecuación 4-15. Particularización del modelo de caracterización simplificado

Obtenida la temperatura superficial exterior, variable objetivo medible en la experimentación prevista, se procede a la formulación del flujo de calor sobre esta superficie a partir del modelo de caracterización; resultando:

$$Q_{SE}(t) = \sum_{i=0}^n (h_{CR} \cdot d'_i - a'_i \cdot h_{CR}) \cdot T_{EQ}(t-i) + \sum_{i=0}^n (-h_{CR} \cdot b'_i) \cdot T_{SI}(t-i) - \sum_{i=1}^n d_i \cdot Q_{SE}(t-i)$$

Ecuación 4-16. Particularización del modelo de caracterización simplificado

Con el objeto de comprar la formulación actual con la anterior, se van a realizar los cambios necesarios para escribir el flujo de calor de forma idéntica a lo descrito por el tratamiento como funciones de transferencia.

$$Q_{SE}(t) = \frac{h_{CR}}{a'_0} \cdot \left\{ \sum_{i=0}^n (d'_i - a'_i) \cdot T_{SE}(t-i) + \sum_{i=0}^n (-b'_i) \cdot T_{SI}(t-i) - \sum_{i=1}^n \frac{a'_i}{h_{CR}} \cdot Q_{SE}(t-i) \right\}$$

Ecuación 4-17. Flujo de calor sobre la superficie exterior

Esta ecuación establece las relaciones entre los numeradores analíticos de la función e transferencia, y los que se obtendrían de la identificación del modelo de caracterización simplificado. Estas relaciones son:

$$d_i = \frac{a'_i}{a'_0} \quad a_i = \frac{h_{CR}}{a'_0} \cdot (d'_i - a'_i) \quad b_i = -b'_i$$

Ecuación 4-18. Relación entre los numeradores - denominadores analíticos y MCS

En el siguiente epígrafe “reducción” se verifican las relaciones encontradas a partir de los datos analíticos para los coeficientes de la función de transferencia teórica del muro.

4.2.2.2. Reducción

El objetivo es establecer el número de denominadores a tener en cuenta en función del paso de tiempo elegido y el sistema a caracterizar. A la par se establece un punto de partida al número de numeradores, y por tanto el modelo queda reducido.

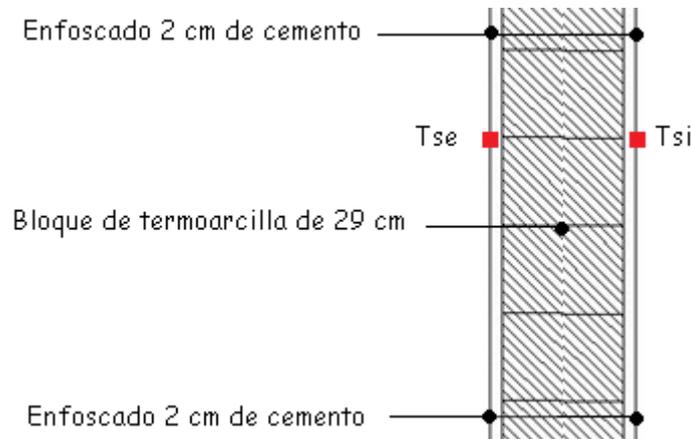


Figura 4-24. Esquema de las capas que componen el elemento interior (muro)

Capa	Espesor m	Densidad kg/m ³	Cp J/kg·K	Conductividad W/m·K
Termoarcilla	0.29	800	1000	0.3
Enfoscado	0.02 (x2)	2100	880	1.4
Homogéneo equivalente	0.33	957.6	985.5	0.33

Tabla 4-1. Composición y capas del muro

Tal y cómo se ha dicho en el capítulo dos, para aplicar el procedimiento de reducción se requiere decidir el número de denominadores en función del paso de tiempo elegido y de las constantes de tiempo del sistema.

El paso de tiempo se elige de una hora por similitud con las herramientas de simulación detallada. Por lo que se requiere como última constante de tiempo significativa aquella con un valor superior o igual a dos horas. También se puede hacer al revés, primero se fijan las constantes de tiempo significativas, y con ellas el paso de tiempo toma el valor de la mitad de la segunda constante de tiempo principal del sistema, ya que según el teorema de muestreo de Nyquist-Shannon, para poder replicar con exactitud la forma de una onda es necesario que la frecuencia de muestreo sea superior al doble de la máxima frecuencia a muestrear. Dicho de otro modo, la información completa de la señal analógica original que cumple el

criterio anterior está descrita por la serie total de muestras que resultaron del proceso de muestreo. No hay nada, por tanto, de la evolución de la señal entre muestras que no esté perfectamente definido por la serie total de muestras.

Las constantes de tiempo se calculan a partir de solución analítica del muro cuando se considera el problema de temperaturas superficiales impuestas. La ecuación del calor unidimensional a resolver es la siguiente:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$$

Ecuación 4-19. Ecuación del calor

Si se adimensionaliza la temperatura, con T2 como la temperatura impuesta en la superficie exterior y T1 como la temperatura impuesta en la superficie interior del muro:

$$\theta = \theta_0 = \frac{T_0 - T_2}{T_1 - T_2}$$

Ecuación 4-20. Temperatura adimensional

Y la solución analítica sin entrar en detalle, solo a modo ilustrativo resulta [151]:

$$\theta = \sum_i^{\infty} A_n \cdot F_n \cdot G_n = \sum_i^{\infty} \left(\frac{2}{n \cdot \pi} \right) [1 - 2 \cdot \theta_0] \cdot \left[\text{sen} \left(\frac{n\pi z}{L} \right) \right] \left[\exp \left(- \frac{n^2 \cdot \pi^2 \cdot \alpha t}{L^2} \right) \right]$$

Ecuación 4-21. Solución analítica

Donde las constantes de tiempo quedan ligadas a los autovalores y toman un valor de:

$$\tau_i = \frac{L^2}{i^2 \cdot \pi^2 \cdot \alpha}$$

Donde $i=1,2,\dots,n$; L es el espesor del muro y α la difusividad térmica

Puesto que el caso a caracterizar difiere del problema analítico resuelto, se va acometer también, el caso analítico con convección idéntica en cada superficie y con una convección en una superficie y en la otra temperatura impuesta. Las soluciones analíticas se extraen de la literatura [178] y las constantes de tiempo asociadas a cada caso son:

h [W/m ² ·K]	5	7	15	30	Conducción- Temp. Impuesta
τ_1 [h]	12.53	11.41	9.97	9.36	8.77
τ_2 [h]	1.33	1.24	1.10	1.04	0.97

Tabla 4-2. Muro expuesta a una convección idéntica por cada superficie.

h [W/m ² ·K]	5	10	20	30	Conducción- Temp. Impuesta
τ_1 [h]	11.95	10.38	9.56	9.30	8.77
τ_2 [h]	1.22	1.13	1.06	1.03	0.97

Tabla 4-3. Muro expuesto a una convección y temperatura impuesta en la otra.

h [W/m ² ·K]	3/20	3/30	5/20	5/30	Conducción- Temp. Impuesta
τ_1 [h]	12.69	12.13	10.62	10.15	8.77
τ_2 [h]	0.97	0.93	0.90	0.86	0.97

Tabla 4-4. Muro expuesto a dos convecciones diferentes.

El caso a estudio, probablemente, esté contenido en la casueística anterior. Por tanto, este estudio sirve para tomar una primera decisión: si el paso de tiempo es de una hora, solo habría que tener en cuenta las dos primeras constantes de tiempo. Y esto es así porque en el conjunto de casos estudiados la constante de tiempo segunda es del orden de una hora, por lo que se decide tomarla como la última constante de tiempo representativa.

Los denominadores resultan para este caso:

$$d_1 = -\left(e^{-\frac{1}{\tau_1}} + e^{-\frac{1}{\tau_2}}\right) \quad d_2 = e^{-\frac{1}{\tau_1}} \cdot e^{-\frac{1}{\tau_2}}$$

Ecuación 4-22. Formulación de denominadores

Particularizando el modelo de caracterización resulta:

$$T_{SE}(t) = a_0 \cdot T_{EQ}(t) + a_1 \cdot T_{EQ}(t-1) + a_2 \cdot T_{EQ}(t-2) + a_3 \cdot T_{EQ}(t-3) + b_0 \cdot T_{SI}(t) + b_1 \cdot T_{SI}(t-1) + b_2 \cdot T_{SI}(t-2) + b_3 \cdot T_{SI}(t-3) - d_1 \cdot T_{SE}(t-1) - d_2 \cdot T_{SE}(t-2)$$

Ecuación 4-23. Modelo de caracterización simplificado obtenido

Dónde:

- El coeficiente de transferencia convectivo-radiante: $h_{CR-FAÇADE} = h_C + h_R$
- La temperatura equivalente de transferencia convectivo-radiante en el interior de la cámara $T_{EQ-FAÇADE} = (h_C-FAÇADE \cdot T_{AIR-FAÇADE} + h_R-FAÇADE \cdot T_{R-FAÇADE}) / h_{CR-FAÇADE}$
- donde $T_{AIR-FAÇADE}$ es la temperatura del aire en la cámara, y $T_{R-FAÇADE}$ es la temperatura radiante de las superficies colindantes.
- La temperatura radiante a la que se ve afectado el muro interior es la debida a la superficie de las lamas y cristal exterior. Por este motivo, la temperatura es una media ponderada entre ambas a través de los factores de forma.

$$T_{R-FAÇADE} = F_{F-VW} \cdot T_{GLASS} + F_{F-PCMW} \cdot T_{PCM} \quad F_{F-VW} = 0.964 \quad F_{F-PCMW} = 0.036$$

(F_{F-VW} y F_{F-PCMW} factores de forma)

- El coeficiente de transferencia radiante fruto de la linealización de la radiación se calcula como $h_{R-FAÇADE} = 4 \cdot \sigma \cdot T_{Rm}^3$

4.2.3. Relación Flujo y temperatura

En el epígrafe anterior se ha establecido como variable objetivo la temperatura superficial del muro en el lado de la cámara de aire. Esto es así por ser una variable medible directamente, pero la variable de mayor utilidad es el flujo de calor. La finalidad de este epígrafe es establecer una relación entre el modelo identificado y un modelo equivalente en el que se mantengan las variables independientes pero la variable dependiente pase a ser el flujo de calor.

$$Q_S(t) = (h_{CR} - a_0 \cdot h_{CR}) \cdot T_{EQ}(t) + (h_{CR} \cdot d_1 - h_{CR} \cdot a_1) \cdot T_{EQ}(t-1) + (h_{CR} \cdot d_2 - h_{CR} \cdot a_2) \cdot T_{EQ}(t-2) + (-h_{CR} \cdot a_3) \cdot T_{EQ}(t-3) -$$

$$h_{CR} \cdot b_0 \cdot T_{SI}(t) - h_{CR} \cdot b_1 \cdot T_{SI}(t-1) - h_{CR} \cdot b_2 \cdot T_{SI}(t-2) - h_{CR} \cdot b_3 \cdot T_{SI}(t-3) - d_1 \cdot Q_S(t-1) - d_2 \cdot Q_S(t-2)$$

Agrupando:

$$Q_S(t) = a_0' \cdot T_{EQ}(t) + a_1' \cdot T_{EQ}(t-1) + a_2' \cdot T_{EQ}(t-2) + a_3' \cdot T_{EQ}(t-3) + b_0' \cdot T_{SI}(t) + b_1' \cdot T_{SI}(t-1) + b_2' \cdot T_{SI}(t-2) + b_3' \cdot T_{SI}(t-3) - d_1 \cdot Q_S(t-1) - d_2 \cdot Q_S(t-2)$$

Ecuación 4-24. Modelo de caracterización simplificado obtenido – flujo de calor

Dónde:

$$a_0' = h_{CR} - a_0 \cdot h_{CR} \quad a_1' = d_1 \cdot h_{CR} - a_1 \cdot h_{CR} a_2' = d_2 \cdot h_{CR} - a_2 \cdot h_{CR} a_3' = -a_3 \cdot h_{CR}$$

$$b_0' = -h_{CR} \cdot b_0 \quad b_1' = -h_{CR} \cdot b_1 \quad b_2' = -h_{CR} \cdot b_2 \quad b_3' = -h_{CR} \cdot b_3$$

Por tanto se requiere el cálculo del coeficiente de transferencia convectivo y la aproximación del radiante a partir de las temperaturas superficiales que se hayan medido. Esta necesidad convierte al coeficiente convectivo en un parámetro crítico del modelo.

Ahora bien, el cálculo de los coeficientes es complicado porque no existen correlaciones para esta geometría, por lo que se plantean una serie de experimentos específicos.

Los experimentos se realizaron durante finales de noviembre y principios de diciembre de 2011 en Lleida. Para ello se impulsó aire por la noche (12h) a temperaturas cercanas a 5°C y por el día (12h restantes del día) aire procedente del interior del habitáculo a una temperatura de 30°C.

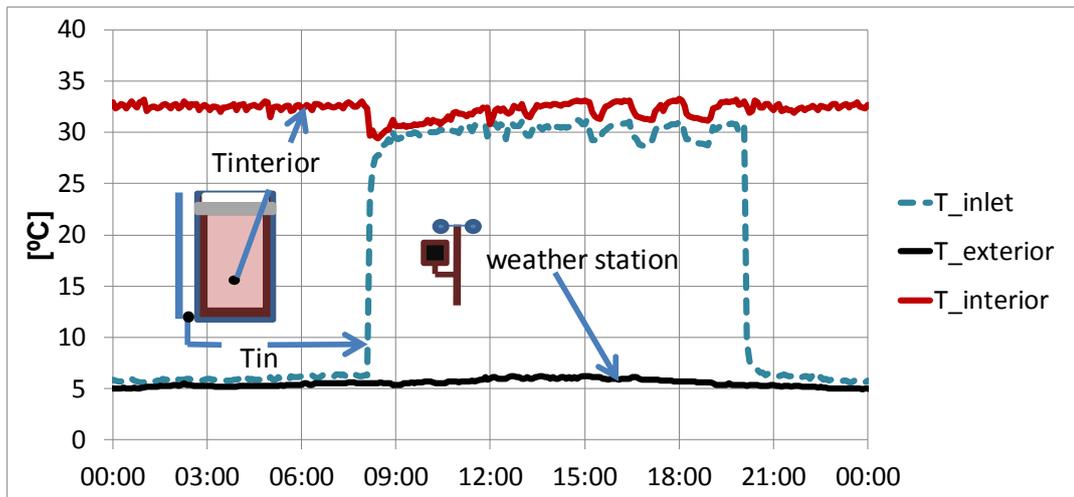


Figura 4-25. Evolución de temperaturas durante el experimento

Para el cálculo del coeficiente de transferencia se aplica el balance de energía.

$$\int_{t_1}^{t_2} Q_{air} \cdot dt = \int_{t_1}^{t_2} (Q_{conv,ee} + Q_{conv,iw} + Q_{conv,PCM}) \cdot dt$$

Ecuación 4-25. Balance de energía global en la cámara.

Asumiendo igualdad del coeficiente de película en todas las superficies implicadas, se obtiene la siguiente expresión.

$$\dot{m} \cdot C_p \sum_{i=1}^n (T_{out,i} - T_{in,i}) \Delta t = h_{conv} \sum_{i=1}^n [A_{ee} (\bar{T}_{ee,i} - \bar{T}_{a,i}) + A_{iw} (\bar{T}_{w,i} - \bar{T}_{a,i}) + A_{PCM} (\bar{T}_{PCM,i} - \bar{T}_{a,i})] \Delta t$$

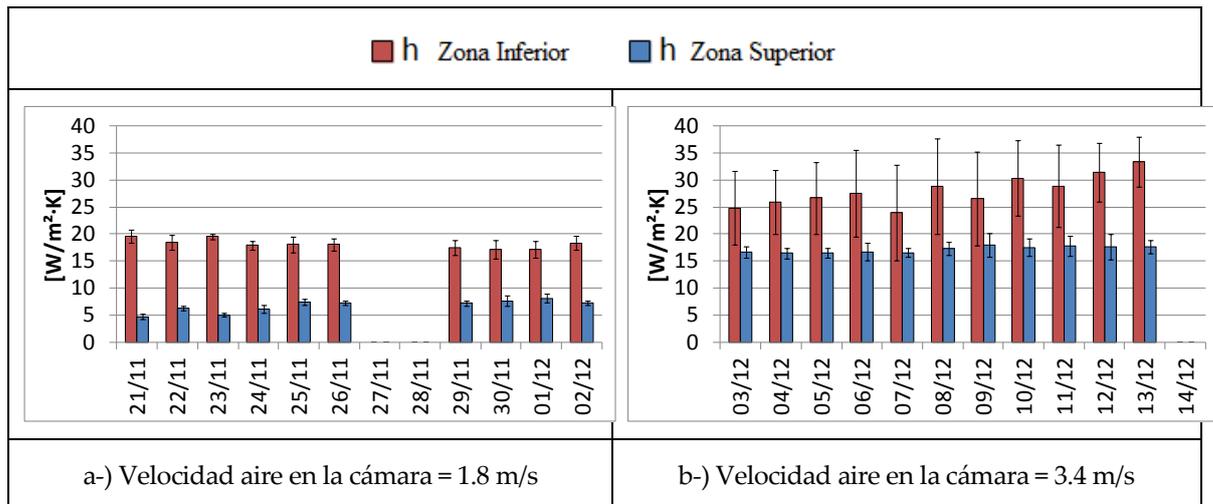
Ecuación 4-26. Balance de energía en la cámara particularizado

El calor que es absorbido por el aire depende del salto de temperatura entre la entrada y la salida, por lo que si la diferencia es pequeña los errores en las mediciones toman una elevada importancia. Para reducir el peso de esta incertidumbre en los resultados se realizan los experimentos cuando la temperatura de entrada del aire de entrada a la cámara presenta una diferencia superior a 10°C con respecto al material de PCM.

A lo largo de la fachada se distinguen dos zonas de transferencia, la parte inferior influenciada por la región de entrada y la zona final de la fachada. Tan and Charters [16,17] estudiaron la variación del Nusselt en la región de entrada de conductos. De acuerdo a este trabajo, el número de Nusselt puede tomarse estable a partir de una longitud de $L/D_e=50$ para un Reynolds de 9.5×10^3 . Para un número de Nusselt mayor la región de entrada se vuelve mayor. Para la fachada el número de Reynolds se estima entre 1×10^4 y 4×10^4 y la relación L/D_e es de 40.

La consecuencia es que el valor del coeficiente de transferencia convectivo cambia constantemente a lo largo de la fachada. Sin embargo, como una buena aproximación se puede considerar el dividir la fachada en dos partes: la parte inferior y la superior. El principal argumento de esta división es la variación del coeficiente de película, pero se le une las limitaciones ligadas a la monitorización: no existen suficientes puntos de medida como para tener una mayor división en la fachada.

El experimento fue diseñado para analizar dos velocidades promedio en el interior de la cámara (1.8 y 3.4 m/s medidas en la región de salida), lo que se corresponde con dos velocidades de los ventiladores inferiores. Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente figura:



1.8 m/s	Zona inferior	18 ±1.5 W/m²K
	Zona superior	8 ±1.3 W/m²K
3.4 m/s	Zona inferior	28 ±4.0 W/m²K
	Zona superior	17 ±2.0 W/m²K

Figura 4-26. Coeficiente de transferencia convectivo [W/m²·K]

A la vista de los resultados se obtienen las siguientes conclusiones:

- Si se distinguen dos zonas en la cámara parece claro hablar de dos coeficientes de transferencia, ya que como muestran los resultados son bastante diferentes.
- A medida que aumenta la velocidad aparece una mayor dispersión entre los coeficientes de película de ambas regiones, aunque en la zona inferior, probablemente influido por la región de entrada en la cámara, las desviaciones son mayores.

Puesto que los modos de operación son fijados, y los valores estimados tienen una incertidumbre controlada, se puede tomar por válido el valor del parámetro estimado diferenciándolo en cada una de las zonas de la cámara.

4.2.3.1. Identificación MCS Temperatura superficial

El modelo a identificar resulta:

$$T_{SE}(t) = a_0 \cdot T_{EQ}(t) + a_1 \cdot T_{EQ}(t-1) + a_2 \cdot T_{EQ}(t-2) + a_3 \cdot T_{EQ}(t-3) + b_0 \cdot T_{SI}(t) + b_1 \cdot T_{SI}(t-1) + b_2 \cdot T_{SI}(t-2) + b_3 \cdot T_{SI}(t-3) - d_1 \cdot T_{SE}(t-1) - d_2 \cdot T_{SE}(t-2) - d_3 \cdot T_{SE}(t-3)$$

Ecuación 4-27. Modelo de caracterización resultante.

Este modelo es función de la temperatura equivalente de la cámara de aire, siendo esta la temperatura convectivo-radiante asociada a la convección con el aire circulante y a la radiación con el cristal y las aletas de PCM.

En primer lugar se calcula la temperatura radiante media que ve el muro. Para ello se estima en 0.964 (F_{F-VW}) y en 0.036 (F_{F-PCM}) el factor de forma entre el muro y el vidrio y entre el muro y las aletas de PCM respectivamente. Para esta estimación se ha analizado la geometría en la sección principal de la fachada y se ha supuesto que el ancho es infinito, por lo que no se tienen en cuenta los efectos de borde.

La temperatura promedio se obtiene de la aplicación de la siguiente fórmula:

$$T_{R-FAÇADE} = F_{F-VW} \cdot T_{GLASS} + F_{F-PCM} \cdot T_{PCM}$$

Obtenida la temperatura radiante promedio, hay que obtener la temperatura equivalente como la media ponderada por los coeficientes de transferencia asociados a cada fenómeno. Hay que comentar que se ha linealizado la radiación por considerar diferencias de temperaturas inferiores a 50°C en el interior de la cámara. La formulación queda:

$$T_{EQ} = (h_{c-FAÇADE} \cdot T_{AIR-FAÇADE} + h_{r-FAÇADE} \cdot T_{R-FAÇADE}) / h_{cR-FAÇADE}$$

Ecuación 4-28. Variables independientes del modelo de caracterización

Calculadas las excitaciones, se lleva a cabo la identificación de los coeficientes. Resultando:

a ₃	a ₂	a ₁	a ₀	Sum	RP
0.096	-0.162	-0.036	0.405	0.303	0.987

Tabla 4-5. Valores ajustado para los coeficientes asociados a la temperatura equivalente T_{EQ}

La variable "sum" indica el sumatorio de todos los numeradores asociados a la temperatura equivalente. Y el régimen permanente resulta de aplicar la siguiente fórmula:

$$RP = \frac{a_0 + a_1 + a_2 + a_3}{1 - d_1 - d_2} = 0.987$$

En el caso de la temperatura superficial interior, es decir de las excitaciones procedentes del interior de la célula hacia la cámara:

b ₃	b ₂	b ₁	b ₀	Sum	RP
-0.085	0.420	-0.332	0.001	0.004	0.013

Tabla 4-6. Valores de los coeficientes asociados a la temperatura superficial interior T_{SI}

En este caso el efecto en el permanente de esta variable es más débil, 0.013, tal y como se esperaba por

estar amortiguada por el muro masivo.

Los denominadores:

d_0	1.000
d_1	-0.802
d_2	0.111
Sum	0.307

Tabla 4-7. Valores de los coeficientes asociados a la temperatura superficial exterior T_{SE}

De manera análoga al resto de comparaciones gráficas realizadas en la tesis, se muestra la evolución correlada y medida. Hay que comentar que el modelo se ajusta con los datos centrales de esta gráfica, quedan los extremos fuera de los datos usados en la correlación. El arranque del modelo parte de datos ciertos.

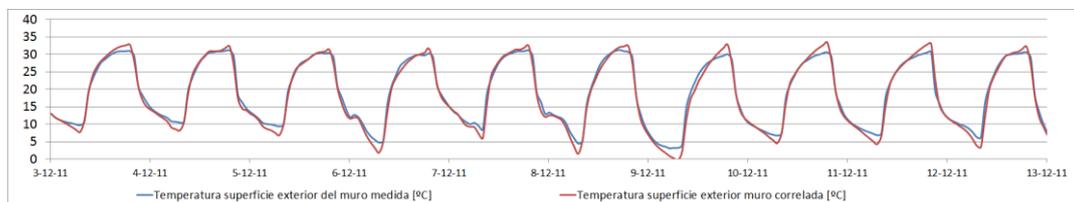


Figura 4-27. Comparación entre temperatura superficial medida y correlada según el modelo anterior.

El error máximo asciende al 4.3% y el promedio es de 1.4%.

Ahora bien, el modelo anterior permite comparar los valores teóricos de la composición y características del muro, con respecto a los resultados experimentales obtenidos.

Capa	Espesor m	Densidad kg/m^3	C_p J/kgK	Conductividad W/m·K
Termoarcilla	0.29	800	1000	0.3
Enfoscado	0.02 x 2	2100	880	1.4
Equivalente	0.33	957.6	985.5	0.33

Tabla 4-8. Propiedades térmicas de las componentes del muro y de su equivalente.

Si se asumen cierto el coeficiente de transferencia convectivo con un valor de $25.35 \text{ W/m}^2\text{K}$, la conductividad térmica del muro homogéneo equivalente debe tomar un valor de $0.1104 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ para que su respuesta en régimen permanente sea equivalente a la del modelo identificado. Este tipo de estudios son los que se entienden de calibración, es decir, encontrar los valores óptimos de definición del caso o el elemento de cara a que su comportamiento estático y dinámico sea equivalente a la realidad medida. En el trabajo doctoral se ha concluido [131], [134] que para llevar a cabo este proceso conviene usar un modelo simplificado como paso intermedio. Además la conductividad identificada toma un valor tres veces inferior al calculado para el muro equivalente. Este resultado no se va a justificar por estar fuera del alcance del trabajo doctoral, pero muestra la posible explotación del MCS como herramienta de calibración de herramientas detalladas. Lo único que cabe destacar es que el resultado guarda sintonía con los resultados descritos por las principales referencias sobre calibración [127].

4.2.3.2. Identificación MCS Flujo de calor

A partir del modelo para la temperatura superficial exterior, variable medida con cierta

calidad, se procede a obtener la relación que liga a esta temperatura con el flujo de calor absorbido o cedido por el elemento en esta superficie. Este modelo escrito en función de las temperaturas superficiales es idéntico al usado por las herramientas de simulación del comportamiento energético de edificios, las denominadas funciones de transferencia. Por lo que podría ser sustituido en una herramienta, pudiendo hablar de herramienta calibrada en torno a ese elemento por incorporar un modelo empírico del mismo.

1. Modelo simplificado: temperatura superficial exterior en función de las excitaciones:

$$T_{SE}(t) = a_0 \cdot T_{EQ}(t) + a_1 \cdot T_{EQ}(t-1) + a_2 \cdot T_{EQ}(t-2) + a_3 \cdot T_{EQ}(t-3) + b_0 \cdot T_{SI}(t) + b_1 \cdot T_{SI}(t-1) + b_2 \cdot T_{SI}(t-2) + b_3 \cdot T_{SI}(t-3) - d_1 \cdot T_{SE}(t-1) - d_2 \cdot T_{SE}(t-2)$$

2. Flujo de calor superficial en cara exterior en función de las excitaciones:

$$Q_s(t) = h_{cr} \cdot (T_{EQ}(t) - T_{SE}(t))$$

Sustituyendo el modelo anterior en la ecuación, resulta:

$$Q_s(t) = (h_{cr} - a_0 \cdot h_{cr}) \cdot T_{EQ}(t) + (h_{cr} \cdot d_1 - h_{cr} \cdot a_1) \cdot T_{EQ}(t-1) + (h_{cr} \cdot d_2 - h_{cr} \cdot a_2) \cdot T_{EQ}(t-2) + (h_{cr} \cdot d_3 - h_{cr} \cdot a_3) \cdot T_{EQ}(t-3) - h_{cr} \cdot b_0 \cdot T_{SI}(t) - h_{cr} \cdot b_1 \cdot T_{SI}(t-1) - h_{cr} \cdot b_2 \cdot T_{SI}(t-2) - h_{cr} \cdot b_3 \cdot T_{SI}(t-3) - d_1 \cdot Q_s(t-1) - d_2 \cdot Q_s(t-2) - d_3 \cdot Q_s(t-3)$$

Ecuación 4-29. Flujo de calor a través del elemento

3. Flujo de calor superficial en cara exterior en función de las temperaturas superficiales:

$$Q_s(t) = (k/e) \cdot (T_{SE}(t) - T_{SI}(t))$$

dando por válida la conductividad calculada

Se admite por válido el coeficiente de transferencia convectivo radiante calculado y se introduce la expresión anterior en la fórmula B):

$$Q_s(t) = h_{cr} \cdot (T_{EQ}(t) - T_{SE}(t)) \quad T_{EQ}(t) = Q_s(t) / h_{cr} - T_{SE}(t) \quad T_{EQ}(t-1) = Q_s(t-1) / h_{cr} - T_{SE}(t-1)$$

$$T_{EQ}(t-2) = Q_s(t-2) / h_{cr} - T_{SE}(t-2) \quad T_{EQ}(t-3) = Q_s(t-3) / h_{cr} - T_{SE}(t-3)$$

A partir de la expresión anterior:

$$Q_s(t) = (h_{cr} - a_0 \cdot h_{cr}) \cdot (Q_s(t) / h_{cr} - T_{SE}(t)) + (h_{cr} \cdot d_1 - h_{cr} \cdot a_1) \cdot (Q_s(t-1) / h_{cr} - T_{SE}(t-1)) + (h_{cr} \cdot d_2 - h_{cr} \cdot a_2) \cdot (Q_s(t-2) / h_{cr} - T_{SE}(t-2)) + (h_{cr} \cdot d_3 - h_{cr} \cdot a_3) \cdot (Q_s(t-3) / h_{cr} - T_{SE}(t-3)) - h_{cr} \cdot b_0 \cdot T_{SI}(t) - h_{cr} \cdot b_1 \cdot T_{SI}(t-1) - h_{cr} \cdot b_2 \cdot T_{SI}(t-2) - h_{cr} \cdot b_3 \cdot T_{SI}(t-3) - d_1 \cdot Q_s(t-1) - d_2 \cdot Q_s(t-2) - d_3 \cdot Q_s(t-3)$$

Y finalmente, la formulación del flujo de calor a través de la superficie exterior quedaría:

$$Q_s(t) = (a_0 \cdot h_{cr} - h_{cr}) \cdot T_{SE}(t) + (h_{cr} \cdot a_1 - h_{cr} \cdot d_1) \cdot T_{SE}(t-1) + (h_{cr} \cdot a_2 - h_{cr} \cdot d_2) \cdot T_{SE}(t-2) + (h_{cr} \cdot a_3 - h_{cr} \cdot d_3) \cdot T_{SE}(t-3) - h_{cr} \cdot b_0 \cdot T_{SI}(t) - h_{cr} \cdot b_1 \cdot T_{SI}(t-1) - h_{cr} \cdot b_2 \cdot T_{SI}(t-2) - h_{cr} \cdot b_3 \cdot T_{SI}(t-3) + (1 - a_0) \cdot Q_s(t) - (h_{cr} \cdot a_1) \cdot Q_s(t-1) - (h_{cr} \cdot a_2) \cdot Q_s(t-2) - (h_{cr} \cdot a_3) \cdot Q_s(t-3)$$

Ecuación 4-1. Modelo matemática para el flujo de calor a través del elemento.

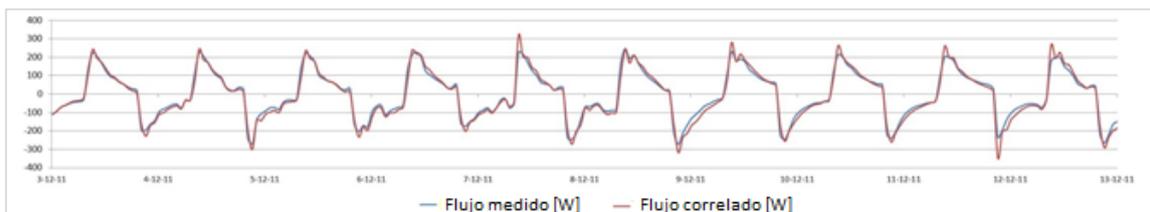


Figura 4-28. Flujo de calor a través del elemento opaco a partir de los datos medidos (azul), y estimado a partir de la aplicación del modelo de caracterización (rojo).

La obtención del modelo requiere la asunción de algunas hipótesis de bastante calado, tales como los coeficientes de transferencia convectiva o la modelización de los intercambios radiantes. Pero se ha llevado a cabo la identificación de un modelo simplificado de acuerdo a la metodología desarrollada en

el capítulo dos del trabajo doctoral sobre un elemento. Sobre el muro en cuestión, se ha realizado un proceso de reducción teórico que ha permitido estimar un orden para el modelo simplificado. Además se ha detallado la relación del modelo con los parámetros estáticos y dinámicos de la realidad caracterizada. Además se han descrito algunas pinceladas de cómo el modelo simplificado participaría en la calibración de herramientas detalladas, bien integrándose en ellas o permitiendo el ajuste de sus parámetros de definición.

4.2.4. Caracterización de pérdidas

La caracterización del coeficiente UA de un cerramiento requiere las siguientes mediciones de forma general:

- Temperatura del aire exterior
- Temperatura del aire interior
- Flujo de calor a través del cerramiento *
- Temperatura superficial interior y exterior del elemento (es aconsejable no sustituir estas variables por las temperaturas del aire exterior e interior, ya que existen más incertidumbres asociadas a ellas que a estas, siempre y cuando se eviten los efectos radiantes y el efecto de los puentes térmicos.
- Energía térmica aportada por el equipo de climatización ligado al espacio

(* Sustituye a la instalación de fluxómetros en el cerramiento, pero el experimento pierde claridad ya que en esta variable se concentran todas las cargas térmicas del espacio, no solo la debida a transmisión).

Es importante destacar, que tanto las mediciones anteriores, como los ejemplos prácticos que se comentan, pueden ser resueltos mediante la instalación de los sistemas de fluxómetros comerciales, lo cuales incorporan un “datalogger”, donde se registran las medidas anteriores y se realizan los cálculos pertinentes para la presentación en pantalla del UA configurado por el usuario.

Por consiguiente, el objetivo es estimar el UA durante el periodo de descarga de las aletas de PCM (aire caliente a través de la cámara – 30°C).

4.2.4.1. Promedio diario

Con objeto de eliminar de atenuar los efectos dinámicos se integra hasta una base de tiempo diaria para analizar la cantidad de energía fugada del sistema a través del elemento exterior. Esta energía fugada se relaciona con el valor promedio diario de la diferencia media de temperaturas interior y exterior:

$$Q_{p\acute{e}rdidas} = F_i \cdot (T_i - T_e)$$

- Q : integral de la energía (kWh) aportada por el sistema de climatización.
- T_e : Temperatura exterior media en el intervalo (aire y/o superficial).
- T_i : Temperatura interior media en el intervalo (aire y/o superficial).
- F_i correspondería a UA [kWh/K] el coeficiente de transferencia global del espacio con el exterior de cada periodo. El valor buscado \bar{F} sería el promedio de los valores F_i válidos calculados.

Lyberg y Honarbakhsh {{298 Lyberg 1989}} mostraron que el error cometido en esta estimación es muy sensible a la longitud de la base temporal, y al tipo de edificio, por lo que se descarta su uso para una base de tiempo inferior a un día.

La peculiaridad de esta fachada, además de tener el vidrio doble protegido con una capa de aislamiento de 2 cm, es la instalación de unas lamas huecas rellenas de material PCM, con el objetivo de almacenar

energía como elemento activo en el combate de cargas térmicas.

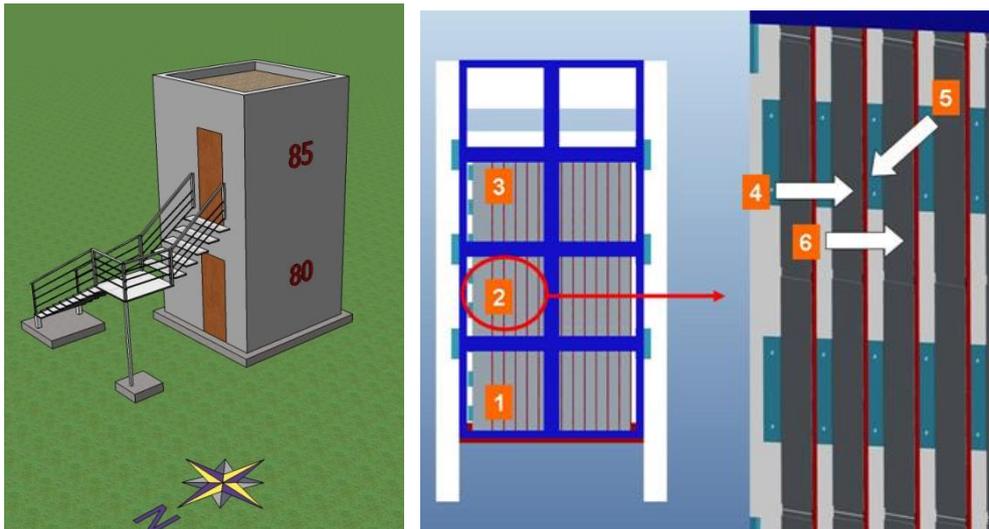


Figura 4-29. Izda: esquema de la célula experimental (2.4x2.4x5 m). Drcha: esquema de la fachada ventilada acoplada a la cara sur de la célula experimental.

Los puntos señalados de la imagen central se corresponden con las 3 zonas sobre las que se mide la temperatura del aire (1, 2 y 3). Además en cada una de esas tres zonas de la cámara se realizan diferentes mediciones sobre las aletas de PCM. La imagen de la derecha muestra la temperatura superficial medida (4, 5 y 6) en las dos lamina centrales de la cámara.

A modo simplificado las características de este sistema durante el experimento, y para el objetivo que concierne, son las siguientes:

- El espacio interior al que se acopla la fachada ventilada en la cara sur, se mantiene a una temperatura constante que oscila entre 28 y 32°C.
- La fachada ventilada recibe aire a través de tres ventiladores situados en la parte inferior de la misma. Este aire procede durante 12h (8 am a 20 pm) del interior del espacio, por lo que es un aire caliente con una temperatura media de 30°C, y durante las otras 12h el aire procede del exterior. De esta manera se realiza durante cada periodo de 24h un ciclo completo de carga y descarga de las lamina de PCM.
- El objetivo que se persigue, es la evaluación de las pérdidas térmicas a través del cerramiento vidrio+aislante+marco-metálico instalado en la fachada. Para ello se realiza un análisis en detalle del periodo de calentamiento (8 am – 20 pm) durante los días 03-12-2011 al 12-12-2011, en la mitad inferior de la fachada. La elección de la mitad inferior se hace para calcular el efecto más crítico de las pérdidas, ya que el aire caliente penetra en la cámara desde la parte inferior, y la medición existente permite esta zonificación sin perder información. El hecho de limitar el análisis a las primeras 4 horas es para reflejar con mayor verosimilitud la operación real de la fachada.
- Las mediciones que se van a realizar son: velocidad del aire en la cámara, temperatura superficial exterior e interior del muro, temperatura del PCM en las lamina, variables climáticas y temperatura del aire en la entrada y salida de la cámara.

El balance de energía que se debe hacer sobre este elemento es el siguiente:

$$\text{Energía calorífica transferida por el aire} = \text{Energía absorbida por el muro} + \text{Energía acumulada por las lamina de PCM} + \text{Pérdidas a través del cerramiento exterior (vidrio)}$$

Todos los términos del balance aparecen caracterizados salvo el de pérdidas que se quiere calcular, resultando el siguiente gráfico.

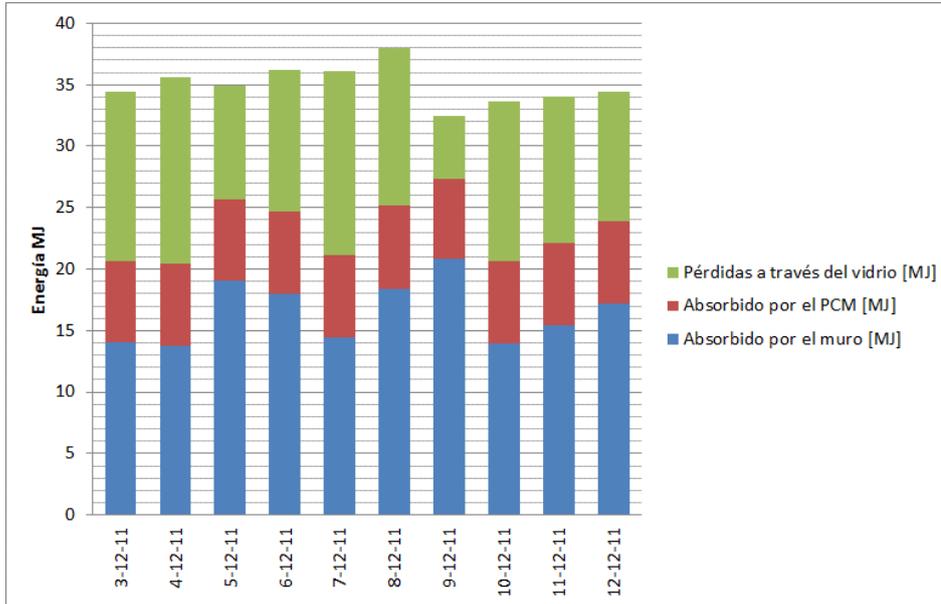


Figura 4-30. Balances de energía realizados sobre la fachada ventilada

Conocidas las suma de pérdidas diarias a través del cerramiento se procede a la caracterización del coeficiente de transferencia global.

$$Q_{PÉRDIDAS} = U_{GLOBAL} \cdot A_{TRANSFERENCIA} \cdot (T_{EQ} - T_{SA})$$

Ecuación 4-2. Pérdidas a través de la fachada ventilada con PCM

Dónde:

T_{SA} es la temperatura sol-aire exterior °C.

$A_{TRANSFERENCIA}$ es el área del cerramiento de la mitad inferior de la fachada m².

U_{GLOBAL} es el coeficiente de transferencia buscado W/m²·K

FECHA	<i>Teq Temp. Equivalente promediada en el interior de la fachada °C</i>	<i>Tsa Promedio diario de temperature sol-aire °C</i>	<i>(Teq-Tsa)</i>	<i>UA W/K</i>	<i>U W/m²K</i>
3-12-11	26.85	10.60	16.25	19.56	4.29
4-12-11	31.39	17.88	13.51	25.87	5.67
5-12-11	26.64	12.81	13.83	15.40	3.38
6-12-11	29.28	17.52	11.76	22.68	4.97
7-12-11	31.11	17.69	13.43	25.87	5.67
8-12-11	29.37	18.57	10.80	27.50	6.03
9-12-11	27.54	10.51	17.03	6.88	1.51

10-12-11	29.16	11.45	17.71	16.94	3.71
11-12-11	29.21	10.95	18.25	15.12	3.32
12-12-11	28.89	14.06	14.83	16.53	3.63
<i>Superficie 4.56 m²</i>			<i>Promedio</i>		4.22

Tabla 4-9. Tabla de resultados del análisis realizado sobre la fachada ventilada

El resultado arroja que el coeficiente global promedio de transferencia a través del cerramiento es de 4.22 W/m²-K

Para conocer la validez de este resultado se realiza un análisis del orden de magnitud esperado para este coeficiente evaluando los componentes que lo forman:



Vidrio

$$U = 3.5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

$$H_e = 25 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

$$H_i = 7.7 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

$$1/U = 1/h_e + R_v + 1/h_i$$

$$R_v = 0.12 \text{ m}^2 \text{ K/W}$$



Aislante

$$e = 0.02 \text{ m}$$

$$K = 0.03 \text{ W/mK}$$

$$R_i = 0.66$$



Vidrio + Aislante

$$1/U_{v+i} = 1/h_e + R_v + R_i + 1/h_i$$

$$U_{v+i} = 1.11 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$



Marco metálico

$$U_F = 14 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

Agrupando:



Escenario 1: 80% del area (vidrio + aislante)+20%(marco metálico)

$$1/U_g = 0.8U_{v+i} + 0.2U_F$$

$$U_g = 3.7 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

Escenario 2: 70% del area (vidrio + aislante)+30%(marco metálico)

$$1/U_g = 0.7U_{v+i} + 0.3U_F$$

$$U_g = 5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

$$U_g = 5 - 3.7 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

Esta estimación del orden de magnitud posible del coeficiente global de transferencia de calor a través del cerramiento, sirve de validación del valor calculado con anterioridad. En el anexo 5 se hace el cálculo de pérdidas de toda la célula sin la fachada ventilada con PCM siguiendo la metodología definida por la organización DYNASTEE [146]

4.3. APLICACIÓN 3 – CHORUS

4.3.1. Descripción

Este trabajo cuenta con datos experimentales procedentes del trabajo realizado en el marco del Proyecto CHORUS: “Sistema avanzado para gestión energética integral en instalaciones de grandes consumidores” (PI-1213/2013). Estos datos aparecen en el epígrafe 3.3.7 Estudio 5 – Edificio “UNKNOWN”. En el marco del proyecto este producto cumplió la tarea de servir de herramienta de predicción de consumos del edificio para su integración en un software de gestión energética avanzado.

En el marco de la tesis se demuestra como el modelo de consumo integrado es válido como herramienta de predicción de consumos, y se analiza en más detalle su obtención.

Por consiguiente, se deciden usar datos de simulación en los primeros estudios de esta aplicación para poder usar el nivel 3, ya que en el marco del proyecto no se ha contado con un edificio real con mediciones de consumos, temperaturas interiores y clima, si no que solo se ha dispuesto de consumos eléctricos de varios edificios. Por confidencialidad solo se muestra uno de ellos.

El edificio que se analiza vía simulación pertenece a la base de datos del grupo de Termotecnia de la Universidad de Sevilla y tiene una construcción según CTE 2006, está implementado en la herramienta CALENER GT, y se simula mediante el motor de cálculo de DOE2-2.

Se elige una sola oficina del edificio por las siguientes razones:

- Su climatización es independiente del resto del edificio, dispone de un sistema autónomo ROOF-TOP, sistema objeto a estudio.
- Al ser una zona única, sirve de “laboratorio” para probar posibles variaciones de horario, de temperatura de consigna, de características de la epidermis... y verificar que el procedimiento es válido, de una forma limpia antes de su aplicación sobre un edificio real y datos medidos.

En las siguientes imágenes se muestran tanto el edificio completo, pero hay que tener en cuenta que el estudio se centra en una de zonas térmicas de ese edificio. A lo largo de la experimentación llevada a cabo durante el desarrollo del modelo se han variado las características de la epidermis de la zona estudiada, desde una situación sin huecos hasta el caso presentado, con su cerramiento orientado al sur y vidriado.

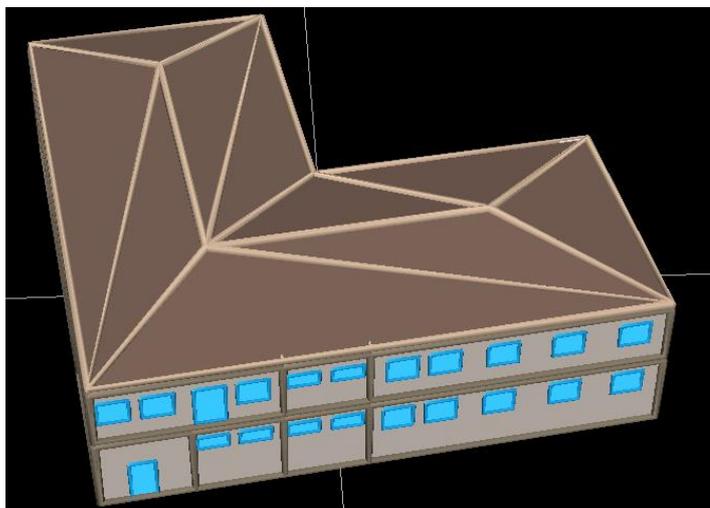


Figura 4-31. Edificio gran terciario ejemplo. Imagen de CALENER GT.

El sistema de climatización autónomo elegido está dimensionado para cubrir la carga punta de calefacción y refrigeración manteniendo una temperatura de consigna de 20 y 25°C respectivamente en

cada uno de los regímenes del edificio.

Durante la simulación, se extraen de DOE2-2 las variables en base horaria referidas al sistema, a la zona y a la climatología, necesarias para el desarrollo del modelo: carga térmica entregada por la batería (total y latente) tanto en modo refrigeración como calefacción, temperatura interior de la zona, temperatura y humedad exterior, radiación solar, velocidad del viento. No obstante, el nivel máximo de monitorización requerido contempla medición de consumo eléctrico en cuadro, medición de temperatura interior representativa de las zonas acondicionadas, temperatura exterior y radiación global horizontal.

4.3.2. Síntesis de los principales estudios realizados

En los epígrafes siguientes se presentan algunos de los estudios básicos realizados a partir de los datos de simulación. Cabe mencionar que se ha elegido destacar aquellos que enseñan al lector a las decisiones básicas que debe de tomar cuando aplique este producto a un edificio cualquiera.

En primer lugar, se distinguen cuatro niveles, nivel 0, que es puramente estocástico, y niveles 1,2 y 3, los cuales incorporan variables físicas a los modelos.

Para el nivel 0 distinguimos los siguientes:

1. Cómo elaborar el patrón más adecuado a nuestro perfil de consumo y al nivel usado.
2. Orden del modelo de dispersión.
3. Incorporación del patrón a las variables dependientes del modelo.
4. Predicción a corto y largo plazo.

Para el resto de niveles cabe mencionar:

1. Elección de la base de tiempo más adecuada para caracterizar los consumos.
2. Orden del modelo de dispersión
3. Patrón adecuado para poder asignar cada consumo integrado en la base de tiempo elegida a un consumo horario.
4. Predicción a corto y largo plazo.

En los niveles físicos la elección de la base de tiempo, para realizar modelos de consumo integrado, y el patrón de consumo son las variables más importantes a elegir ya que una mala elección de ambas puede ocasionar grandes errores en los modelos. La base de tiempo elegida nos impone el número de denominadores que caracterizan los efectos de inercia. (1 denominador para base 6h y dos denominadores para base 1h).

Sin embargo en el nivel estocástico la variable más importante es el orden del modelo de dispersión, que debe ser elegido la primera vez que se caracterice el consumo, la base de tiempo elegida para realizar la metodología es siempre horaria. También el patrón de consumo es importante en este tipo de nivel y al igual que en los casos anteriores una mala elección del mismo provoca un mal ajuste del modelo.

Los niveles físicos caracterizan el consumo del edificio con un modelo de temperatura interior en períodos de no funcionamiento y con un modelo de consumo (integrado o no, dependiendo del perfil del consumo real) en períodos de funcionamiento, ya que la temperatura interior cuando existe consumo de climatización se toma igual a 25 °C en régimen de refrigeración.

El siguiente apartado muestra los resultados obtenidos al realizar el estudio de los distintos niveles de predicción, aplicados al consumo de climatización (eléctrico y térmico) para el edificio simulado en DOE2-2.

Hay que comentar que se ha denotado como “consumo real” al consumo de climatización de la situación referencia, es decir, el procedente de la simulación detallada en DOE2-2.

4.3.3. Estudio 0: caracterización climática

4.3.3.1. Descripción y objetivos

Este estudio es equivalente a un experimento en evolución libre, es decir se deja evolucionar el edificio sin la actuación del equipo de climatización. De esta forma se pretende caracterizar los efectos dinámicos (denominador), y los efectos de las excitaciones climáticas. Estos segundos se van a traducir en un aumento o descenso de la temperatura interior.

Para ello se va a ir a un modelo integrado en una base de tiempo diaria, con objeto de:

- Reduce el efecto de posibles incertidumbres
- Aumenta la aplicabilidad del modelo
- Posibilidad de establecer restricciones físicas
- Permite posibles comparaciones futuras entre diferentes escenarios para el mismo edificio o entre edificios (esencia física).

Metodología:

1. A partir de un experimento en evolución libre sin fuentes internas se obtiene la influencia de la radiación en la temperatura interior. MCS en base diaria de la Temperatura Promedio Interior
2. Además de ese experimento se obtiene la duración de la estación de calefacción y refrigeración, ya que se puede ver cuando se requiere dar calor/frío para mantener la temperatura de consigna.
3. Conocido el efecto de la radiación, se realiza un experimento de funcionamiento normal sin operación del equipo de acondicionamiento (evolución libre). El objetivo es estimar el efecto de las ganancias internas en el edificio.
4. Identificación del modelo de temperatura interior promedio en paradas y fin de semana
5. Identificación del modelo de consumo integrado en el periodo seleccionado y evolución de temperatura cuando el Sistema opera.
6. Definición de la dispersión $d(t)$ con respecto al consumo real en la base de tiempo final.
7. Aplicación del consumo estimado y cálculo del valor de la dispersión $y(t)$

4.3.3.2. Resultados

A partir de un experimento en evolución libre sin fuentes internas se obtiene la influencia de la radiación en la temperatura interior. Mod. Diario Temp Promedio Interior

$$T_{INT}(t) = a_0 \cdot T_{EXT}(t) + a_1 \cdot T_{EXT}(t-1) + a_2 \cdot T_{EXT}(t-2) + a_3 \cdot T_{EXT}(t-3) + a_4 \cdot T_{EXT}(t-4) + b_0 \cdot RAD(t) + b_1 \cdot RAD(t-1) + b_2 \cdot RAD(t-2) + b_3 \cdot RAD(t-3) + b_4 \cdot RAD(t-4) + d_1 \cdot T_{INT}(t-1)$$

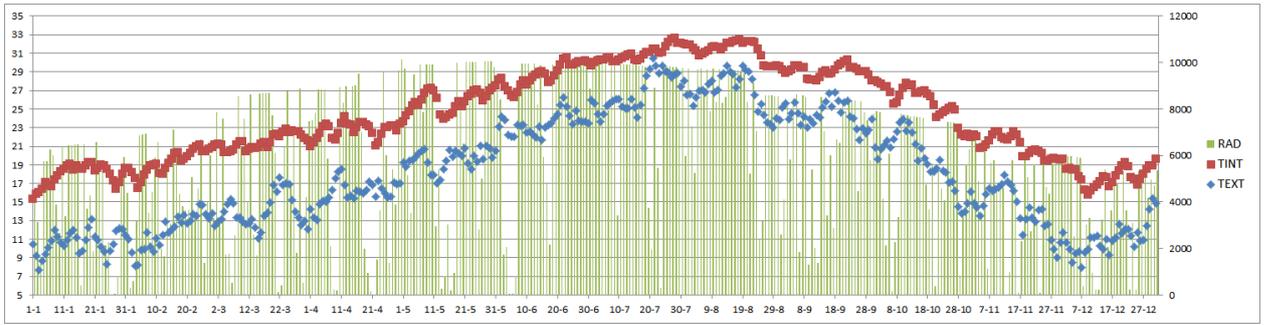


Figura 4-32. Resultados diarios de la simulación en evolución libre. Promedio de temperatura interior (rojo), promedio de temperatura seca exterior (azul) y radiación integrada diaria (verde)

De la teoría se sabe que en régimen permanente si no existiera radiación, la temperatura media interior y la exterior coincidirían. Por esta afirmación y haciendo uso de lo que se ha descrito con anterioridad se puede obtener el valor del parámetro k . El modelo con los datos de Julio resulta:

TINT (T-1)	0.150000
TEXT	0.350651
TEXT (T-1)	0.122378
RAD	0.000063
RAD (T-1)	0.000101
TEXT (T-2)	0.140655
RAD (T-2)	0.000122
TEXT (T-3)	0.105187
RAD (T-3)	0.000082
TEXT (T-4)	0.131130
RAD (T-4)	0.000060

Tabla 4-10. Modelo de temperatura interior en evolución libre y base de tiempo 6h.

Denominador toma un valor de 0.15, de donde se despeja la constante de tiempo como:

$$\tau_1 = -\frac{1}{\ln(0.15)} = 12.65 \text{ h}$$

Y el parámetro K :

$$k = \frac{\sum_{i=0}^m bb_i}{1 - \sum_{i=1}^n d_i} = \frac{(0.063 + 0.101 + 0.122 + 0.082 + 0.062)/1000}{1 - 0.15} = 0.00065 \frac{C}{Wh \cdot m^2}$$

De esta forma se obtiene el valor de los parámetros K y su dependencia climática. Con este parámetro se tendrá en cuenta la radiación para el nivel 3. Realizando el mismo proceso con el resto de meses y sus modelos respectivos se obtienen los siguientes valores en la base de tiempo que se elija.

24h	6h
K JUNIO	K JUNIO
0.000651	0.002440
K JULIO	K JULIO
0.000504	0.001938
K AGOSTO	K AGOSTO
0.000483	0.002012
K SEPTIEMBRE	K SEPTIEMBRE
0.000730	0.002238
K ESTACION	K ESTACION
0.000578	0.002403

Tabla 4–11. Valores del parámetro K para la estación de refrigeración y el edificio a análisis.

El estudio cero permite concluir con una caracterización climática simplificada, lo que reduce la complejidad del modelo y la cantidad de datos experimentales necesitados.

4.3.4. Estudio 1: elección del nivel de caracterización

4.3.4.1. Descripción y objetivos

La primera simulación realizada tiene un consumo eléctrico real que sigue el perfil mostrado en la figura:

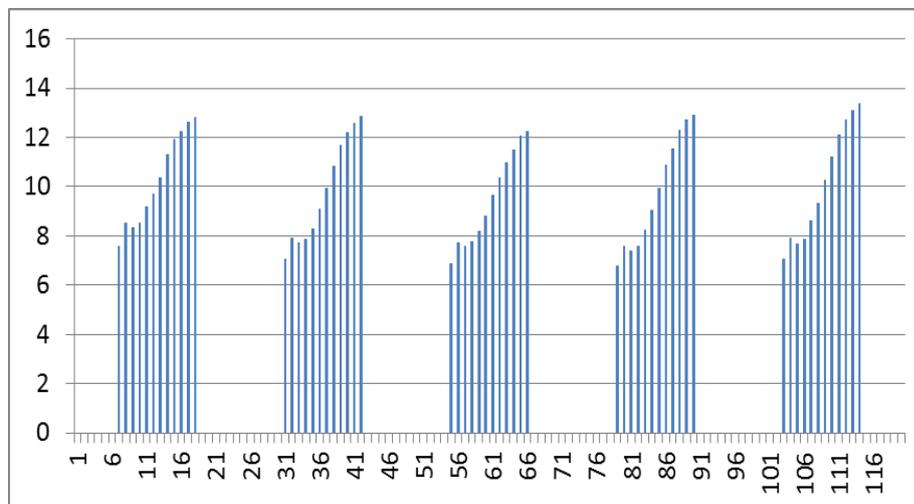


Figura 4-33. Consumo eléctrico real de climatización en el primer caso simulado en DOE2 -2 del 2 al 6 de Julio.

Los resultados mostrados son obtenidos usando los meses de Julio y Agosto para la creación de los modelos físicos y patrones. Se realizará la predicción a partir del día 18 de Septiembre a las 7:00.

En primer lugar se muestran los resultados para los tres niveles físicos (1,2 y 3). La base de tiempo elegida en este primer caso simulado es de 6h y por la tanto sólo necesita un denominador para caracterizar los efectos de inercia. El orden del modelo de dispersión es igual a 24.

4.3.4.2. Obtención de modelos

4.3.4.2.1. Nivel 3

. Consideramos conocidos los datos desde el 1 de Julio al 18 de Septiembre a las 7:00. En primer lugar se realiza la predicción de 24 h a partir del 18 de Septiembre a las 7:00.

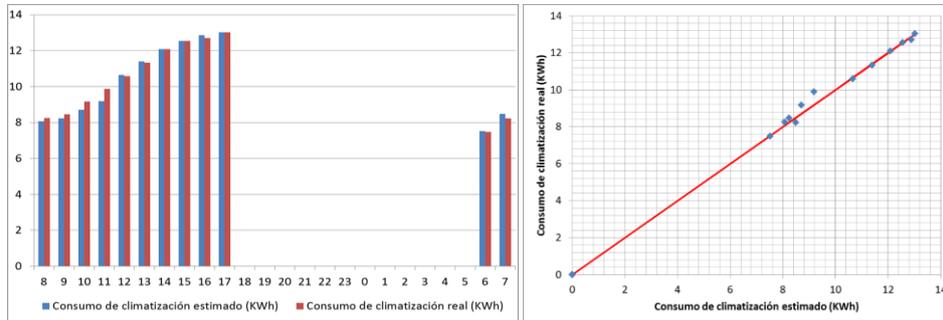


Figura 4-34. Estimación de 24 h de consumo eléctrico de climatización a partir del 18 de Septiembre a 7 h usando nivel 3. (corto plazo, azul estimado y rojo referencia)

La siguiente prueba es estimar a partir del 18 de Septiembre a las 7:00, cuatro días completos hasta el 21 de Septiembre a las 23:00. Se muestran los resultados para el último día de predicción.

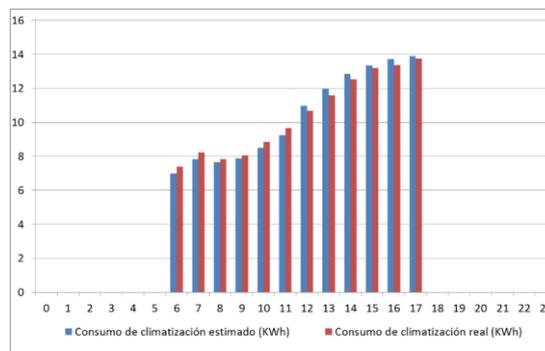


Figura 4-35. Predicción a medio-corto plazo usando nivel 3. (azul estimado y rojo referencia)

El modelo obtenido en el nivel 3 es aceptable y sus resultados cumplen los requerimientos establecidos.

4.3.4.2.2. Nivel 2

En primer lugar se realiza la predicción de 24 h a partir del 18 de Septiembre a las 7:00, igual al caso anterior obteniéndose el siguiente resultado.

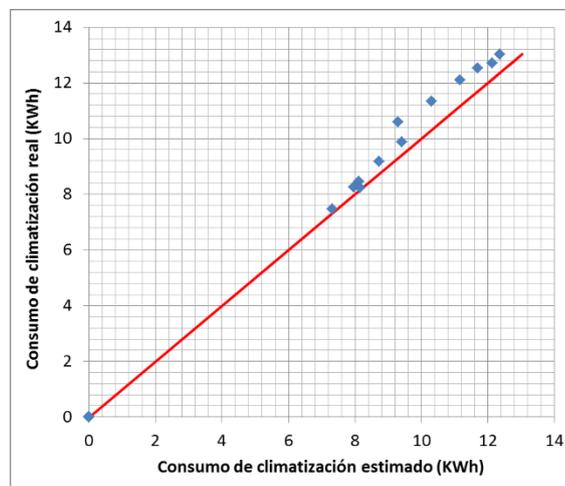


Figura 4-36. Comprobación del ajuste de la predicción realizada a partir de las 7 h el 18 de Septiembre para el consumo eléctrico de climatización usando nivel 2.

Los resultados en el nivel dos, para una comparativa idéntica al nivel 3 son de peor calidad en todas las pruebas realizadas. Esto es lógico porque el nivel dos pierde capacidad al perder el efecto de la radiación.

4.3.4.2.3. Nivel 1

El último nivel físico a analizar será el nivel 1, cuyos resultados mostraremos a continuación. Se realizarán las mismas pruebas que se han realizado en los dos casos anteriores para probar la predicción tanto a corto como a medio plazo.

En primer lugar se muestran los resultados corto plazo, es decir la predicción de 24 a partir del 18 de Septiembre a las 7:00.

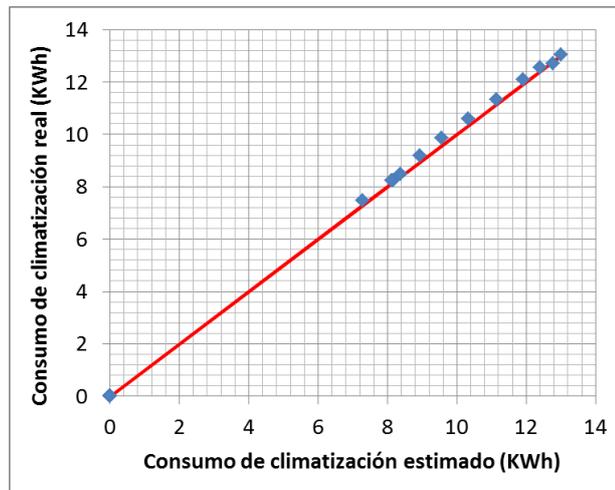


Figura 4-37. Comprobación del ajuste de la predicción realizada a partir de las 7 h el 18 de Septiembre para el consumo eléctrico de climatización usando nivel 1.

Error relativo máximo (%)	3.22
Error relativo promedio (%)	1.6

Tabla 4-12. Errores obtenidos a corto plazo en la predicción usando nivel 1.

El nivel uno es aceptable, pero hay que tener en cuenta que tiene como dato cierto la temperatura interior del espacio, por lo que el uso de este nivel requiere conocer con bastante certidumbre el valor de esa variable.

Para los casos en los que la medición sea errónea o no representativa del edificio el nivel 1 queda desaconsejado.

4.3.4.2.4. Nivel 0

Las pruebas realizadas a este nivel serán las mismas que para el resto de niveles para poder luego realizar una comparación de los mismos. El orden del modelo elegido para climatización es 36 y en los ajustes de los coeficientes del modelo es incluido el patrón como variable de la que depende la dispersión, además de los 36 valores en instantes anteriores de la propia variable a modelar. El patrón usado en este nivel será aquel que diferencie cada día de la semana.

En primer lugar se muestra la predicción de 24 h a partir del 18 de Septiembre a las 7:00, el resultado obtenido es el siguiente:

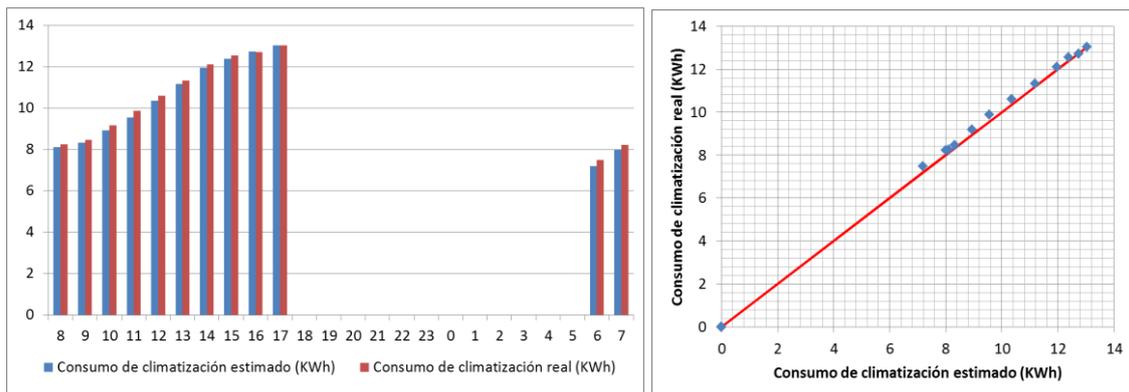


Figura 4-38. Estimación de 24 h de consumo eléctrico de climatización a partir del 18 de Septiembre a 7 h usando nivel 0.

El nivel cero ofrece unos buenos resultados por lo que demuestra su utilidad cuando se ha apuesta por medir consumos eléctricos únicamente. Es importante destacar que este modelo es tanto más exacto cuanto más se parezca el consumo de climatización a un patrón, pero que a largo plazo puede cometer errores significativos si hay cambios en el edificio.

4.3.4.3. Validación del modelo

Para la validación del modelo elegido se han realizado distintas pruebas al mismo:

1. Considerando como cierto del 1 de Junio al 5 Julio, predicción 24 h del 6 de Julio (uno de los meses con el cual se realiza el patrón y modelo de caracterización)

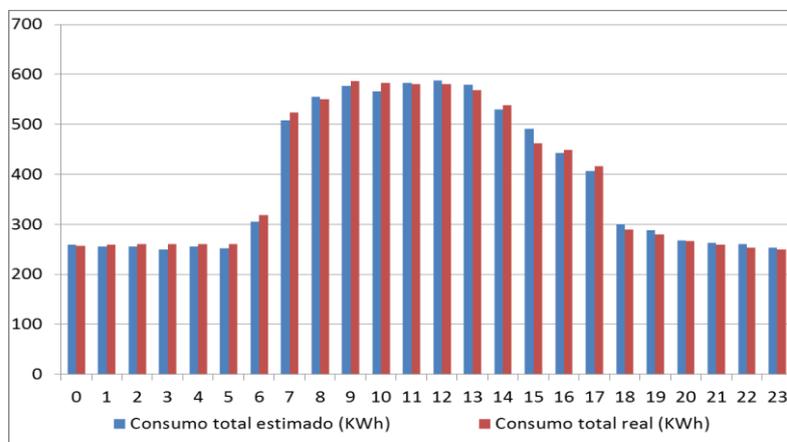


Figura 4-39. Predicción horaria del consumo total del edificio (KWh) el 6 de Julio.

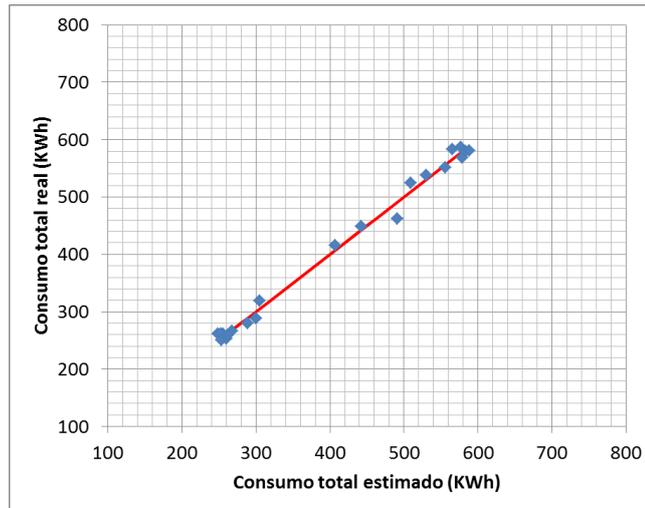


Figura 4-40. Comprobación del ajuste de la predicción del 6 de Julio.

La gráfica anterior da una idea del buen ajuste, no obstante los valores del error son: error promedio del 2.29 % y error máximo 6.34 %.

2. Considerando como cierto del 1 de Junio al 7 de Agosto, predicción 24 h del 8 de Agosto.

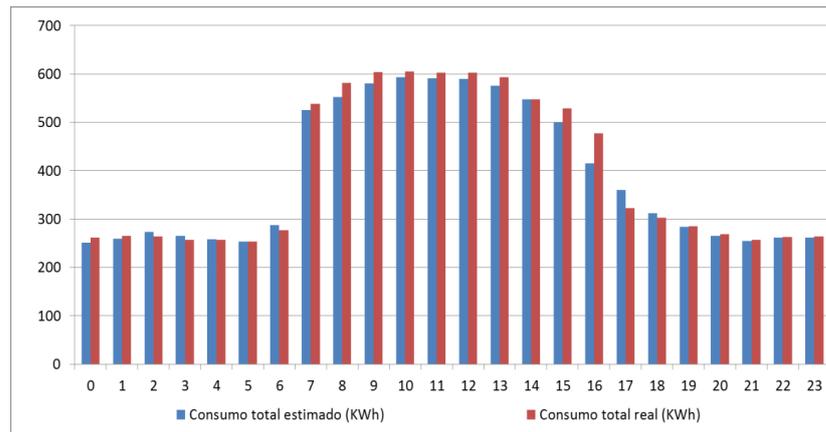


Figura 4-41. Predicción horaria del consumo total del edificio (KWh) el 8 de Agosto.

Para este día el error promedio sube a 3.18 % y el error máximo se duplica 12.92 %. Existe un cambio en el consumo del edificio en agosto con respecto a los días usados para la creación del modelo. No obstante el modelo es capaz de corregirse para tener controlado el error máximo y evitar su propagación.

3. Considerando como cierto del 1 de Junio al 6 de Noviembre, predicción 24 h del 7 de Noviembre (cambio de estación).

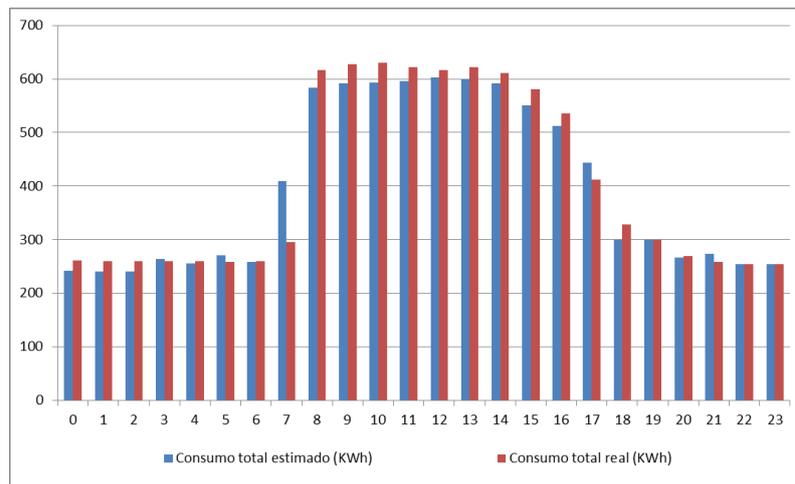


Figura 4-42. Predicción horaria del consumo total del edificio (KWh) el 6 de Noviembre.

Se observa un cambio de horario, produciéndose el arranque de una forma más brusca a los días tipo 2, por ello se produce un error relativo (%) elevado a las 7h.

4.3.4.4. Resultados y conclusiones

Conclusión 1

La primera conclusión es que la metodología es igual de eficiente para el consumo eléctrico o bien para el consumo térmico, es decir, para la demanda térmica medida como la cantidad de energía de calor o frío entregado al fluido caloportador que climatiza los espacios.

Conclusión 2

En un medio plazo de varias semanas es cuando se pueden apreciar las diferencias entre los modelos. Por ello, y a diferencia de los resultados del corto plazo mostrados anteriormente, se muestran los errores para la estimación mensual completa en base horaria de los modelos para septiembre.

Largo plazo	Error relativo máximo (%)	Error relativo promedio (%)
Nivel 3	5.41	3.01
Nivel 2	13.53	8.6
Nivel 1	7.92	5.57
Nivel 0	8.22	5.65

Tabla 4-13. Errores de la estimación del mes completo de septiembre por los 4 niveles

Se puede ver como el nivel 3 es mejor que ninguno, ofreciendo un error máximo inferior y un valor promedio mejor por lo que su adaptación es muy aceptable. El resto de niveles pierden calidad, siendo lógico que el nivel cero presente buenos resultados ya que los datos para su identificación proceden de septiembre y por tanto el modelo estocástico todavía permanece calibrado.

Esta segunda conclusión ofrece otra mayor: puede no merecer la pena ir al nivel 1 o 2 si los datos experimentales que se disponen no son bueno o el edificio por sus características no lo permite (altas ganancias solares).

Conclusión 3

En este caso el objetivo es analizar la explotación del modelo lejos de los datos usados para su identificación. En el estudio que se expone a continuación se realiza, suponiendo conocidos los consumos de Julio y agosto, la predicción diaria del consumo de climatización del mes de septiembre, obteniendo los siguientes resultados para nivel 0 y 3:

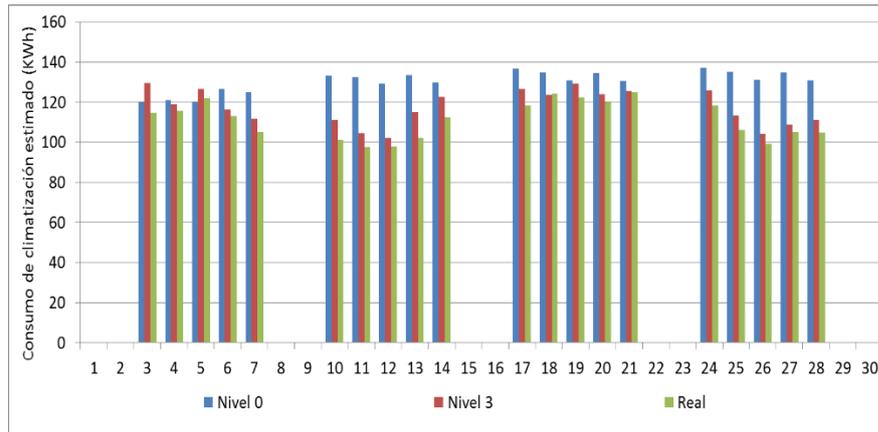


Figura 4-43. Predicción diaria a largo plazo Nivel 0 vs Nivel 3 (Verde consumo de referencia, nivel 0 azul y Rojo Nivel 3)

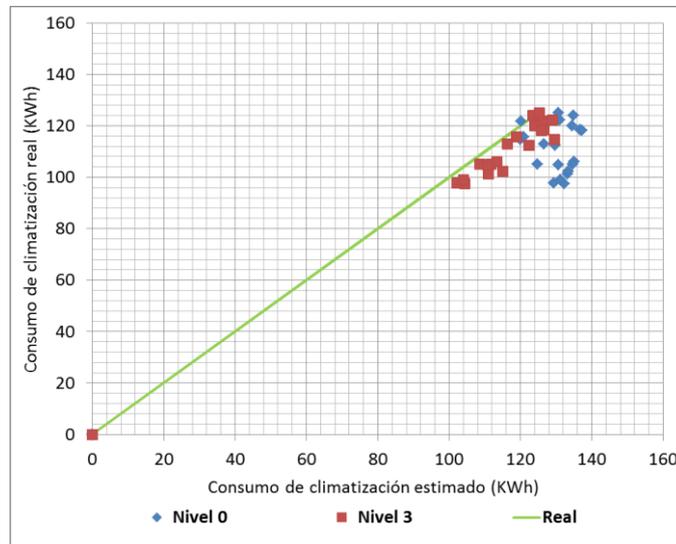


Figura 4-44. Comprobación del ajuste de la predicción diaria realizada el mes de Septiembre para el consumo eléctrico de climatización usando nivel 0 y nivel 3.

Como se puede observar a corto plazo se realiza una predicción aceptable con ambos niveles, sin embargo para la predicción a largo plazo, el nivel 3 realiza una predicción más ajustada al consumo real que se produce en dicho mes, ya que de todos los algoritmos mencionados es el nivel que integra al MCS como patrón.

4.3.5. Estudio 2: consumos sin patrón aparente

4.3.5.1. Descripción y objetivos

En este tercer estudio que se presenta se pretende demostrar la validez del modelo cuando el máximo común divisor diario es la hora. Es decir, cuando el consumo es bastante variable y errático. Para ello se define un caso en DOE2-2 con un uso al azar y definido de forma aleatoria durante todo el año.

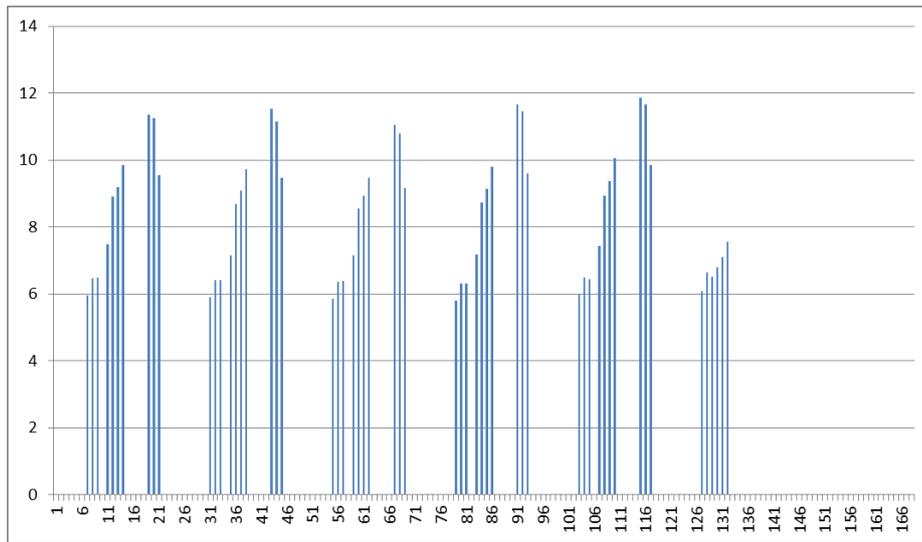


Figura 4-45. Consumo eléctrico real [kWh] primera simulación DOE2-2 del 2 al 6 de Julio.

Los resultados mostrados son obtenidos usando los meses de Julio y Agosto para la creación de los modelos físicos y patrones. Se realizará la predicción a partir del día 18 de Septiembre a las 7:00. La caracterización y predicción son aplicadas del mismo modo. La base de tiempo elegida en este segundo caso simulado es de 1h y por la tanto necesita dos denominadores para caracterizar los efectos de inercia. El orden del modelo de dispersión es igual a 24. En los niveles físicos para la base horario no se necesitan los patrones.

4.3.5.2. Resultados

Tras el estudio anterior se decide solo analizar la diferencia entre el nivel 3 y el 0.

A continuación se muestran los resultados al aplicar el nivel 3 a la predicción del consumo eléctrico. Consideramos conocidos los datos conocidos desde el 1 de Julio al 18 de Septiembre a las 7:00. En primer lugar se realiza la predicción de 24 h a partir del 18 de Septiembre a las 7:00.

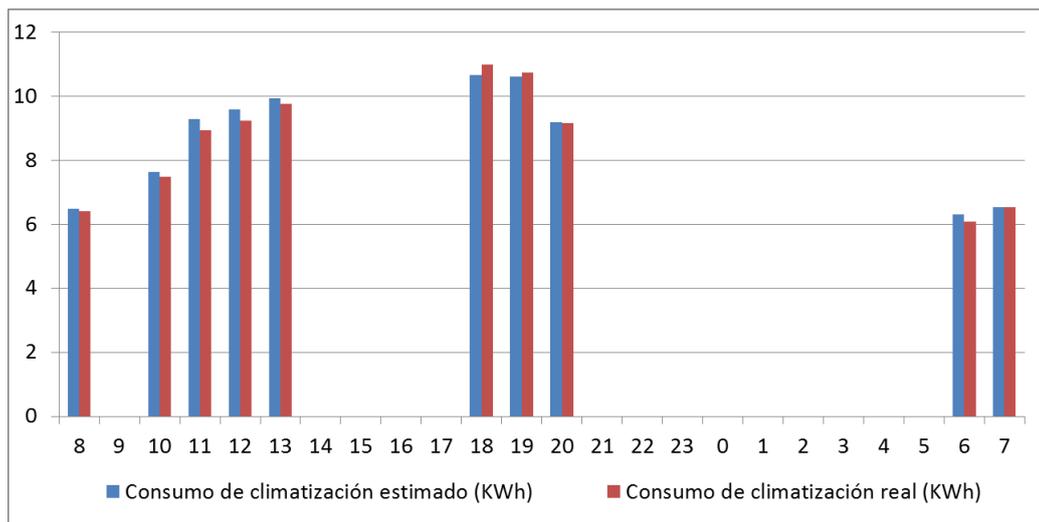


Figura 4-46. Estimación de 24 h de consumo eléctrico de climatización a partir del 18 de Septiembre a 7h usando nivel 3.

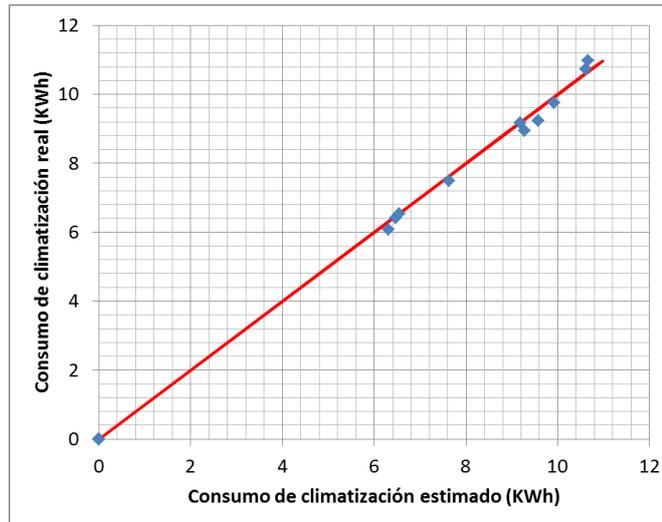


Figura 4-47. Comprobación del ajuste de la predicción realizada a partir de las 7 h el 18 de Septiembre para el consumo eléctrico de climatización usando nivel 3.

Las pruebas realizadas a este nivel serán las mismas que para el resto de niveles para poder luego realizar una comparación de los mismos. El orden del modelo elegido para climatización es 36 y en los ajustes de los coeficientes del modelo es incluido el patrón como variable de la que depende la dispersión, además de los 36 valores en instantes anteriores de la propia variable a modelar. El patrón usado en este nivel será aquel que diferencie cada día de la semana.

En primer lugar se muestra la predicción de 24 h a partir del 18 de Septiembre a las 7:00, el resultado obtenido es el siguiente:

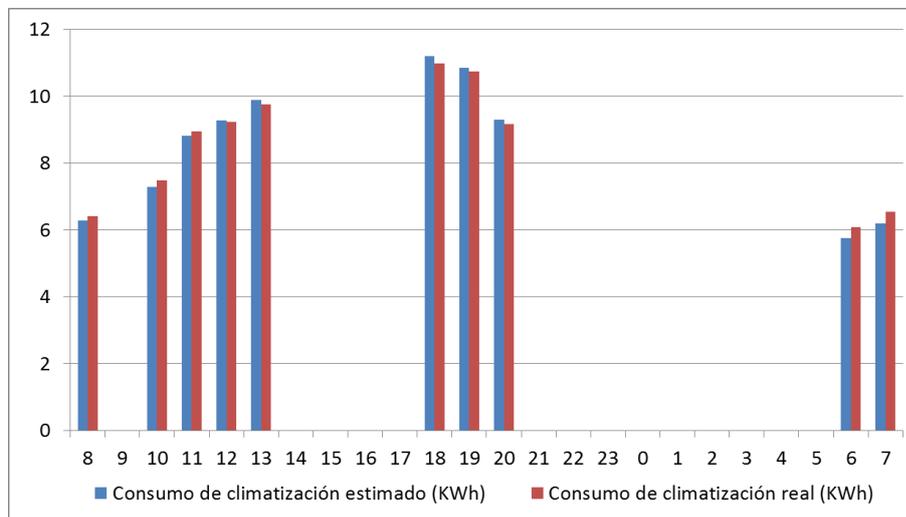


Figura 4-48. Estimación de 24 h de consumo eléctrico de climatización a partir del 18 de Septiembre a 7 h usando nivel 0.

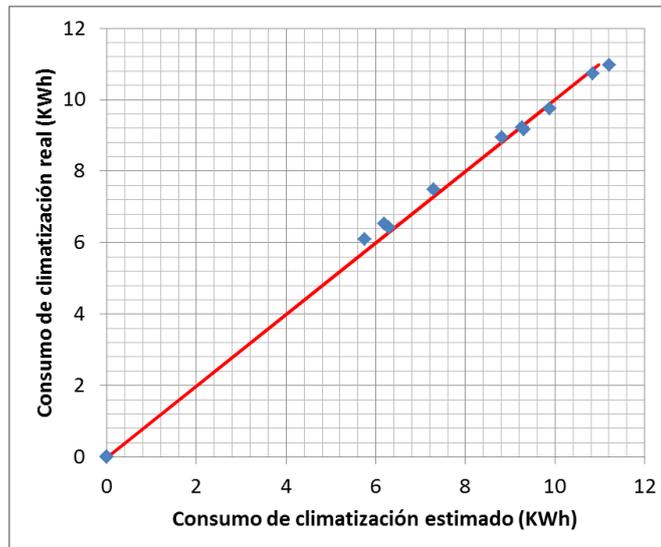


Figura 4-49. Comprobación del ajuste de la predicción realizada a partir de las 7 h el 18 de Septiembre para el consumo eléctrico de climatización usando nivel 0.

Para poder justificar las conclusiones se muestran las tablas de error máximo y promedio a corto y medio plazo de los distintos niveles de predicción para el consumo de climatización.

Corto plazo	Error relativo máximo (%)	Error relativo promedio (%)
Nivel 3	3.73	2.08
Nivel 0	5.39	2.29

Tabla 4-14. Errores obtenidos a corto plazo en la predicción (días)

Medio plazo	Error relativo máximo (%)	Error relativo promedio (%)
Nivel 3	4.16	1.95
Nivel 0	5.43	2.66

Tabla 4-15. Errores obtenidos a medio plazo en la predicción (semana completa)

En las tablas se muestran los resultados de la predicción de cada modelo sobre el día siguiente a los usados en la identificación del modelo, o sobre la semana completa siguiente.

Las diferencias entre ambos niveles no son acusables, por lo que se demuestra que el nivel cero puede ser una gran herramienta para la verificación de ahorros, y por tanto sería válido centrar esfuerzos en caracterizar el consumo eléctrico del edificio desglosado en sus principales servicios.

4.3.6. Estudio 3: consumo de calefacción

En el caso de los meses tipo 1 o de calefacción, la metodología sería la misma que la mentada anteriormente: creación del patrón y modelo adecuados para la predicción horaria de los meses caracterizados por dicho tipo de consumo.

Sin embargo, en este apartado se va a probar el patrón de Junio y Julio. Es decir, con el patrón base calculado en estos meses, ya que como hemos comentado anteriormente, no hay una gran diferencia en el consumo de los meses tipo 1 y 2, se realiza el cálculo de la dispersión para Enero y Febrero y con la

dispersión calculada en los mismos se obtiene el modelo para los meses de calefacción.

Con el patrón de Junio y Julio y el modelo de la dispersión calculado para Enero y Febrero obtenemos los siguientes resultados para la predicción horaria del día 9 de Marzo, por lo que, como se puede observar, no es necesario crear un patrón de consumo distinto para los meses tipo 1. Con el mismo patrón, y un nuevo ajuste del modelo de la dispersion, se obtiene una predicción ajustada y aceptable.

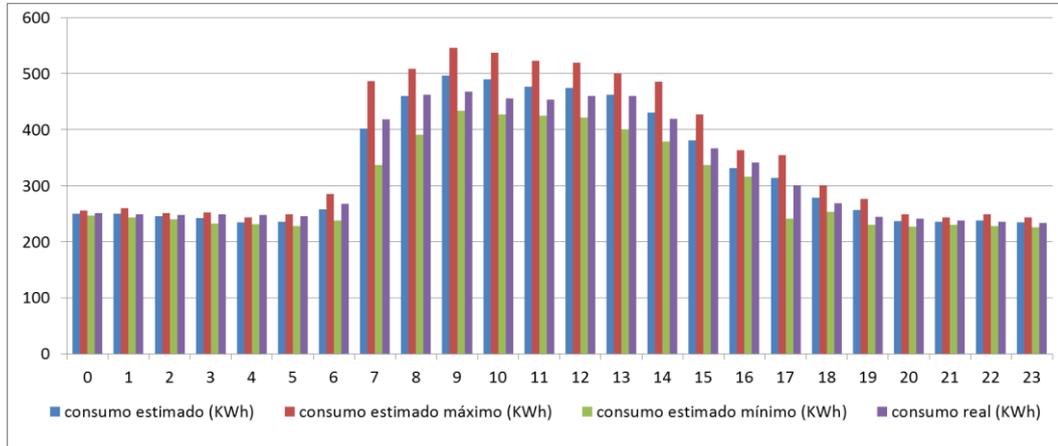


Figura 4-50. Predicción horaria del consumo total del edificio (KWh) el 9 de Marzo incluyendo banda de predicción.

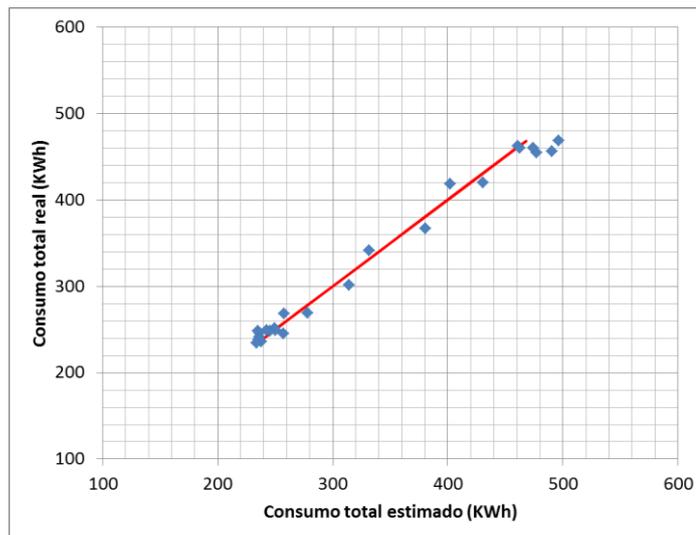


Figura 4-51. Comprobación del ajuste de la predicción del 9 de Marzo.

4.3.7. Estudio 4- Edificio “UNKNOWN”

4.3.7.1. Descripción

Sea un edificio terciario del cual sólo conocemos el consumo histórico total (KWh) del año 2012. Debido al desconocimiento de variables climáticas, por no saber su localización, se procede directamente a la aplicación del Nivel 0, el cual ha sido desarrollado detalladamente en apartados anteriores.

4.3.7.2. Consumos del edificio

Tras el tratamiento de los datos y el estudio de los consumos del mismo se ha decidido dividir el año

en dos tipos de meses:

- Tipo 1: Dentro del cual se encuentran los meses de Enero, Febrero, Marzo, Abril y Diciembre.
- Tipo 2: Formado por los meses de Junio, Julio, Agosto, Septiembre, Octubre.

A continuación se representa gráficamente el consumo diario de 3 semanas completas de cada mes, obteniendo los siguientes resultados

Tipo 1

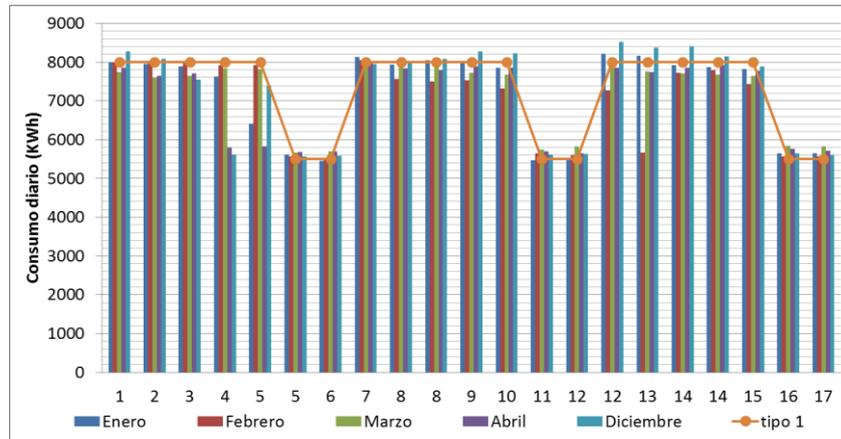


Figura 4-52. Consumo total (KWh) para meses tipo 1

Tipo 2

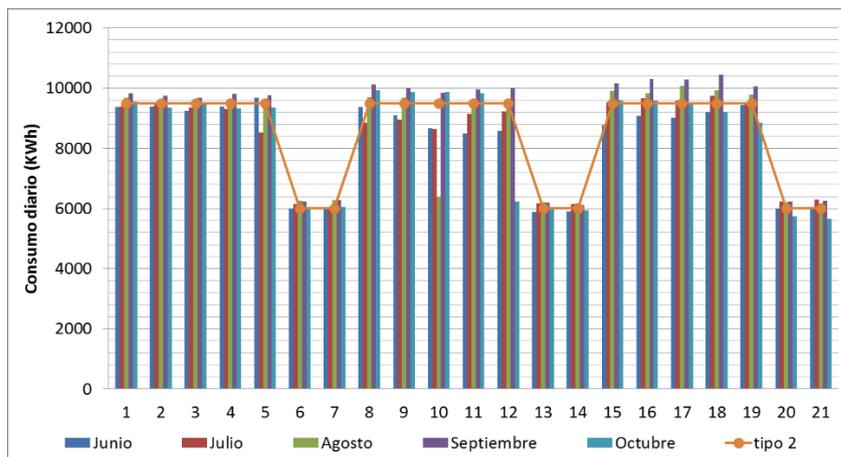


Figura 4-53. – Consumo total (KWh) para meses tipo 2

En los cuales se observa que los meses del tipo 2 tienen un consumo total del edificio más elevado que los meses del tipo 1.

Un edificio puede tener varios patrones de consumo según su uso y por ello aunque la diferencia entre ambos tipos no sea elevada se ha decidido dicha división por si resulta necesario crear dos patrones distintos, uno para cada grupo diferenciado anteriormente.

Los meses peculiares a comentar son los meses de transición que, para este edificio, serán los meses de Mayo y Noviembre y los cuales presentan días de los dos tipos de meses considerados.

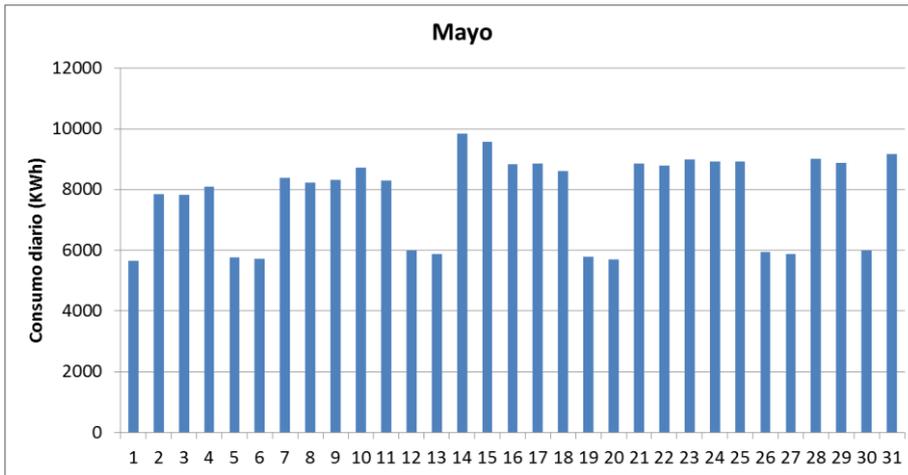


Figura 4-54. – Consumo total (KWh) en Mayo

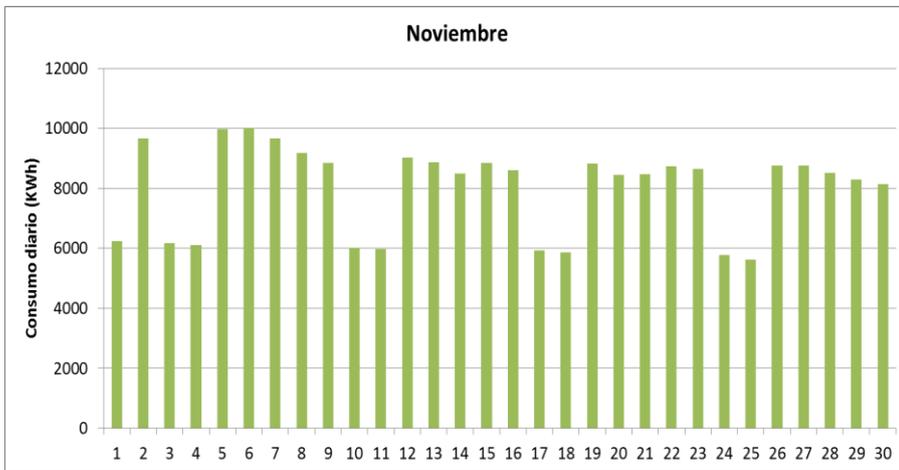


Figura 4-55. Consumo total (KWh) en Noviembre

4.3.7.3. MCS

Como ejemplo de aplicación de la metodología expuesta, usaremos los meses tipo 2 (meses de refrigeración). El patrón y modelo serán elaborados con Junio y Julio.

El patrón será horario distinguiendo Lunes, Martes, Miércoles, Jueves, Viernes y fin de semana (festivos se tratan igual al fin de semana). Se crea patrón base, máximo y mínimo para obtener la banda de predicción, obteniendo el siguiente resultado diario:

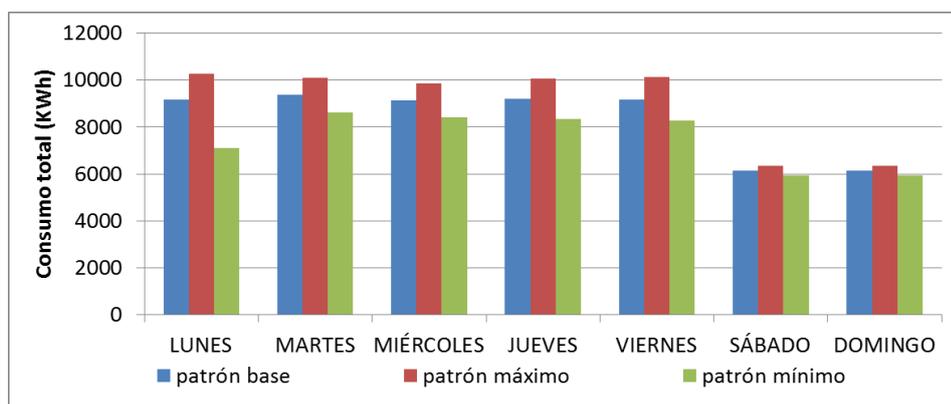


Figura 4-56. Patrón base, máximo y mínimo en base diaria del consumo total (KWh) del edificio a estudio.

Como se puede observar los meses tipo 1 se asemejan al patrón mínimo, por lo que puede que no sea necesario crear otro patrón para los mismos, debido a que no existe una gran diferencia entre ambos. Ello será probado en el último epígrafe de éste capítulo.

4.3.7.4. Identificación

El modelo de predicción será aquel que conocidos los valores de consumos reales en instantes anteriores sea capaz de predecir el consumo de un día completo hora a hora. El modelo de predicción será calculado con los meses de Junio y Julio al igual que el patrón.

Por tanto conocidos los datos del 1 de Junio al 7 de Agosto nuestro objetivo será predecir las 24 horas del día 8 de Agosto. El consumo, como se ha explicado anteriormente, se encuentra caracterizado por un perfil y una perturbación, de modo que:

$$\text{Consumo}(t) = \text{perfil}(t) + \text{perturbación}(t)$$

4.3.7.5. Orden del modelo de dispersión

Conocidos los datos del 1 de Junio al 7 de Agosto nuestro objetivo será predecir las 24 horas del día 8 de Agosto (tomando como cierto del 1 de Junio al 7 de Agosto).

Se realiza el estudio de los distintos órdenes para elegir el adecuado al modelo de dicho edificio. El más adecuado es aquel que minimiza el error cuadrático.

Orden	Error relativo máximo (%)
24	15.61
36	14.87
48	12.92
64	14.09

Tabla 4-16. Errores obtenidos a corto plazo usando distintos órdenes en la predicción.

Por tanto como decisión final, se toma un modelo de orden 48. A continuación se muestra el resultado obtenido para la predicción del 8 de Agosto con el modelo elegido y considerando la banda de predicción, obtenida de los patrones máximo y mínimo, cuyo objetivo es el control de la predicción, de forma que cuando comparamos la estimación con los valores reales, si dichos valores no se encuentran dentro de la franja de estimación, se debe proceder al cambio de patrones y nuevo ajustes de los modelos.

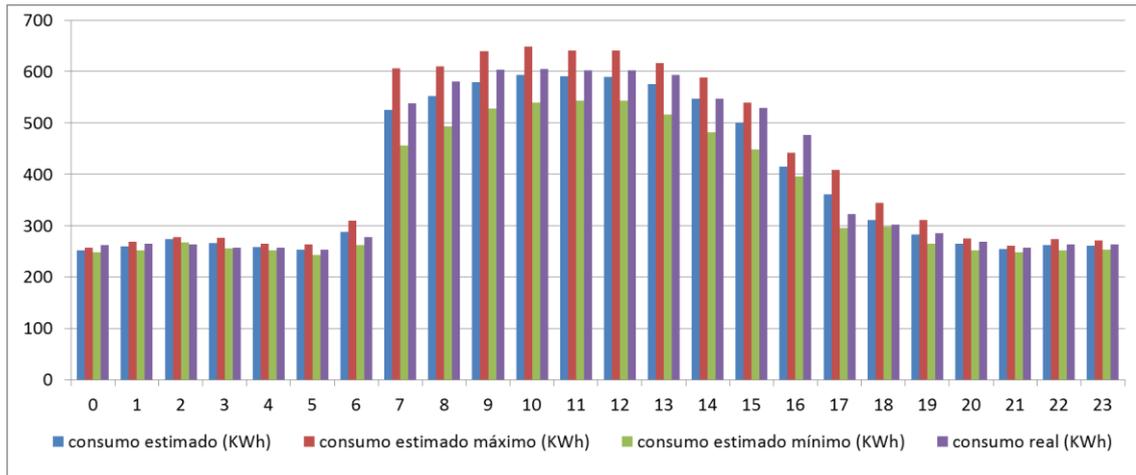


Figura 4-57. Predicción horaria del consumo total del edificio (KWh) el 8 de Agosto incluyendo banda de predicción.

4.3.8. Estudio 5- Edificio “BLUENET” Consumo de climatización - Nivel 3

4.3.8.1. Descripción

En este apartado describiremos la metodología aplicada al consumo de climatización con el nivel 3 sobre el edificio real “Bluenet”. Este edificio cuyos datos han sido facilitados por ISOTROL en el marco de proyecto CHORUS aparece en las imágenes inferiores.

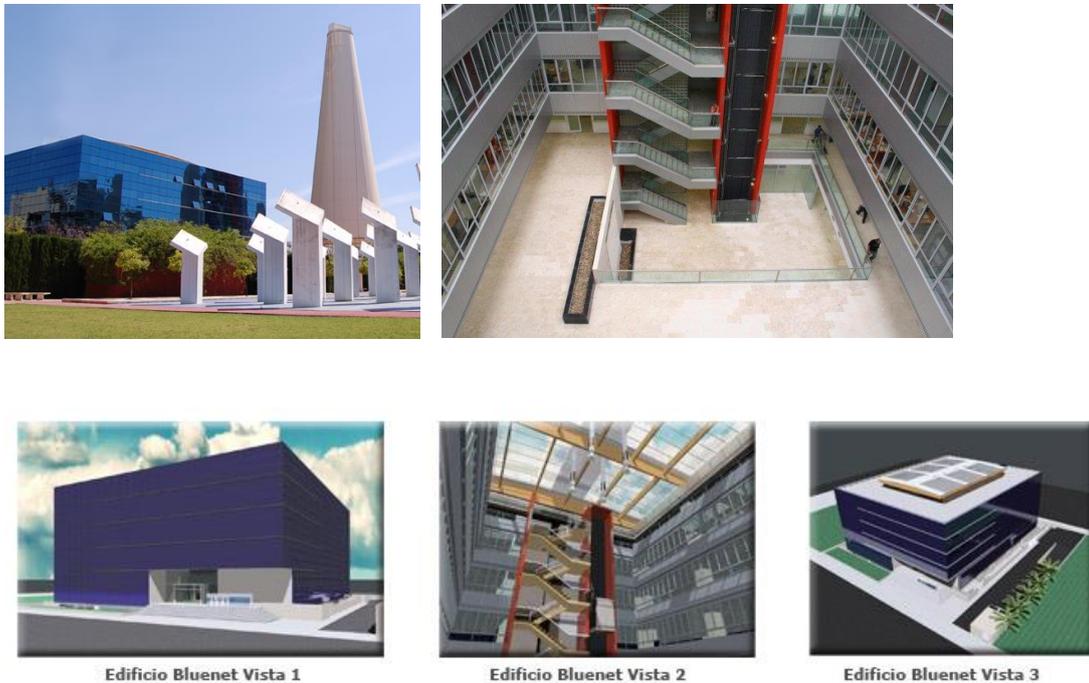


Figura 4-58. Imágenes edificio BLUENET-ISOTROL

Los datos que se disponen no son de todo el edificio, si no del consumo referido a las estancias de la empresa ISOTROL. Además se disponen de datos de temperatura interior de varios puntos de medida. El consumo medido se corresponde a los meses de septiembre y octubre de 2013.

El nivel 3 necesita datos de temperatura interior, temperatura exterior y la radiación para la aplicación de la metodología de predicción. La radiación será incluida a los modelos mediante la variable T_{sa} ,

que será calculada como:

$$T_{sa} = T_{ext} + k \cdot Rad$$

De esta forma serán unidas en una misma variable la temperatura exterior y radiación.

Estas K se desconocen, y como no se ha podido realizar un experimento en evolución libre se opta por obtenerlas vía simulación detallada del edificio en DOE2-2.

4.3.8.2. Resultados

El resultado obtenido para la predicción horaria del día 7 de Octubre de 2013 usando el nivel 3 se muestra en la siguiente figura:

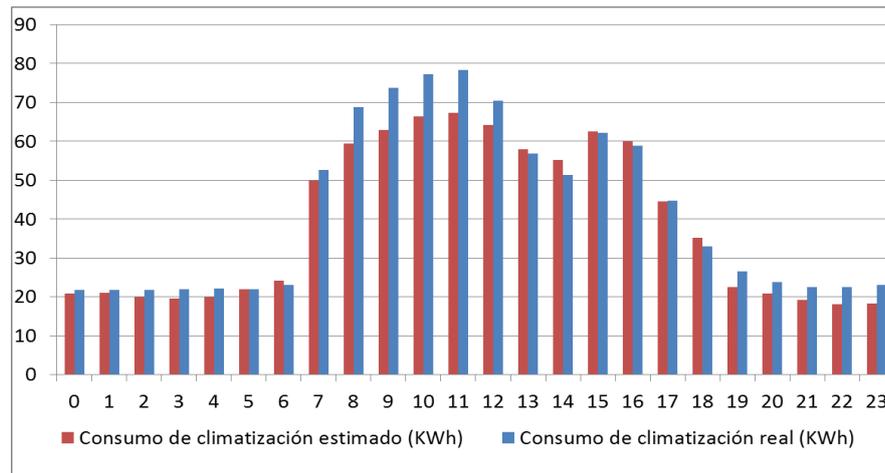


Figura 4-59. Consumo estimado de climatización el día 7 de Octubre de 2013 usando nivel 3 para edificio BLUENET

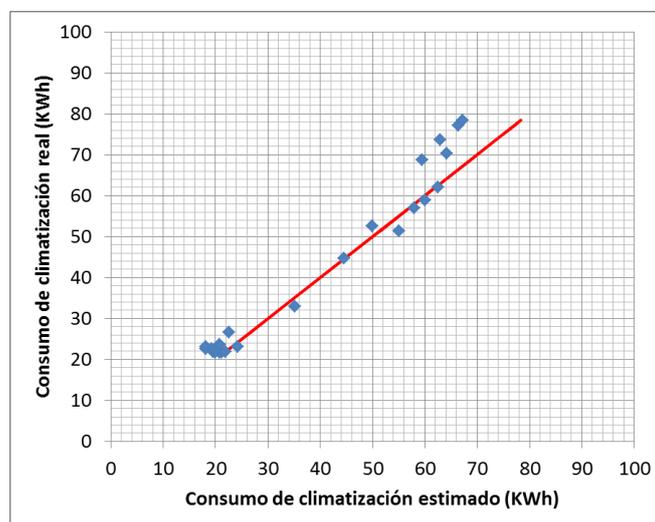


Figura 4-60. Comprobación del ajuste de la predicción del día 7 de Octubre de 2013 usando nivel 3 para edificio BLUENET

Los resultados de la estimación son aceptables con un error promedio inferior al 9%, cometiendo un error máximo inferior al 21% en las horas centrales de la mañana.

4.3.9. Estudio 6- Edificio “BLUENET” Consumo de Fuerza

4.3.9.1. Descripción

El objetivo principal del siguiente estudio es la demostración de la capacidad de adaptación del modelo de la dispersión, es decir, su explotación como herramienta de predicción en este caso para el consumo de fuerza por ser del que más datos se disponen. Para ello se mostrarán los resultados obtenidos en la predicción del consumo de Fuerza (KWh) de los días 7, 8, 9 y 10 de Octubre, comenzando la estimación en diferentes horas del día y tomando como cierto los instantes anteriores. Los valores de los mismos no serían conocidos si estuviéramos en la aplicación real del procedimiento, por ellos se muestran los resultados como explotación del modelo predictivo.

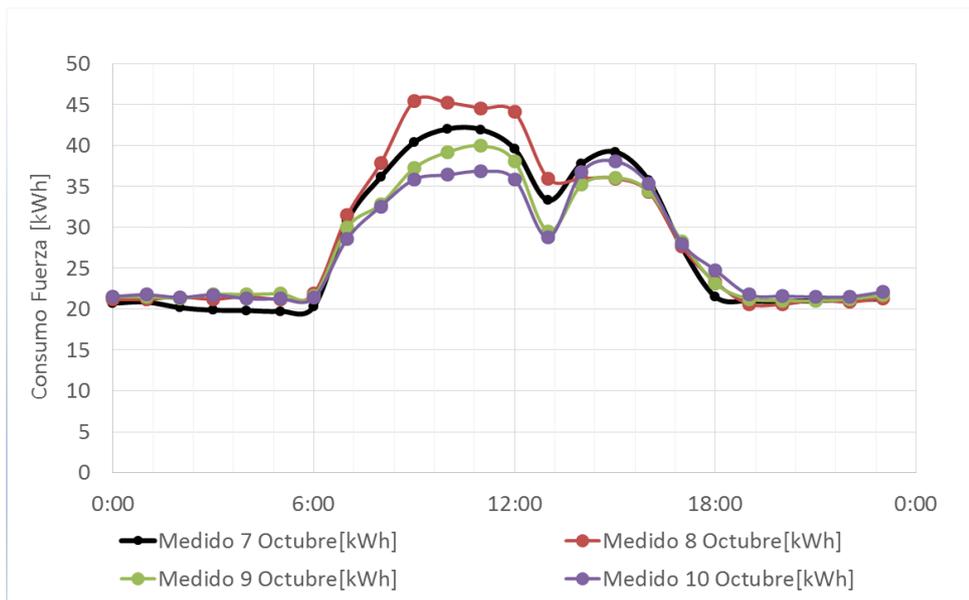


Figura 4-61. Consumo medido de Fuerza (KWh)

Los días mentados son elegidos como ejemplo de variabilidad del consumo a estudio, como se puede observar en la Figura 53 y además si comparamos los valores de un Lunes, Martes, Miércoles y Jueves cualquiera que han sido introducidos como datos en la creación de patrones y modelos con los valores reales de los días a predecir se puede observar cómo el caso del Martes, Miércoles y Jueves tienen una evolución horaria del consumo bastante diferente, por lo que con ello ponemos a prueba la capacidad del modelo de adaptarse a dichos cambios, cuyos resultados son mostrados a continuación.

4.3.9.2. Resultados

- Predicción 7 Octubre

En el caso del Lunes a predecir (7 de Octubre), la estimación cuando se arranca a las 0:00 ya es ajustada al consumo real medido para dicho día, lo cual era de esperar debido a la similitud de la evolución del consumo de ese día con respecto a los días tipo Lunes incluidos en la creación de patrón y modelo.

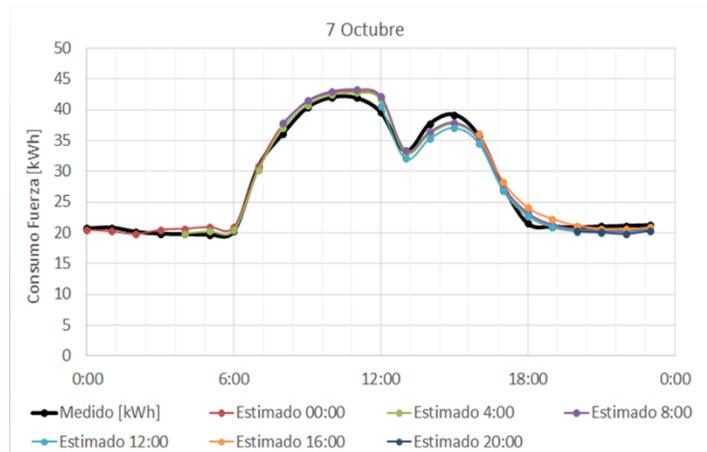
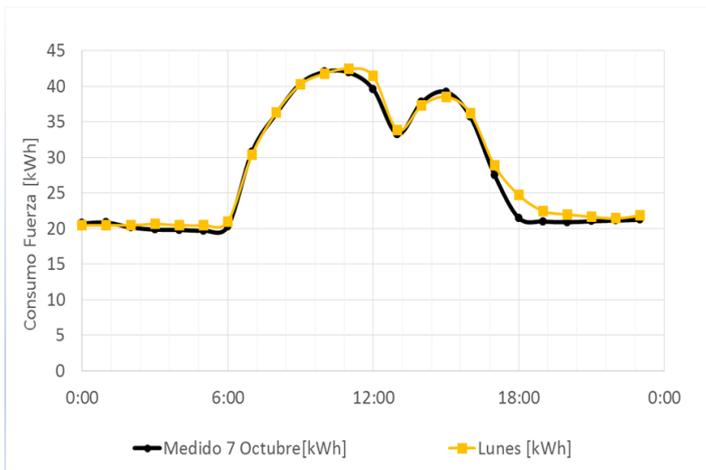


Figura 4-62. Estudio de la predicción realizada el día 7 de Octubre para Fuerza (KWh)

En el caso de Martes, Miércoles y Jueves como se puede observar en las figuras mostradas a continuación, se produce una variación claramente diferenciada a la evolución tipo para los mismos.

- Predicción 8 de Octubre

En el caso del Martes, si la predicción arranca a las 0:00, se puede observar como tiende a estimar la evolución del consumo para dicho día similar a la evolución típica de los Martes y por tanto comete errores elevados por ejemplo de 12-18 h en el consumo de Fuerza, pero se observa como arrancando el modelo a las 16:00, y considerando como cierto todo lo anterior, el mismo ha sido capaz de adaptarse a la “no subida” del consumo que era producida a las 12:00.

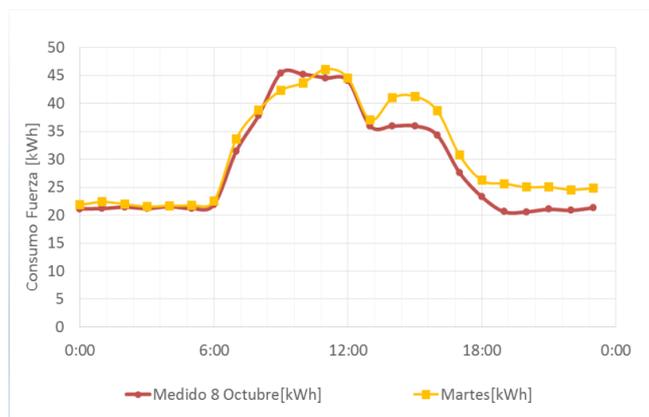
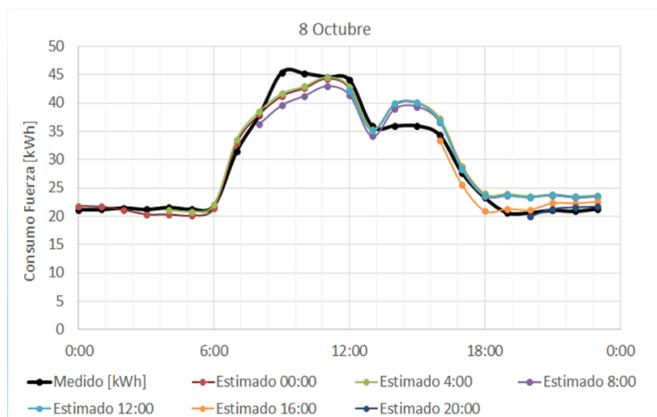


Figura 4-63. Estudio de la predicción realizada el día 8 de Octubre para Fuerza (KWh)

- Predicción 9 de Octubre

En este caso también se comprueba la adaptabilidad del modelo viendo como arrancando la predicción a las 12:00, la estimación tiende a bajar ya que el modelo se está alimentando de la bajada real que se produce con respecto al consumo tipo para dicho día.

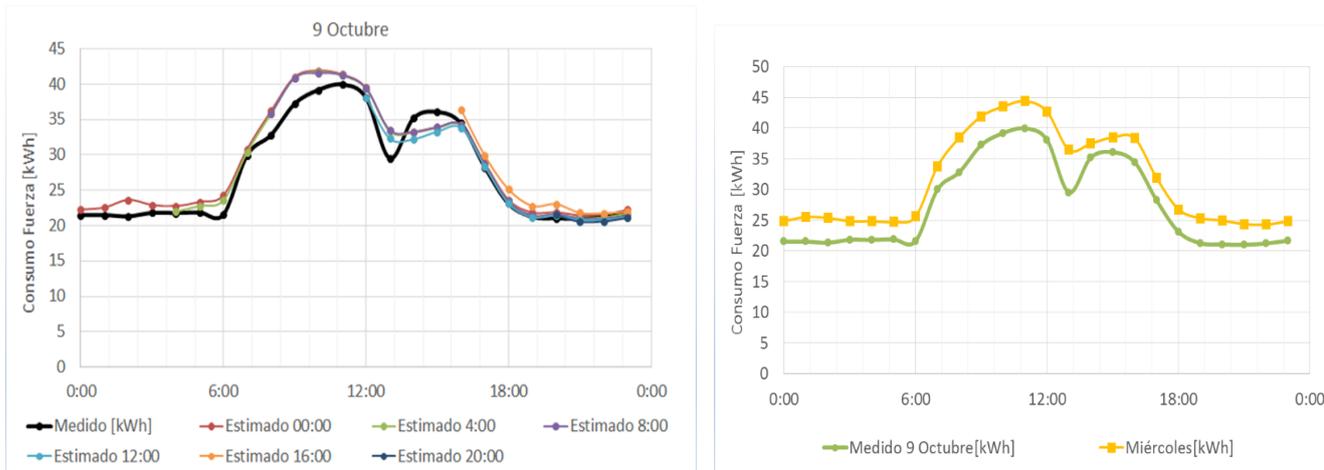


Figura 4-64. Estudio de la predicción realizada el día 9 de Octubre para Fuerza (KWh)

- Predicción 10 de Octubre

En el último caso, efectivamente, también se observa una clara adaptabilidad del modelo. La curva de evolución del consumo para el día 8 de Octubre está desplazada hacia abajo en comparación a la curva representativa del día de la semana a estudio. El arranque del modelo a las 0:00 y 4:00 aún no ven dicho descenso, sin embargo a partir del arranque a las 8:00, y como en casos anteriores, tomando como cierto los instantes anteriores, el modelo adapta claramente la estimación al consumo real medido para dicho día.

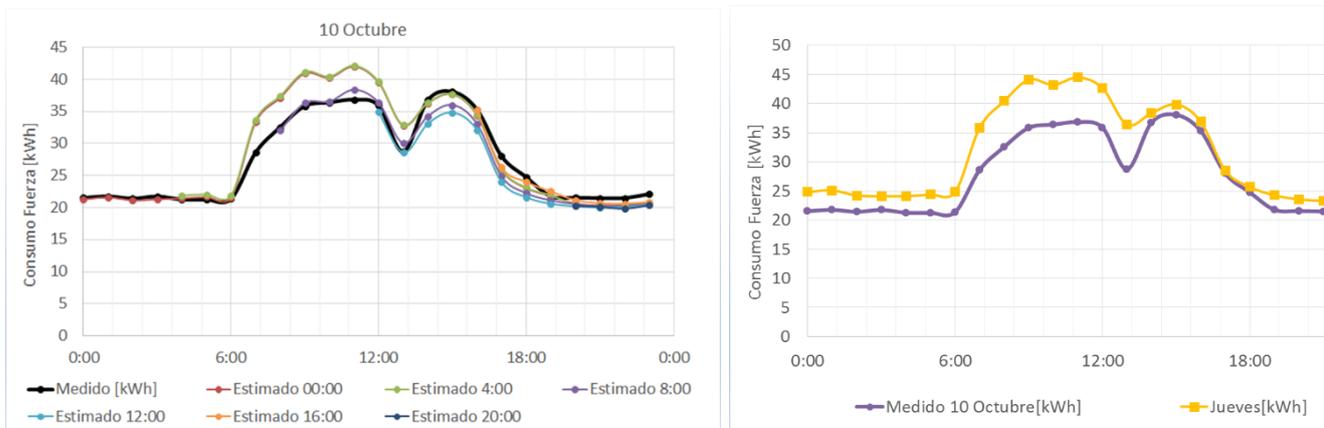


Figura 4-65. Estudio de la predicción realizada el día 10 de Octubre para Fuerza (KWh)

4.3.10. Conclusiones

La principal conclusión es que se ha conseguido dar solución al objetivo que se definía en la memoria descriptiva, el cuál era obtener un modelo para la caracterización de consumos eléctricos y/o térmicos de edificios y sus instalaciones. Los productos que aparecen directa e indirectamente son:

- Una metodología de modelización abierta y adaptable a la disponibilidad de datos medidos, ofreciendo varios niveles de modelización. Estimación de las 24h siguientes en el paso de tiempo elegido con posibilidad de explotación del modelo a mayor tiempo futuro.

- Validación de la metodología con datos experimentales para edificios complejos, e incluso, en uno de los casos a “ciegas” sin conocer nada del edificio como prueba para el nivel 0 desarrollado.
- Definición del protocolo para que un tercero pueda programar y explotar la metodología. Para ello además del documento explicativo se han generado un conjunto de archivos Excel para que sirvan de apoyo.

Sobre la metodología hay que destacar:

- Diferentes niveles de modelización en función de los datos experimentales.
- Cierta inteligencia para la toma de decisiones en cuanto a la re-calibración de los modelos a medida que se dispongan más datos experimentales. Para ello se han elaborado el modelo de mínimo y el modelo de máximo, con objeto de poder juzgar al patrón elaborado: si las mediciones reales quedan fuera de la banda dibujada por el mínimo y el máximo, hay que realizar un nuevo ajuste de los modelos.
- Errores máximo inferiores al 30%. Este valor es el extendido en la literatura específica como objetivo ideal para edificios reales en el aprovechamiento a largo plazo de modelos.

4.4. APLICACIÓN 4: CORRECCIÓN/CALIBRACIÓN

4.4.1. Introducción

El ahorro energético y económico que finalmente se origina tras poner en práctica una medida concreta de mejora de la eficiencia energética en un edificio dependerá entre otros factores del punto de partida inicial, es decir, del nivel de consumo existente previo a la mejora. Las herramientas de simulación energética de edificios calculan unos consumos teóricos para cada vivienda o edificio en unas condiciones de uso estándar y para unas condiciones climáticas de referencia. Por consiguiente, existirán diferencias entre estos consumos teóricos y los consumos que se producen en la realidad. Estas diferencias se deben, entre otros, a los siguientes factores [179]:

- Diferencias climáticas entre el año en el que se recogen los datos de consumo real y el año tipo considerado para la simulación.
- Diferencias constructivas entre la situación real (generalmente desconocida) y la supuesta para la simulación.
- Diferencias operacionales y funcionales que se presentan en la situación real.

Todos estos motivos crean una necesidad: ser capaces de usar los datos reales del edificio, sus mediciones, sus facturas... y combinarlo todo en forma de un producto que permita caracterizar el consumo energético del edificio en función de sus principales parámetros energéticos.

Ya en 1995, y con objetivos parecido el "U.S. Department of Energy (DOE)" [82] midieron en edificios comerciales energía final consumida con objetivo de tener una base de datos de intensidad en función de las diferentes tipologías. En su caso normalizaron los consumos en función del clima y del tamaño del edificio. Para tener una base útil se midieron 150 edificios. Los resultados son muy dispares en lo referido a las correlaciones conseguidas, pero aportan unos órdenes de magnitud positivos.

Se podrían destacar varios trabajos [101], relacionados con actuaciones a nivel distrito o entidades como hoteles, en los que se recogen las facturas mensuales. Esta posteriormente se correlaciona con el clima y las dimensiones del hotel, asumiendo algunos escenarios de uso y ocupación.

La revisión bibliográfica desvela la dedicación de los investigadores en Hong Kong sobre el tratamiento estadístico de estos datos. Destaca el reporte [123], donde se recolectaron facturas, se recogieron estadísticas de servicios y usos, así como el registro de operación de los edificios. Los trabajos comparan edificios entre sí, pero no normalizan y relacionan variables con esos consumos, simplemente realizan un trabajo de discusión. En cambio [124], correlacionan los consumos con la evolución de temperatura exterior, con objeto de intentar predecir los consumos en otras épocas del tiempo. Cabe destacar algunos indicadores que obtienen sobre la eficiencia de transporte de agua y de acondicionamiento de espacios, para un número delimitado de casos. En ambos trabajos se expresa la necesidad de aumentar la base de datos es crucial para disponer de resultados concluyentes, aunque las dificultades y costes asociados lo convierten en un proceso inviable.

El artículo más destacado en cuanto a la normalización de facturas con el clima es [180]. En este caso se recogieron datos de 5 grupos de oficinas, con objeto de establecer valores normalizados a los que aplicar un proceso de "benchmarking". Para ello se crearon correlaciones de la intensidad de consumo (kWh/m²) en función del número de horas de operación y clima. Como única deficiencia, es que aunque disponían de una cantidad de datos abundante, existían algunos puntos de incertidumbre como eran: el número de personas, el nivel de ganancias internas, parámetros sociales... es por esto que en un momento dado, establecen tres escenarios para agrupar los edificios, y crear tres modelos de normalización.

Un referente de estas técnicas para el doctorando, es el proyecto EUROCLASS en el que participó el

Grupo de Termotecnia en 1999 [181], por la cercanía y abundancia de información recabada durante el trabajo elaborado. En este proyecto se desarrolló una metodología determinista y experimental para caracterizar el consumo energético de edificios residenciales. A la par, esta metodología permite ser adaptada a las peculiaridades de las políticas energéticas de cada país. De forma sintetizada, se basa en la aplicación de curvas de distribución en frecuencia de los diferentes usos; así cuando se tienen datos monitorizados las curvas pueden ser corregidas al escenario medido.

Por consiguiente, el estudio de algunos de los trabajos anteriores, hace ver que existe bastante desconocimiento en las técnicas de normalización, y por eso aparecen algunas contradicciones y decisiones discutibles. Por todo ello, para poder llegar a un ajuste lo más cercano posible a la realidad, y de mayor aplicabilidad a estos casos particulares, se requiere la creación de un procedimiento de normalización general. Ahora bien, lograr este fin implica disponer de datos que permitan conocer suficientemente el consumo real en cada uno de los casos (consumos en años anteriores, hábitos de consumo, características detalladas del edificio, etc), es por esto que se procederán con una batería de centenares de miles de simulaciones para crear los fundamentos del procedimiento de normalización, que se validaría con datos reales y mediciones puntuales.

A la par, es necesario por tanto, establecer un mecanismo de ajuste que permita establecer una relación entre los consumos pronosticados y los reales, a fin de poder proporcionar al usuario un nivel de ahorro tanto energético como económico en concordancia con sus hábitos de consumo reales.

En los últimos años destaca Shengwei et al. [120] muestra un procedimiento simplificado para la desagregación de facturas energéticas y el análisis de las mismas. Este método está muy limitado para el edificio analizado, aunque da una orientación del trabajo a realizar, ya que para limitar la incertidumbre se alimenta de datos medidos de los sistemas de climatización. Un trabajo parecido, alimentado por estadísticas, es el que aparece en los proyectos EURECO “DEmand-Side Management. End-use metering campaign in 400 households of the European Community. Assessment of the Potential Electricity Savings”; y el proyecto “SECH-SPAHOUSEC. Análisis del consumo energético del sector residencial en España. Informe Final”. Los cuales finalizaron antes de 2005 para el primero, y 2010 el segundo. El caso que aborda el proyecto dista del presentado porque considera datos de edificios reales, en años anteriores al actual, por lo que el procedimiento debe alimentarse de un número cierto y acotado de datos, para reducir la incertidumbre real (por ejemplo, datos medidos en la actualidad).

Aaron Smith et al. [121] desarrolla un procedimiento con la misma esencia que el interior, pero de cara a calibrar una herramienta de simulación horaria en EnergyPlus. Este trabajo, tiene cierta relación con la tarea a desarrollar en el proyecto, pero no ofrece una metodología extrapolable, ya que elabora un procedimiento de corrección de ciertos parámetros de definición del caso en la herramienta informática sin justificación.

Existen algunas revisiones, como [118] que demuestran que aunque existen bastantes publicaciones en las que se realizan estos trabajos, se refieren a casos particulares o muy generales, en muchas ocasiones realizadas en tiempo presente (medidas reales vs datos de facturas), no son extrapolables a valores históricos, en los que se requiere un protocolo robusto y seguro (garantizar ahorros).

Centrando la revisión en la corriente americana para edificios existentes, entendida esta como aquella que maximiza el aprovechamiento de toda la información disponible en los edificios existentes para la creación de una técnica capaz de predecir y calcular ahorros antes y después de la implantación de la mejora.

La obtención del objetivo de esta corriente puede dividirse en función de las fuentes de obtención de las entradas de la metodología para llevarlo a cabo:

En primera instancia, la tendencia a medir con más o menos detalle, de tal forma que la verificación de ahorros se pueda hacer directamente con la medición de una o varias variables del edificio (opción A y B del protocolo IPMVP [137]). Quizá la referencia que mejor sintetice esta línea sea [129], reporte realizado por el NREL. Esta tendencia está muy ligada a la vía dominante de verificar ahorros en la industria.

Por otro lugar, la explotación al máximo del conocimiento existente: datos de simulaciones detalladas o,

bases de datos experimentales de calidad. La finalidad es obtener la suficiente información en forma de relaciones o modelos simplificados que permitan satisfacer el objetivo general comentado. En esta línea de trabajo el Gobierno de California destacando con su proyecto DEER [182]. Esta base de datos contiene 9000 combinaciones de edificios, sistemas, climas... con estos datos se están creando reglas por ejemplo para conocer las curvas reales de operación de equipos, o los posibles porcentajes de desagregación de facturas eléctricas en viviendas... En esta corriente además de las opciones anteriores, se busca orientar en el uso de las opciones C y D del protocolo IPMVP [137].

Existen bastantes trabajos en la sintonía de usar los datos procedentes de facturadas, es más, actualmente se presenta como la línea maestra para la calibración de herramientas de simulación. Lo que no queda claro es como se da una solución a las dependencias de los consumos con los datos climáticos, uso y edificio de forma combinada. Por ello se ha desarrollado lo ya expuesto con anterioridad, y ahora se procede a describir su aplicación/explotación en edificios reales.

4.4.2. Corrección BEPS a partir de facturas

4.4.2.1. Residencial

En el caso del residencial, tras estudiar todos los supuestos y revisando la literatura, la opción más fácil y robusta para comparar los resultados de una simulación detallada con los procedentes de los consumos energéticos, bien por el desglose de facturas o bien medidos directamente, es directamente corregir por clima. Esto se decide así por el seguro desconocimiento entre el uso de las viviendas real y el definido en la herramienta.

Corregir directamente por K_{CAL} y K_{REF} normalizando con el clima los resultados del programa para poder compararlos con los obtenidos del desglose de facturas.

Esta opción puede esquematizarse de la siguiente forma:

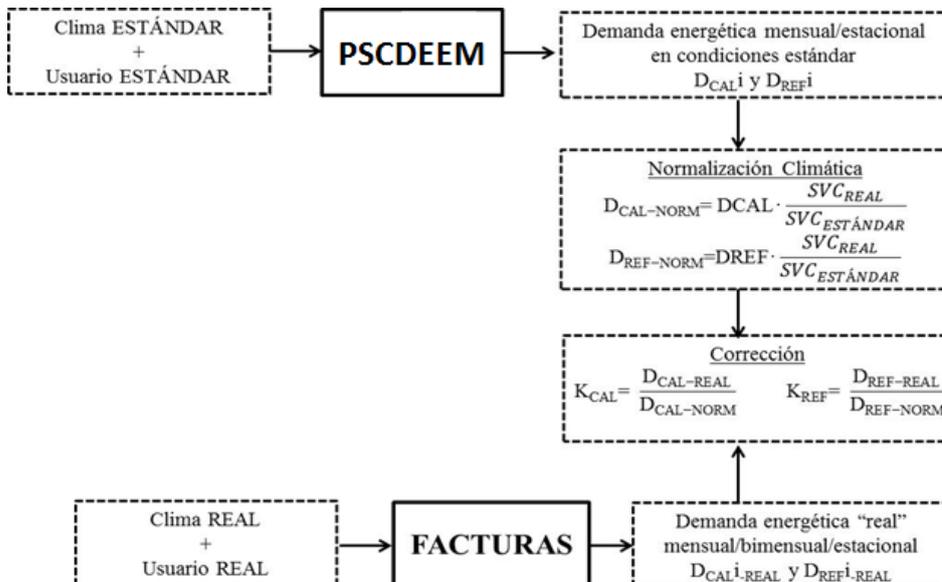


Figura 4-66. Esquema del protocolo de caracterización mensual PSCDEM y corrección a partir de datos de facturas para edificios residenciales (opción 1).

Es importante destacar que la corrección se aconseja hacer en base estacional cuando los datos procedan de un desglose de facturas, y en base mensual si se tienen los datos de consumo de climatización medidos. Esto es así, porque la mayoría de las metodologías de desglose analizadas, incluso desarrolladas en el marco de los proyectos vigentes durante el transcurso de la tesis y de la literatura consultada, admiten un

30% de error en el desglose.

4.4.2.2. Terciario

A diferencia del sector residencial, en el sector terciario la base mensual es necesaria, y es por eso que la corrección se hace a partir de valores mensuales, pero con una validez estacional como en el caso anterior. Para ello se debe intentar definir el caso con la mayor calidad en la herramienta de simulación y para ello se aconseja realizar un inventario energético en detalle.

Si se analiza la figura inferior, se puede ver como se han representado resultados de la demanda ofrecidos por el modelo mes a mes, contra los mejores valores de consumo reales que se tienen. Esta representación permite analizar el caso a estudio, y obtener la corrección óptima de los resultados. Esta corrección será válida para toda la estación, ya que los coeficientes (F_{C1} y F_{C2}) son constantes y diferentes en calefacción y refrigeración.

$$D_{CAL-MEDIDA} = F_{C1} \cdot D_{CAL-MODELO} + F_{C2}$$

Ecuación 4-30. Fórmula para la corrección terciario con facturas

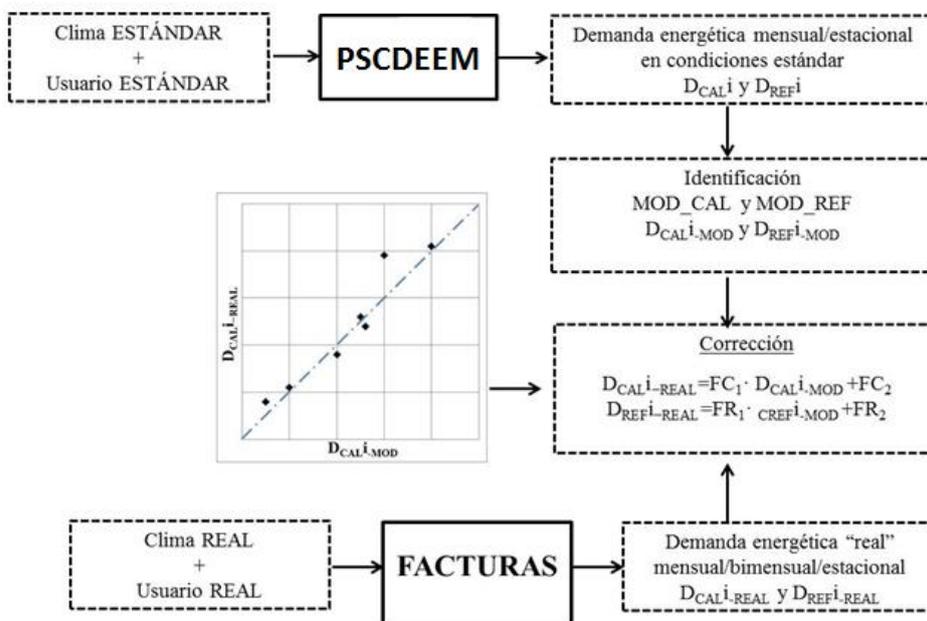


Figura 4-67. Esquema del protocolo de caracterización mensual y corrección a partir de datos de facturas en el caso de edificios terciarios (opción 3).

4.4.3. Calibración concentrada de BEPS a partir de facturas

Esta opción puede ser entendida como la máxima aplicabilidad de los datos de facturas: obtenido el modelo simplificado a partir de los datos de simulación (forma del modelo, constante de tiempo...), se procede a su ajuste a partir de los datos reales de facturas.

El ajuste "real" proporciona los valores de los coeficientes que multiplican a las variables climáticas. Estos coeficientes pueden ser desglosados cuando se compara el modelo de identificación con facturas con los modelos simplificados anteriores:

$$C_{CAL} = f_{CC1} \cdot GD_T + f_{CC2} \cdot I_{SMOD} + f_{CC3}$$

$$C_{REF} = f_{CR1} \cdot GD_T + f_{CR2} \cdot GD_{NOCHE} + f_{CR3} \cdot I_{SMOD} + f_{CR4}$$

Ecuación 4-31. Corrección MCS a partir de facturas para calefacción y refrigeración

El proceso de calibración consiste en modificar los parámetros de definición del edificio de tal forma que se verifique lo siguiente:

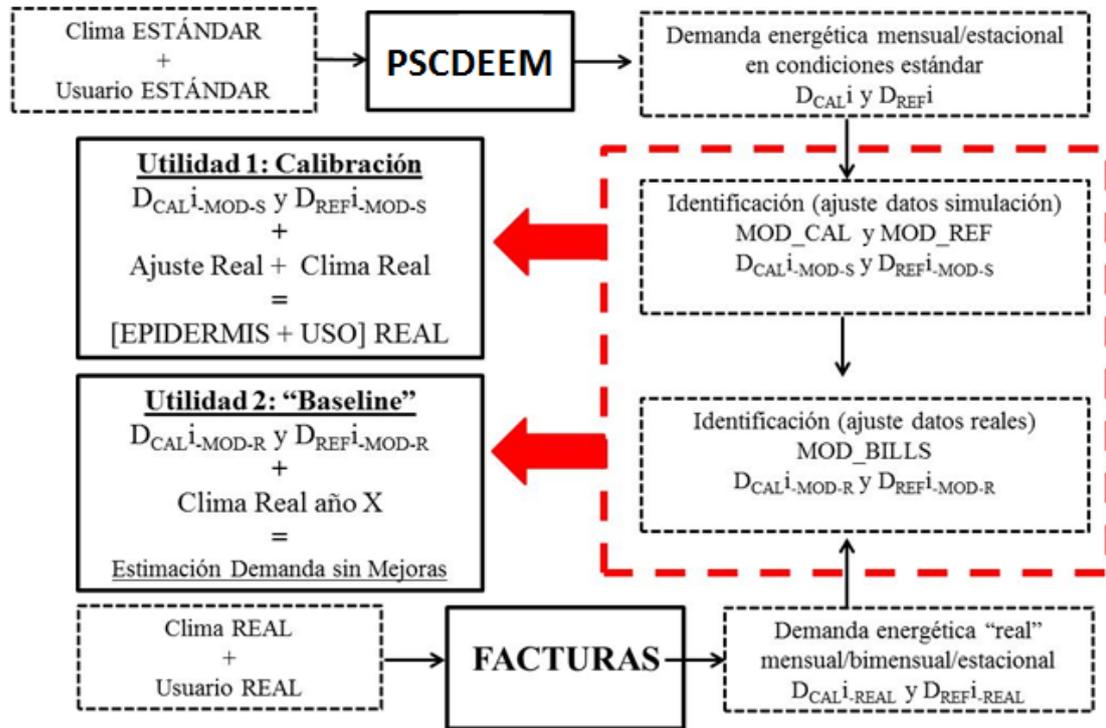


Figura 4-68. Calibración del terciario con facturas

Es importante destacar como se están tratando consumos, por lo que el modelo lleva implícito la relación de demandas y el rendimiento como se ha analizado en epígrafes anteriores. Es por ello que la calibración, es decir, encontrar el valor de los parámetros de definición del caso tales que los resultados de la simulación sean iguales que los medidos (dentro de la incertidumbre del procedimiento). Esta búsqueda debe contemplar que los parámetros desconocidos quedan ligados en ecuaciones no lineales, que requieren para su solución tomar decisiones sobre el valor de algunos de ellos o medirlos.

4.4.4. Integración de MCS Demanda térmica Mensual y MCS

La siguiente figura esquematiza las dos opciones de interacción entre los procedimientos desarrollado en la tesis.

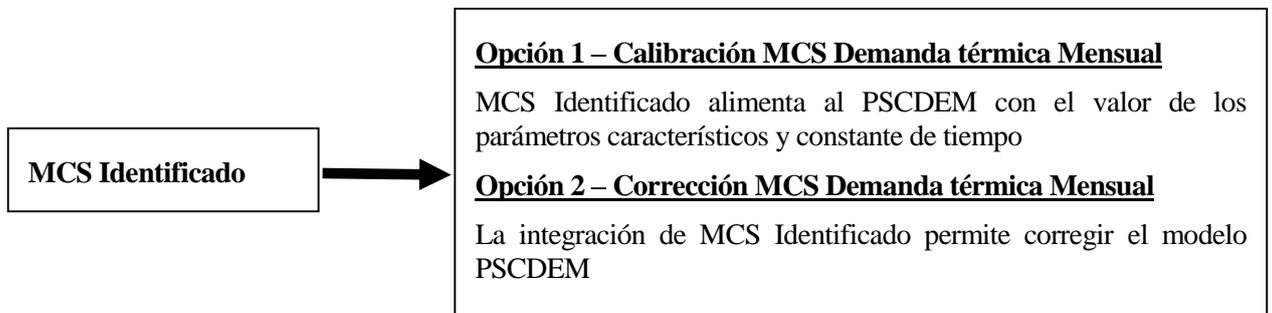


Figura 4-69. Integración de PSCDEM y MCS

La opción 1 es la deseada ya que es fácilmente vinculable a la herramienta detallada. Esta opción requiere que los datos experimentales usados para identificar el modelo MCS sean de calidad, y por consiguiente los coeficientes del mismo se traduzcan en valores de los parámetros estáticos y dinámicos realistas.

En cambio la opción 2 está pensada cuando no se dispongan suficientes datos mensuales como para poder obtener el modelo mensual. En ese caso se puede excitar al MCS para alimentar al proceso de ajuste de coeficientes del modelo mensual.

4.4.5. Complemento CE3

La filosofía con la que el modelo mensual PSCDEM se vincula con las herramientas de simulación y las facturas es la siguiente:

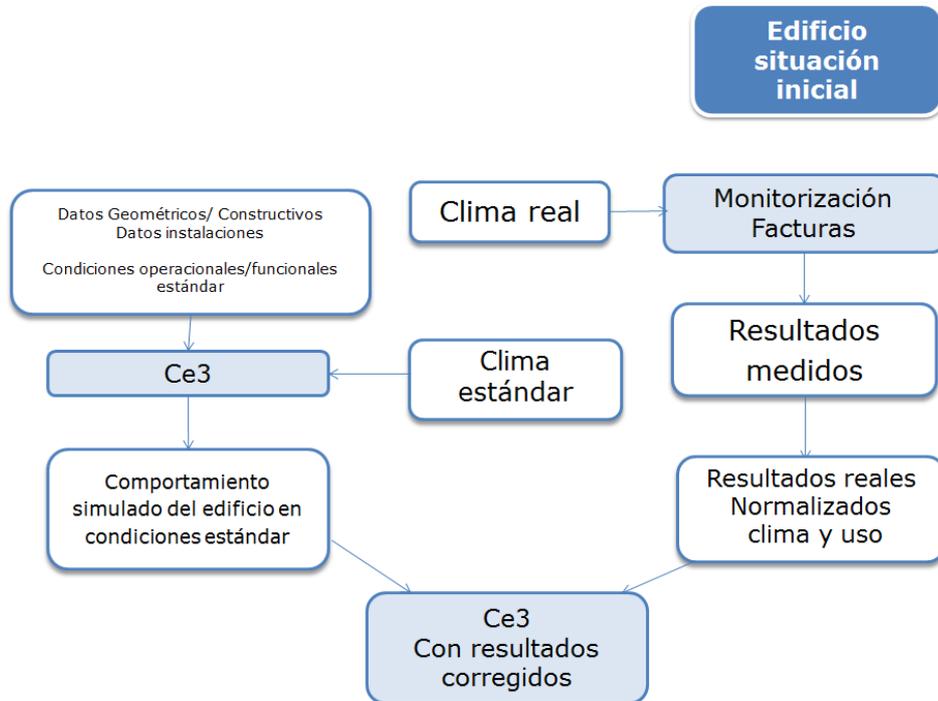


Figura 4-70. Identificación PSCDEM a partir de datos de simulación y corrección del mismo a partir de facturas.

La zona de la izquierda de la figura anterior produce el primer producto: a partir de los datos de la simulación estándar se obtiene PSCDEM estándar. El camino de la derecha proporciona los datos de consumo real procedentes de facturas. Hay que destacar que las facturas deben ser desglosadas y el clima real conocerse. Conocido el consumo de climatización de las facturas, el clima real y los modelos PSCDEEM para calefacción y refrigeración se puede proceder con la “Corrección BEPS a partir de facturas” que ya se ha comentado.

El complemento de Medidas de Ahorro de Energía de CE3, PEMAP, desarrollado por el Grupo de Termotecnia en su última actualización, emplea al procedimiento PSCDEM para la toma de decisiones.

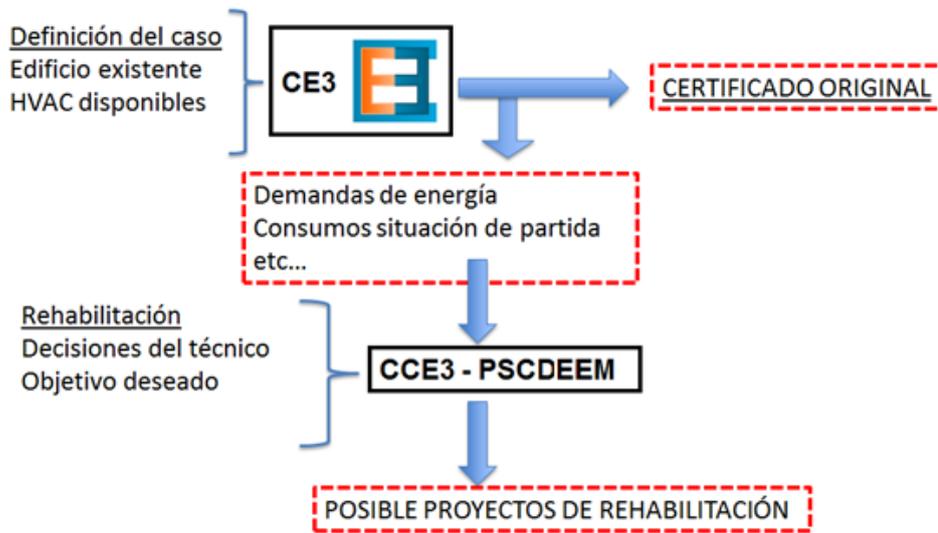


Figura 4-71. Integración de PSCDEEM en el procedimiento CE3

A su vez los complementos ligados a la herramienta para la corrección de resultados con facturas y el análisis económico de medidas de ahorro se apoyan en PEMAP como se ha explicado en las figuras anteriores.

Lo que finalmente resulta es una herramienta corregida con datos de facturas para definir proyectos de rehabilitación con menor incertidumbre que el procedimiento CE3 estándar.

4.4.6. Proyecto ENCERTICUS

Como ejemplo se ha hecho la explotación del procedimiento en dos casos diferentes. Vinculado a este tema se destaca el trabajo realizado en el marco del proyecto ENCERTICUS (<http://www.med-encerticus.eu/it/index.asp>). El proyecto ENCERTICUS, financiado por la comisión Europea dentro del programa MED, y coordinado por la institución CIMNE. “ENCERTICUS” es una simplificación de su nombre completo: “Certificación energética, tecnología, información y comunicación para el beneficio del usuario” “Energy Certification, Technology, Information and Communication for User Benefit” (ENCERTICUS).

De entre todos los objetivos del proyecto, se destaca el que pretende entregar sobre los certificados de eficiencia energética datos monitorizados, de cara a realizar una evaluación más precisa y real de la situación energética actual para edificios residenciales.



Figura 4-72. Certificado energético en condiciones estándar vs valores de consumo medidos

A partir del caso definido en una de las herramientas oficiales se extraen los parámetros característicos del consumo y la demanda del edificio. Posteriormente se realiza un proceso de

corrección.

Del proceso de corrección se destaca la siguiente formulación:

$$C_{CAL}^{Real} = f_{clima,cal} \cdot f_{ac,cal} \cdot f_{confort,cal} \cdot f_{usu,cal} \cdot C_{CAL}^{Simulación}$$

$$C_{ref}^{Real} = f_{clima,ref} \cdot f_{ac,ref} \cdot f_{confort,ref} \cdot f_{usu,ref} \cdot C_{REF}^{Simulación}$$

Donde el consumo de calefacción y refrigeración obtenidos vía simulación ($C_{CAL}^{Simulación}$ y $C_{REF}^{Simulación}$) se corrigen con una serie de coeficientes correctores para obtener el consumo real (C_{CAL}^{Real} y C_{ref}^{Real}).

Estos factores correctores están ligados con los diferentes efectos que diferencian a las condiciones reales de las estándar:

- $f_{clima,cal}$ y $f_{clima,ref}$ corrigen la diferencia del clima estándar de la localidad y en el año concreto de las facturas
- $f_{ac,cal}$ y $f_{ac,ref}$ En las condiciones estándar de cálculo se considera que el 100% del edificio se encuentra acondicionado el 100% del tiempo. Realmente será una fracción de la superficie total y del tiempo, de ahí la justificación de este factor.
- $f_{confort,cal}$ y $f_{confort,ref}$ estos factores tienen en cuenta que en la simulación se mantienen las condiciones de confort ideales, diferente a lo que ocurre en la realidad.
- $f_{usu,cal}$ y $f_{usu,ref}$ corrige la diferencia restante entre el consumo de simulación corregido con los anteriores factores y lo que falta para parecerse al real. Se considera que la parte restante es debida al comportamiento del usuario.

Para la explotación del procedimiento se ha desarrollado una herramienta gratuita: ENCERTTOOL.

En el marco de la tesis doctoral, ENCERTICUS supone un ejemplo de aplicación del procedimiento en el que aparecen algunos detalles innovadores como son los factores correctores para adaptar los resultados de simulación a los reales.

4.5. APLICACIÓN 5: TOMA DE DECISIONES

4.5.1. Introducción

En las siguientes páginas se describe un método de modelización en base mensual y estacional de los consumos energéticos de un edificio. El modelo puede de ser ajustado con los resultados de una herramienta de simulación o bien con facturas energéticas.

Los objetivos que encierra este desarrollo son:

- Un procedimiento que permita corregir resultados de la herramienta detallada BEPS, e incluso calibrar de forma global la propia herramienta.
- Un modelo simplificado mensual/estacional apto para identificación de medidas de ahorro, u orientaciones en la fase de diseño del edificio. Al poder obtener los resultados calibrados y los ahorros corregidos, se podrían inferir con más exactitud las influencias de las posibles medidas de ahorro; e incluso, análisis paramétricos rápidos y entendibles.
- Un desarrollo capaz de ser integrado en una metodología antifraude de los procedimientos de certificación.

En el caso que se aborda en el proyecto, el modelo se corrige mediante un software detallado CDEEW, motor de cálculo de la herramienta unificada Lider Calener HULC, para los edificios SBP elegidos.

4.5.2. Ejemplo teórico

Este epígrafe sirve para ejemplarizar las pruebas y validaciones realizadas a la metodología descrita para la obtención de un modelo simplificado en base mensual, concretamente en el punto “3.3.3 MCS Demanda Térmica Mensual”. El objetivo es demostrar las capacidades del modelo para el estudio de medidas de ahorro, y las posibles adaptaciones del mismo en función de la calidad de datos disponibles.

Para ello se realizan simulaciones usando el motor de cálculo del programa LIDER para una serie de edificios. Estas viviendas se simulan en varios climas, que se especifican cuando sea conveniente.

4.5.2.1. Obtención de parámetros y datos climáticos

Para crear una idea al lector de los parámetros requeridos en el modelo, se enumeran para uno de los casos estudiados. Más concretamente es una vivienda unifamiliar situada en Madrid, cuyos datos aparecen en la siguiente tabla:

Área acondicionada [m ²]	102.30	Área de suelo [m ²]	54.66
Volumen [m ³]	276.21	U Suelo [W/m ² K]	0.43
Área de transferencia [m ²]	278.56	Renovaciones hora invierno [h ⁻¹]	0.45
Compacidad V/At [m]	0.99	Renovaciones hora verano [h ⁻¹]	0.45
Altura promedio espacios [m]	2.70	Ventilación nocturna [h ⁻¹]	4.00
Área de cubierta [m ²]	54.66	Fuentes internas [Wh/m ²]	4.81
U Cubierta [W/m ² K]	0.36	U Suelo [W/m ² K]	0.43

Tabla 4–17. Parámetros principales de definición del edificio.

EPIDERMIS	Norte	Este	Sur	Oeste
Área muros [m ²]	41.61	33.34	41.05	32.03
U Opacos [W/m ² K]	0.59	0.59	0.59	0.59
Área de ventanas [m ²]	3.14	6.38	3.92	7.77
U huecos [W/m ² K] Invierno	3.18	2.81	3.18	2.81
Factor solar g	0.79	0.77	0.79	0.77
U huecos [W/m ² K] Verano	3.67	3.25	3.67	3.25

Tabla 4–18. Parámetros energéticos de la epidermis

Datos climáticos

En primer lugar se procede con los Grados Día y la Radiación, considerando 20°C la consigna para calefacción y 25°C para refrigeración.

	GD20 Convencionales [°C/día]	GD25 Convencionales [°C/día]	RT Sur Total [kWh/m2]	GD20 Efectivos [°C/día]	RT Sur Efectiva [kWh/m2]	GD25 Efectivos [°C/día]	GD25 Efectivos Noche [°C/día]
Enero	429.24	-	80.25	358.57	75.66	-	-
Febrero	351.50	-	84.24	293.14	77.60	-	-
Marzo	311.59	-	98.09	280.28	95.32	-	-
Abril	236.13	-	88.99	225.38	77.04	-	-
Mayo	138.06	-	85.76	185.48	79.44	-	-
Junio	-	177.47	77.38	-	46.71	210.50	109.56
Julio	-	240.29	88.56	-	81.14	151.36	75.06
Agosto	-	320.03	102.29	-	94.19	147.87	76.21
Septiembre	-	294.39	109.47	-	28.43	197.33	95.65
Octubre	168.32	-	104.75	132.88	82.42	-	-
Noviembre	317.80	-	85.30	255.58	80.23	-	-
Diciembre	421.57	-	77.49	337.69	68.83	-	-

Tabla 4–19. Valores de climáticos

En este caso, el clima en el que se ha simulado la vivienda es Madrid, y estos serían los resultados convencionales de las variables climáticas a considerar. En las siguientes tablas se presentan los resultados tras la aplicación de las correcciones planteadas por el procedimiento. La corrección que se usa aparece descrita en el punto “GD efectivos: corrección por uso e intermitencia”, es decir, se introduce una excitación climática corregida en lugar de corregir el modelo y sus coeficientes.

Cabe señalar las diferencias entre los valores mensuales calculados a partir de los métodos convencionales y los efectivos que estima el procedimiento.

	% GD20	% GD25	%RT
ENERO	-16		-6
FEBRERO	-17		-8
MARZO	-10		-3

ABRIL	-5		-13
MAYO	34		-7
JUNIO		19	-40
JULIO		-37	-8
AGOSTO		-54	-8
SEPTIEMBRE		-33	-74
OCTUBRE	-21		-21
NOVIEMBRE	-20		-6
DICIEMBRE	-20		-11

Tabla 4-20. Diferencia entre los valores climáticos convencionales y los efectivos

El signo negativo indica que es una reducción con respecto al convencional, lo cual es esperado al eliminar las horas de parada o cambio de consigna, así como los días de no carga. El resultado más evidente se aprecia en la corrección de la radiación durante la estación de refrigeración. La siguiente gráfica muestra cómo en Junio y Septiembre se reduce mucho el valor convencional para tener en cuenta los días en los que no hay demanda porque la temperatura interior se ha mantenido en la banda 20-25 °C.

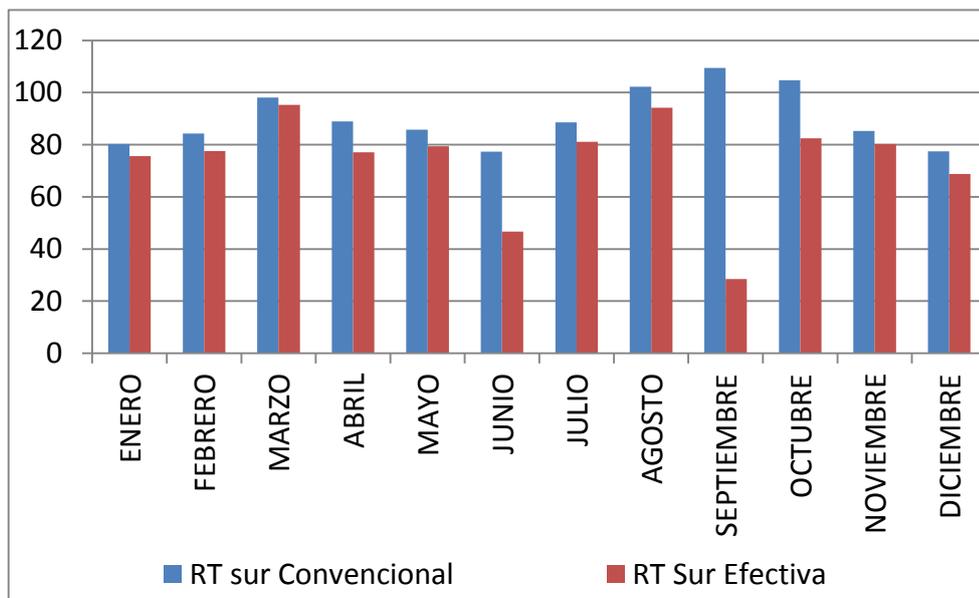


Figura 4-73. Comparación mensual de los valores de radiación integrada mensual total y la efectiva considerada

Otra gráfica interesante es la estación de calefacción (GD20), donde se espera una reducción significativa al corregir el efecto de las noches. Sorprende el mes intermedio de mayo, cuando existen unos días de calefacción pero el resto son neutros o casi de refrigeración, es por ello que la corrección es positiva.

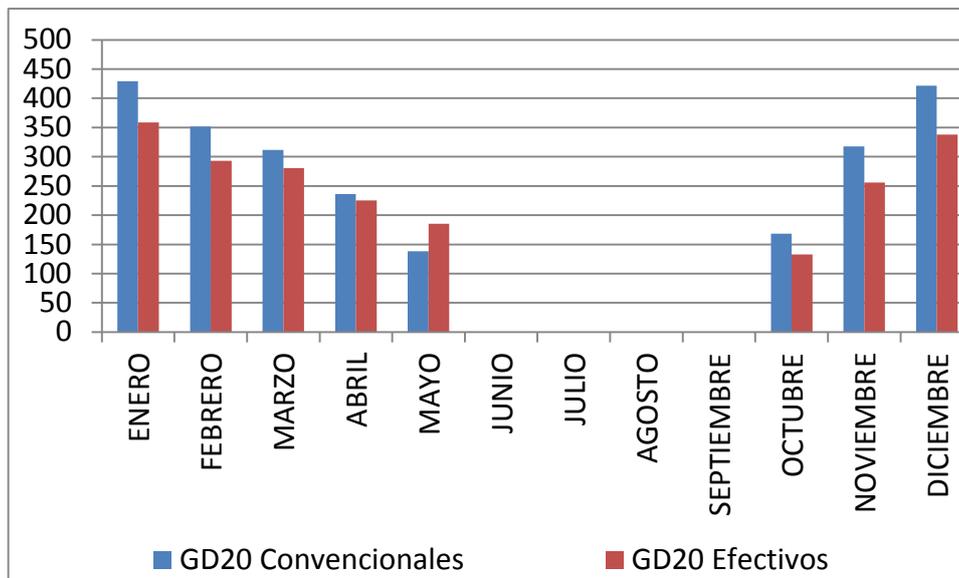


Figura 4-74. Comparación mensual de los valores de GD20 convencionales y los efectos

Como cierre de los parámetros de definición del caso, se calculan los valores del área solar sur equivalente, tanto para los huecos como para la cubierta horizontal, para cuantificar las ganancias solares mensuales resulta:

ASSE [m ²]	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
OPACOS	1.27	1.47	1.83	2.10	2.57	2.89	2.91	2.42	1.87	1.59	1.31	1.22
HUECOS	7.31	8.76	10.80	13.02	16.07	18.01	17.75	14.27	10.87	9.08	7.56	7.06

Tabla 4-21. Comparación entre el ASSE de los huecos vidriados y la cubierta

4.5.2.2. Corrección del modelo

Para el edificio descrito (caso 1) y para un bloque de pisos situado en Madrid también (caso 2), se procede a la identificación del modelo a partir de los resultados del procedimiento detallado obtenidos.

4.5.2.2.1. Caso 1: Calefacción

Los datos calculados son los siguientes:

	Q Demanda Calefacción (kWh/m ²)		Q Demanda Calefacción (kWh/m ²)
Enero	14.95	Mayo	2.78
Febrero	10.61	Octubre	1.51
Marzo	6.86	Noviembre	8.21
Abril	3.91	Diciembre	14.34
Estación	63.16		

Tabla 4-22. Demanda de calefacción del edificio 1 a estudio

Se puede ver la duración de la estación de calefacción, y el valor estacional del mismo. Ahora bien, el modelo de calefacción adapta su capacidad de desglose a la calidad de los datos que tiene. En el caso en

cuestión las opciones válidas son la 1 y la 3, siendo la 3 parte de la 1 cuando las ganancias se agrupan.

Opción 1

$$Q = a_{C1} \cdot Q_{PER} + b_{C1} \cdot \eta_{CAL} \cdot Q_{GAN-SOL} + c_{C1} \cdot \eta_{CAL} \cdot Q_{GAN-FI}$$

Opción 3

$$Q = a_{C3} \cdot Q_{PER} + b_{C3} \cdot \eta_{CAL} \cdot [Q_{GAN-SOL} + Q_{GAN-FI}]$$

Bien, tras la revisión de los datos disponibles y no consiguiendo una identificación aceptable de la opción 1, se elige la opción 3. Resultando:

$$a_{C3} = 1.00 \quad b_{C3} = -0.71$$

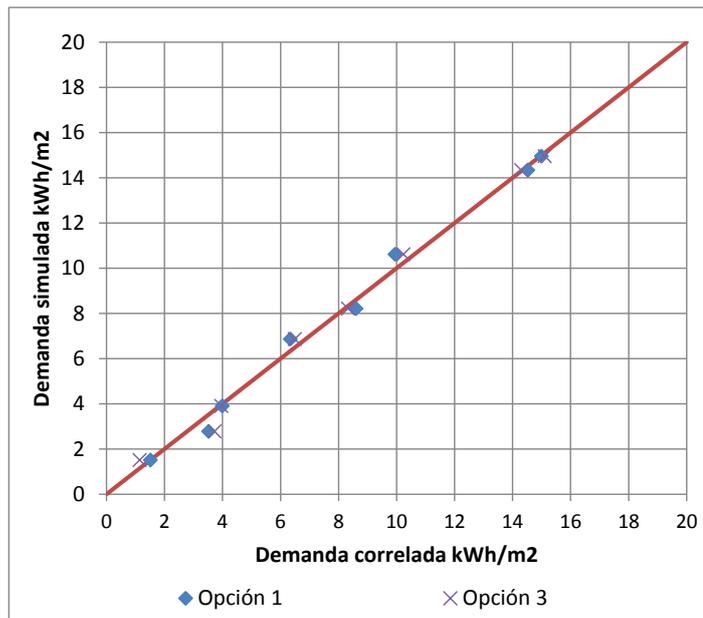


Figura 4-75. Comparación entre los resultados de la simulación del edificio 1 y de la aplicación del modelo de calefacción

Se presenta también la opción 1 para hacer ver que a nivel de ajuste las diferencias son mínimas cuando se deja libertad al valor de los coeficientes. Pero al ser un proceso de identificación, en primer lugar los signos y en segundo los límites de los coeficientes están restringidos, por lo que la opción 1 se descarta por no satisfacer el mínimo de calidad en el ajuste cuando se le obliga a cumplir las restricciones físicas.

4.5.2.2.2. Caso 1: Refrigeración

El caso de refrigeración es más crítico, ya que se dispone de un número menor de datos. El procedimiento para los datos que se tienen resulta:

	Q Demanda Refrigeración (kWh/m²)
Junio	1.15
Julio	5.58
Agosto	4.24
Septiembre	0.97
Estación REF	11.95

Tabla 4-23. Demanda de refrigeración del edificio 1 a estudio

El caso de refrigeración es abordable con varias opciones. Se eligen la 4 y la 5 por la cantidad de datos disponibles. La diferencia entre ellas es que la 4 tiene diferenciada la contribución en la demanda que supone la ventilación nocturna, lo cual es interesante para el estudio de esta medida de ahorro.

Opción 4

$$Q = a_{R4} \cdot \eta_{REF} \cdot Q_{PER-R} + b_{R4} \cdot [Q_{GAN-SOL} + Q_{GAN-FI}] + e_{R4} \cdot \eta_{REF} \cdot Q_{NC}$$

Opción 5

$$Q = a_{R5} \cdot \eta_{REF} \cdot [Q_{PER-R} + Q_{NC}] + b_{R5} [Q_{GAN-SOL} + Q_{GAN-FI}]$$

Si se comparan ambos modelos cuando se identifican ambos modelos, se tienen los siguientes resultados:

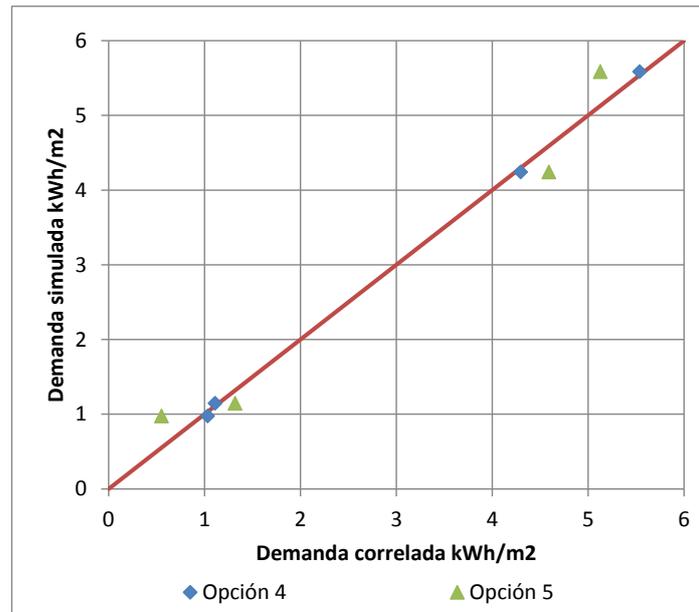


Figura 4-76. Comparación entre los resultados de la simulación del edificio 1 y de la aplicación del modelo de refrigeración

El valor de los coeficientes:

$$a_{R4} = -0.49 \quad b_{R4} = 0.76 \quad e_{R4} = -1$$

$$a_{R5} = -0.70 \quad b_{R5} = 0.78$$

En el modelo 4 se puede ver como la falta de datos hace que la matemática obligue a tomar la unidad a la contribución de la ventilación nocturna, que en la opción 5 queda integrada en el coeficiente a con el efecto de las pérdidas por transmisión.

4.5.2.2.3. Caso 2: Bloque

Este caso aparece de forma simplificada para hacer ver la validez del método cuando es aplicado a edificios más complejos, en este caso bloques de viviendas.

Previamente se han obtenidos todos los parámetros de definición y climáticos necesarios, y se ha simulado el caso en la herramienta detallada. En este caso, solo se muestran los resultados de calefacción con objeto de demostrar que la opción 1 del modelo de calefacción es posible cuando la calidad de los datos es suficiente.

4.5.2.2.4. Calefacción

Ejecutando el proceso de identificación se obtienen los siguientes resultados.

$$a_{C1} = 0.75 \quad b_{C1} = -0.6 \quad C_{C1} = -1$$

$$a_{C3} = 0.6 \quad b_{C3} = -0.53$$

El efecto de las ganancias internas queda fijado a su máximo para la opción 1, pero aparece diferenciado de las ganancias solares, lo que permite el análisis de medidas de control solar.

4.5.2.3. Evaluación de ahorros

Este punto pone de manifiesto la aplicación principal del procedimiento: estudio de medias de ahorro y evaluación de ahorros. Para ello se llevan a cabo simulaciones de los dos edificios anteriores, vivienda unifamiliar aislada y bloque de viviendas, realizando modificaciones sobre la envuelta del edificio, tal y como abajo se describen. La finalidad de este epígrafe es identificar el modelo mensual con los datos de la situación base y pronosticar los ahorros que produciría modificando los parámetros del modelo. Este pronóstico se compara con el ahorro calculado mediante el procedimiento detallado.

4.5.2.3.1. Unifamiliar

Las principales medidas que se llevan a cabo son la mejora del aislamiento en cubierta, suelo y fachada principal. A su vez, se analiza el efecto combinado de sustituir los vidrios de la vivienda. La siguiente tabla muestra en detalle las mejoras realizadas.

Solución	Incremento de espesor de aislamiento			Ventanas (U)
	Cubierta [cm]	Suelo [cm]	Fachada [cm]	
Base (CTE)	-	-	-	3.1
Medida 1	10	5	5	3.1
Medida 2	10	10	10	3.1
Medida 3	15	10	5	3.1
Medida 4	15	5	5	3.1

Medida 5	15	10	10	2.7
Medida 6	15	15	15	2.3

Tabla 4-24. Resumen de medidas de ahorro de energía estudiadas en el edificio 1

El modelo identificado se ha presentado en el epígrafe anterior. Debido a las mejoras realizadas, y la demanda del edificio, se elige la estación de calefacción como la interesante de estudiar. Dicho esto, la siguiente gráfica se muestra la comparativa entre los valores estimados por el modelo (demanda correlada) y los resultados calculados (demanda calculada), para cada uno de los 7 casos anteriores y en los meses de calefacción expuestos con anterioridad.

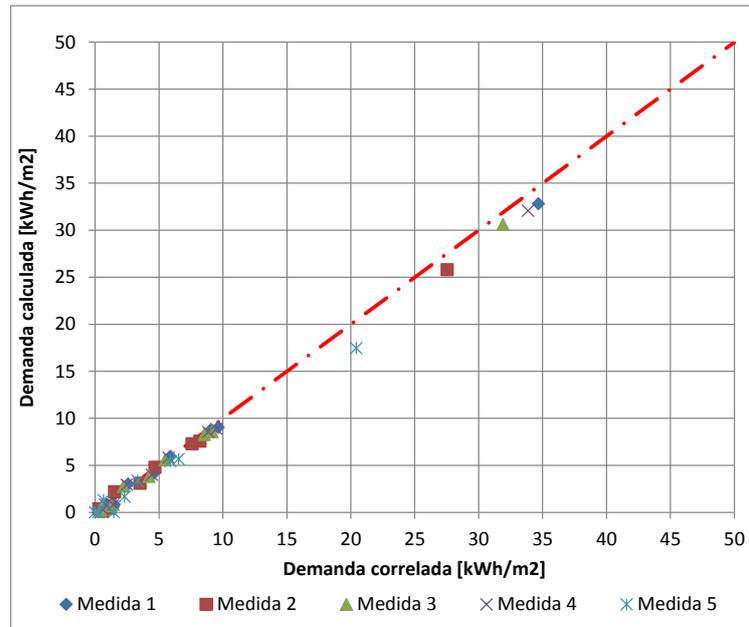


Figura 4-77. Comparación de resultados de la simulación de las medidas de ahorros y los resultados estimados con el modelo de calefacción identificado para los resultados del caso base (edificio 1)

El ajuste del modelo, a la vista de la gráfica, puede tomarse como válido, no obstante se revisan los ahorros anuales estimados que serán clave en las aplicaciones de análisis de costes.

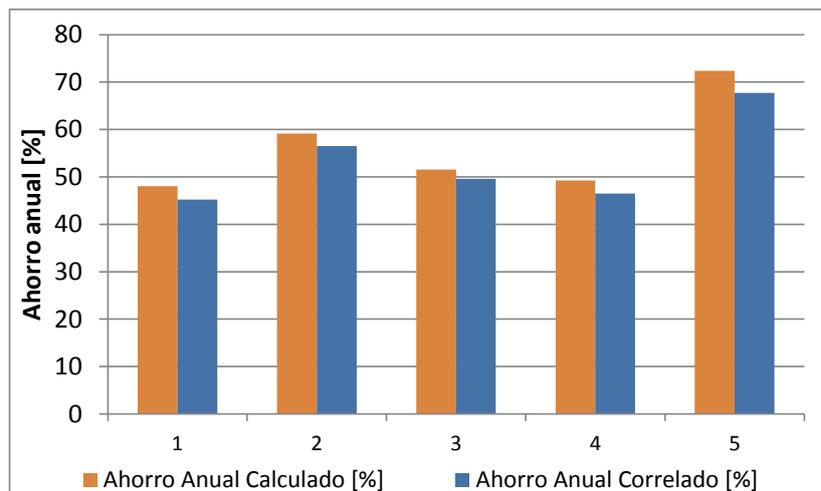


Figura 4-78. Comparación anual del ahorro calculado vía simulación y estimado con el modelo de calefacción (edificio 1)

El modelo subestima los ahorros, siempre por debajo del 5%. Este dato es positivo, ya que permite que los estudios que se realicen estén del lado de la seguridad, pero con una calidad aceptable.

4.5.2.3.2. Bloque

Por coherencia, se eligen las mismas mejoras, pero se modifican los valores de las mismas. En este caso, se procede con más detalle en las variaciones de los espesores de aislamiento.

Solución	Incremento de espesor de aislamiento			Ventanas (U)
	Cubierta [cm]	Suelo [cm]	Fachada [cm]	
Base (CTE)	-	-	-	5
Medida 1	0	0	0	3.1
Medida 2	2	10	5	3.1
Medida 3	5	15	5	3.1
Medida 4	6	15	10	3.1
Medida 5	7	15	15	3.1
Medida 6	8	15	15	3.1

Tabla 4-25. Resumen de medidas de ahorro de energía estudiadas en el edificio 2

Los resultados del modelo frente a los calculados aparecen en la gráfica inferior.

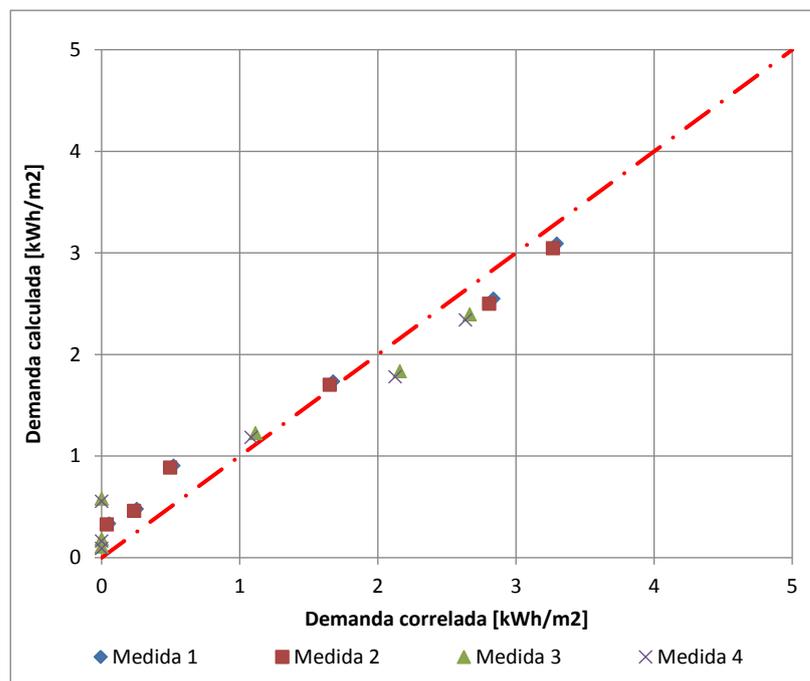


Figura 4-79. Comparación de resultados de la simulación de las medidas de ahorros y los resultados estimados con el modelo de calefacción identificado para los resultados del caso base (edificio 2)

En este caso, hay que decir que las demandas son bajas, por lo que una estimación errónea conlleva un error relativo alto. Para los casos analizados se tienen errores inferiores al 20% en todos los casos. Lo que ocurre es que el ajuste del caso ya tiene un error mayor que el caso de unifamiliares, por lo que las modificaciones realizadas son analizadas desde un modelo con peor ajuste que el de unifamiliares. Ahora bien cuando se comparan los ahorros relativos pronosticados con los calculadas, los resultados son más que aceptables.

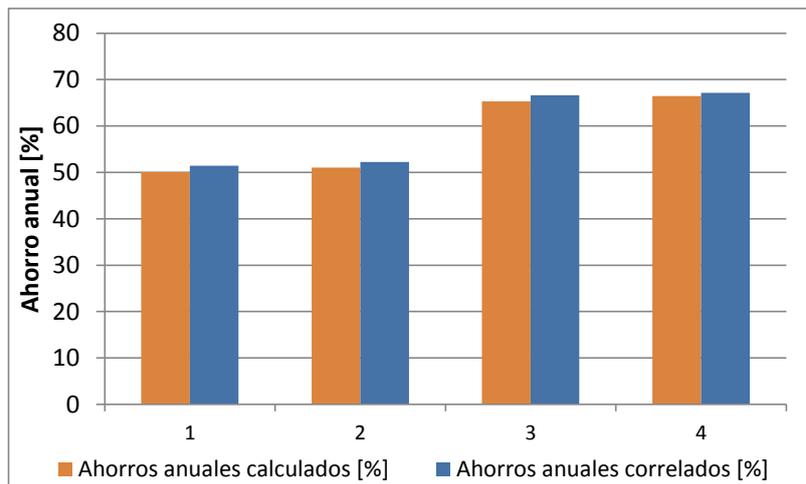


Figura 4-80. Comparación anual del ahorro calculado vía simulación y estimado con el modelo de calefacción (edificio 2)

Esto hace concluir que la esencia física del edificio queda encerrada en el modelo, y por tanto, aunque en este caso los ahorros sean sobreestimados (menor del 3%), las dificultades eran mayores.

4.5.2.4. Conclusiones

Se prueba que el MCS en base mensual puede ser una buena herramienta para estudios paramétricos rápidos, y además por su sencillez integrable en cualquier proceso de estudio económico.

4.5.3. Prediseño Edificios Residenciales – PREDIMENER

4.5.3.1. Descripción y desarrollo

Esta guía pretende servir de ayuda a los técnicos en el proyecto de edificios de viviendas de manera que puedan garantizar desde las primeras fases de diseño las exigencias normativas de consumo en energía primaria (Documento básico HE0) y de demanda de calefacción y refrigeración (Documento básico HE1). Esta verificación se realiza a partir del cumplimiento de unas prescripciones relativas tanto al diseño de la envolvente del edificio como a los sistemas térmicos de calefacción, refrigeración y agua caliente sanitaria.

La verificación del cumplimiento de las exigencias del DB-HE1 para un edificio se realiza mediante el cumplimiento de dos condiciones

- Un edificio satisface la limitación de demanda de calefacción si el valor de su transmitancia promedio incluyendo los puentes térmicos (U_{env-ed}) es inferior a un valor requerido en función de la zona climática y la superficie útil, ($U_{env-req}$)
- Un edificio satisface la demanda de refrigeración si su área solar sur equivalente para verano ($ASSE_{verano-ed}$) es inferior a un valor requerido en función de la zona climática y las renovación nocturna de aire ($ASSE_{verano-req}$)

No obstante como se muestra a continuación aparecen más resultados implícitos de este trabajo.

El desarrollo del trabajo ha consistido en la definición de un proceso de pasadas masivas a partir de una muestra de edificios residenciales (véase la siguiente figura), sobre los que se calcula la demanda mensual y estacional para diferentes casos:

- Variación climática: simulación de los 12 climas para cada caso
- Influencia de la orientación: el mismo edificio en una zona climática se simula en diferentes orientaciones
- Variaciones de la construcción, tanto de los cerramientos opacos, como elementos vidriados y puentes térmicos.
- Efecto de varios niveles de protecciones solares y ventilación nocturna, y efecto combinado de ambas mejoras.

El total de casos analizados es superior a 200000.

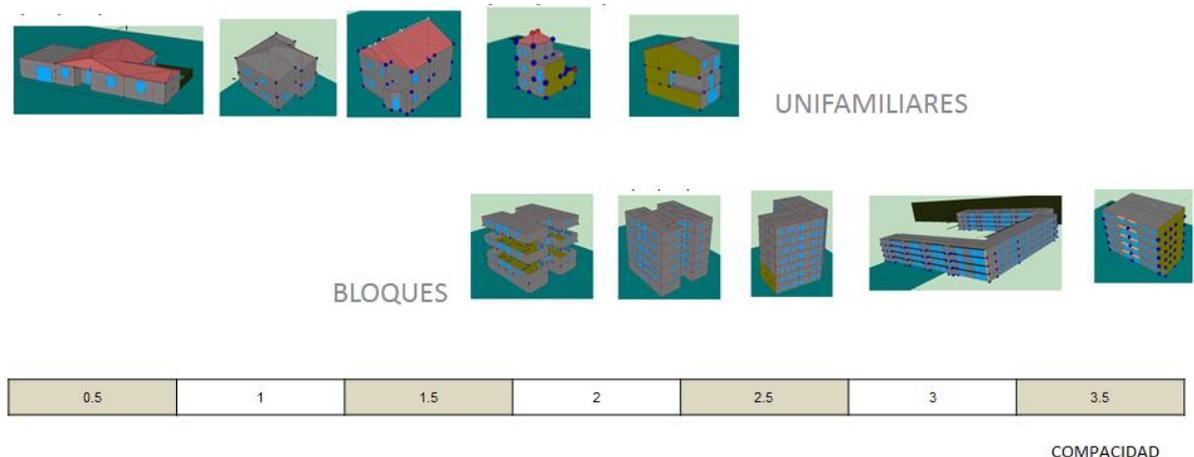


Figura 4-81. Muestra de edificios residenciales simulados

4.5.3.2. Resultados

El resultado principal de esta son los parámetros de mayor importancia para el diseñador del edificio en vistas a cumplir las exigencias mínimas en la demanda de calefacción y refrigeración que establece CTE 2013. Es por ello que en la guía aparecen resultados como los que se ponen de ejemplo para la zona climática de invierno B y de verano 4.

ACH 0.8 Compacidad	ASSE/Aútil				
	0	0,05	0,1	0,15	0,2
0,9	0,20	0,34	0,45	0,55	0,92
1	0,22	0,38	0,50	0,61	1,02
1,1	0,24	0,42	0,55	0,67	1,12
1,2	0,26	0,45	0,60	0,73	1,22
1,3	0,28	0,49	0,65	0,79	1,32
1,4	0,31	0,53	0,70	0,85	1,43
1,5	0,33	0,57	0,75	0,91	1,53
1,6	0,35	0,60	0,80	0,97	1,63
1,7	0,37	0,64	0,85	1,04	1,73
1,8	0,39	0,68	0,90	1,10	1,83
1,9	0,42	0,72	0,95	1,16	1,92
2	0,44	0,76	1,00	1,22	1,95
2,1	0,46	0,79	1,06	1,28	1,97
2,2	0,48	0,83	1,11	1,34	1,99
2,3	0,50	0,87	1,16	1,40	2,02
2,4	0,53	0,91	1,21	1,46	2,04
2,5	0,55	0,94	1,26	1,52	2,06
2,6	0,57	0,98	1,31	1,58	1,92
2,7	0,59	1,02	1,36	1,64	1,95
2,8	0,61	1,06	1,41	1,71	1,97
2,9	0,63	1,10	1,46	1,77	1,99
3	0,66	1,13	1,51	1,83	2,02
3,1	0,68	1,17	1,56	1,89	2,04
3,2	0,70	1,21	1,61	1,95	2,06
3,3	0,72	1,25	1,66	2,01	2,08
3,4	0,74	1,28	1,71	2,07	2,11
3,5	0,77	1,32	1,76	2,13	2,13

Tabla 4–26. Ejemplo de tablas del PREDIMENER para calefacción

Donde para unas renovaciones hora equivalente de 0.6 (equivalentes por ser la combinación entre el caudal de hora HS3 para viviendas junto con el caudal de infiltraciones), una compacidad dependiente del edificio, y una relación entre el área solar sur equivalente por unidad de área útil, se tiene el valor del coeficiente global de transmisión U promedio del edificio que se debe conseguir para cumplir CTE-HE0 2013.

En el caso de refrigeración el parámetro característico a vigilar es el área solar sur equivalente. Por ello se presenta una relación entre la ventilación nocturna y el valor máximo de ganancias solares para que el edificio cumpla las exigencias de demanda de refrigeración.

UNIFAMILIARES	VENTILACION NOCTURNA (ACH)			
	4	6	10	12
ASSE _{verano-ed} /S útil	0,01	0,02	0,03	0,04

Tabla 4–27. Ejemplo de tablas del PREDIMENER para refrigeración

Sin embargo a partir de este trabajo aparecen más resultados de interés. Por ejemplo para edificios con una superficie útil menor de 100m², en zona climática de invierno D, y unas renovaciones hora equivalentes de 0.6, se puede analizar como no solo cumplir las exigencias (zona roja), si no cuál es el esfuerzo para que la demanda del edificio se situé en valores recomendados (zona amarilla) o en la zona del óptimo de rentabilidad (zona verde).

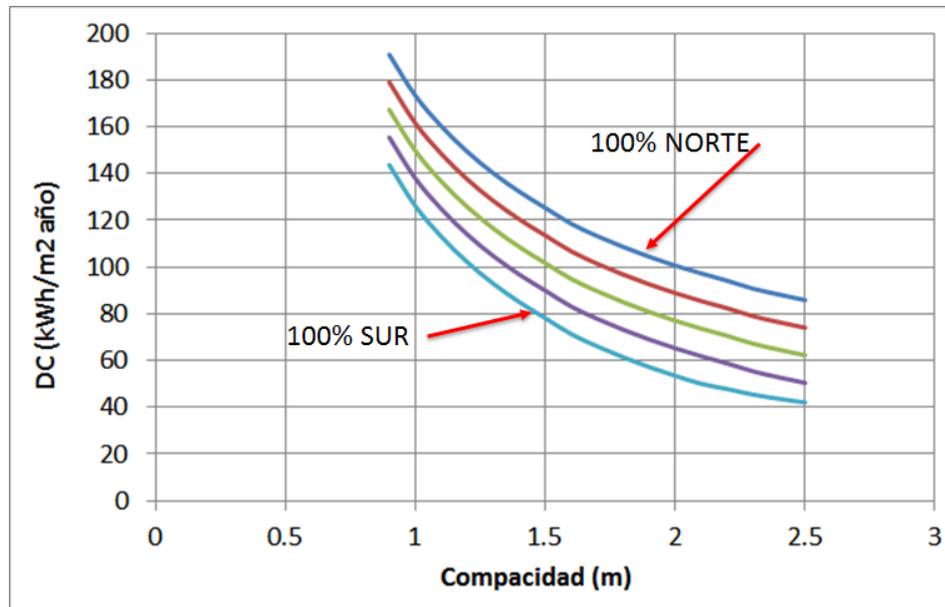


Figura 4-82. Variación de la demanda de calefacción [kWh/m²] para edificios residenciales de menos de 100m² de área útil, ACH equivalente 0.8 en zona climática de invierno D en función de la compacidad y del área solar sur equivalente.

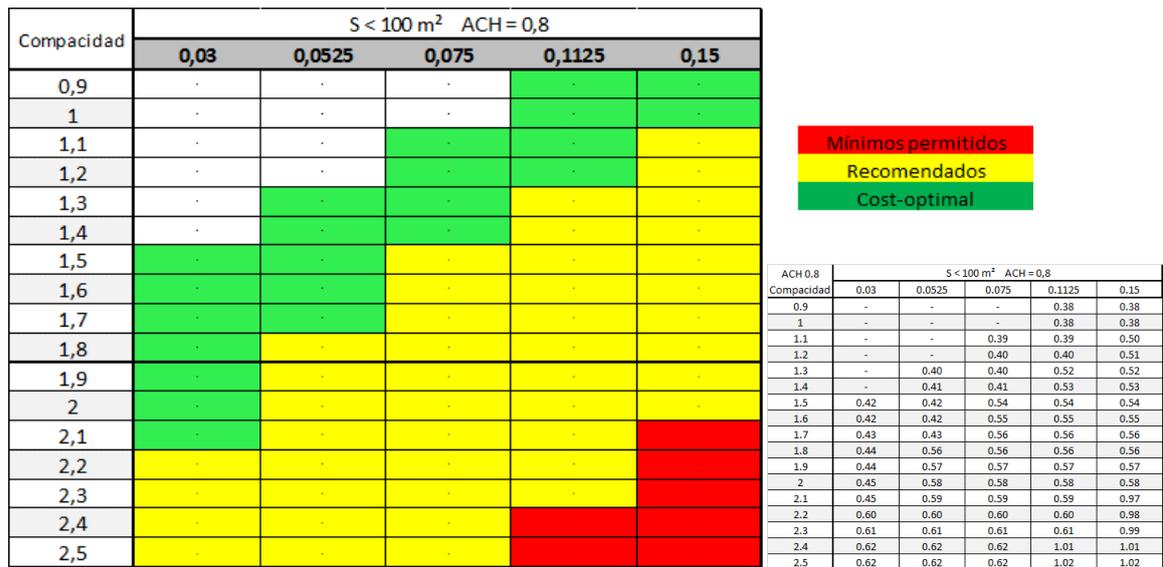


Figura 4-83. Ejemplo tabla de toma de decisiones para conseguir cumplir las exigencias mínimas, situación recomendada o alcanzar el nivel de rentabilidad óptimo (cost optimal).

Cada zona de la tabla se corresponde con un valor del coeficiente global de transferencia como muestra la tabla de la derecha.

Además aparecen análisis de sensibilidad fáciles a partir del PSCDEM. Por ejemplo la influencia en los resultados anteriores del tratamiento de puentes térmicos y del nivel de permeabilidad del edificio.

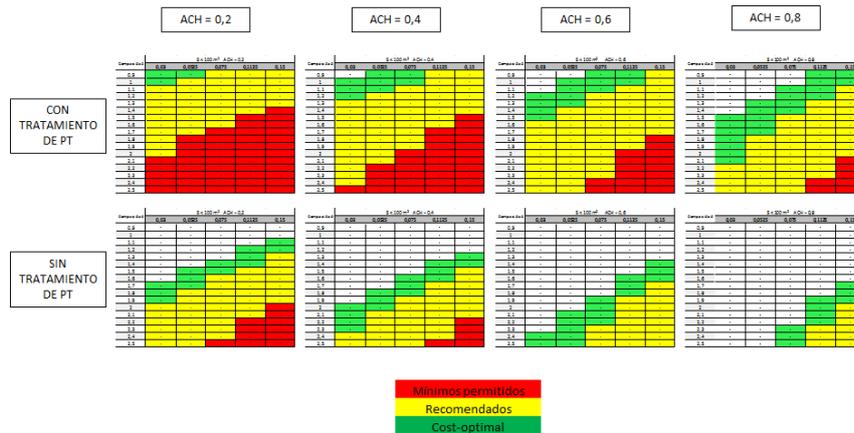


Figura 4-84. Ejemplo de la influencia del tratamiento de puentes térmicos y del nivel de permeabilidad del edificio.

Graficando la variable demanda de calefacción (kWh/m²), se puede ver la influencia entre una situación sin puentes térmicos tratados (izquierda) y puentes térmicos mejoradas (derecha) cuando la construcción se hace según el óptimo de rentabilidad (cost-optimal).

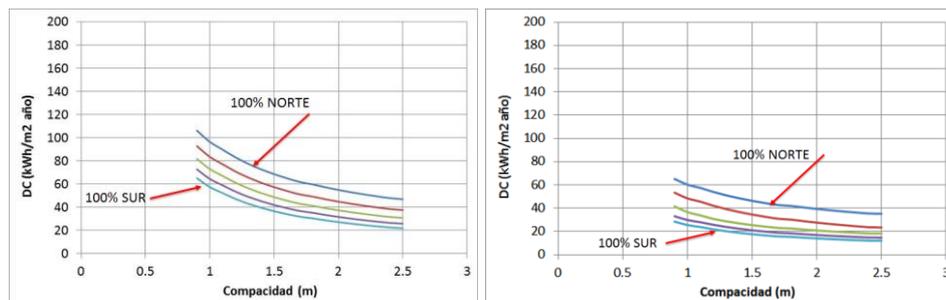


Figura 4-85. Influencia en la demanda de calefacción de la compacidad y el área solar sur equivalente para óptimo de rentabilidad (cost-optimal).

Y para finalizar otro resultado destacable es la relación entre las ganancias y las pérdidas, es decir la influencia de la inercia. Por ejemplo si se toma el caso de viviendas unifamiliares en Sevilla, con 25% superficie acristalada y con una construcción definida para nivel óptimo de rentabilidad con tratamiento de puentes térmicos se obtiene:

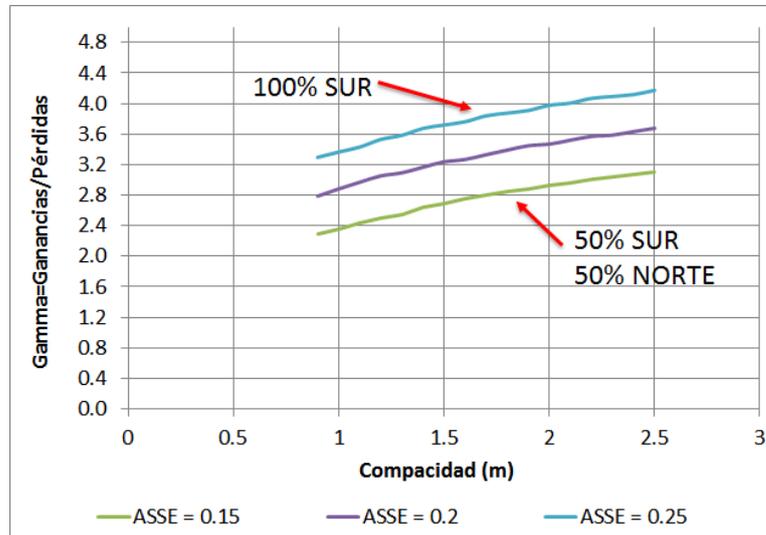


Figura 4-86. Variación de la relación ganancias – pérdidas en calefacción en función de la compacidad y del área solar sur equivalente del edificio.

Esta variable, gamma, se usa para el cálculo del factor de utilización e indica, en el régimen de calefacción, la cuantía de las ganancias que tiene el edificio frente a las pérdidas del mismo. Es una variable importante para el diseñador si quiere optimizar el aprovechamiento de ganancias en calefacción mediante el uso de elementos innovadores, por ejemplo. En sí la variable gamma indica el potencial que tiene el edificio de, jugando con su inercia, minizar la demanda de calefacción.

4.5.4. Toma de decisiones para rehabilitación – SBP

4.5.4.1. Descripción y desarrollo

En el marco del proyecto SBP “Smart Building Park”, en el que se establecerán las bases para el desarrollo futuro de un sistema experto capaz de integrar los pasos necesarios para obtener un modelo de mejora sobre el consumo energético de edificios industriales y verificación de los ahorros obtenidos. Este sistema experto debe ser capaz de integrar los pasos necesarios para obtener un modelo de mejora sobre el consumo energético de edificios, que permita conocer el potencial de mejora de un edificio “a priori”.

Para que el sistema experto cumpla su objetivo de toma de decisiones robustas pero rápidas se ha generado una base de datos a partir de la simulación masiva de 4 edificios terciarios. Los edificios elegidos como representativos del parque de actuación del proyecto. Estos edificios son edificio tipo comercial – COME (edificio 1), tipo oficinas – OFI (edificio 2), tipo Deportivo – DEP (edificio 3) y tipo cultural – CUL (edificio 4).

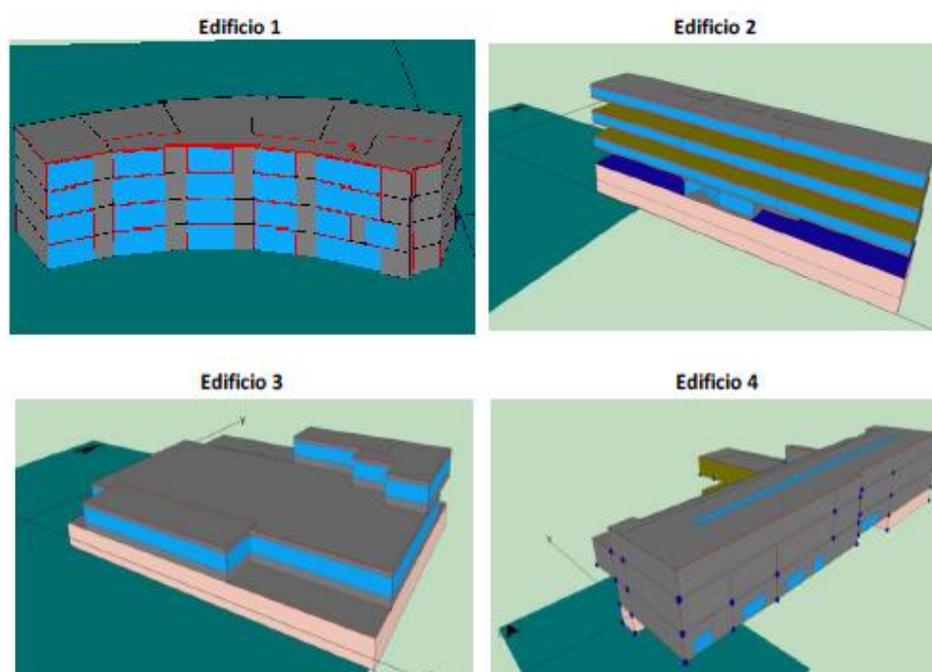


Figura 4-87. Imagen de la muestra de edificios terciarios elegidos en SBP

Además de suponer una explotación del PSCDEM, este sienta la base del conocimiento sobre la influencia del uso en el propio modelo ya que se han simulado los edificios con los 12 posibles usos estándar del CTE-HE1. Es decir, las simulaciones masivas definiendo combinan los 4 edificios, con los 12 usos posibles y los 12 climas genéricos. Cabe destacar que cuando se habla de uso de la combinación entre 4 horarios de operación posibles (8h, 12h, 16h y 24h), y los tres niveles de ganancias internas (baja, media y alta) como función de la densidad de fuentes internas (iluminación más ocupación más equipos)

Usando el motor de cálculo de la herramienta de cumplimiento del código técnico HULC, se han simulado los edificios seleccionados como representativos del parque SBP. Estos edificios se han simulado en la zona climática B4 para los 12 usos convencionales que marca el CTE.

Las etapas solventadas en este trabajo son:

- Definición de los casos (edificio + clima + uso). Obtención de demandas de calefacción y refrigeración mensuales.
- Cálculo de parámetros característicos.
- Corrección del modelo PSCDEM mediante el ajuste de coeficientes.

El modelo de la demanda de calefacción resulta:

$$D_{CAL}^{IDEAL} = a_C \cdot Q_{PER-CAL} - b_C \cdot \eta_{CAL} \cdot [Q_{GAN-SOL} + Q_{GAN-FI}]$$

Objetivo corrección: coeficientes a_C y b_C

El modelo de la demanda de refrigeración resulta:

$$D_{REF}^{IDEAL} = b_R [Q_{GAN-SOL} + Q_{GAN-FI} + Q_{GAN-E}] - a_R \cdot \eta_{REF} \cdot [Q_{PER-R}]$$

Objetivo: coeficientes a_R y b_R

El factor de utilización se ha fijado con la siguiente formulación a la vista de los resultados de las pasadas:

$$\text{Si } \gamma_C > 0 \text{ y } \gamma \neq 1 \quad \eta_{CAL} = \frac{1 - \gamma_C^2}{1 - \gamma_C^3}$$

$$\text{Si } \gamma_C = 1 \quad \eta_{CAL} = \frac{2}{3}$$

$$\text{Donde } \gamma_C = [Q_{GAN-SOL} + Q_{GAN-FI}] / Q_{PER-CAL}$$

A su vez en el caso de refrigeración resulta:

$$\text{Si } \gamma_R > 0 \text{ y } \gamma \neq 1 \quad \eta_{REF} = \frac{1 - \gamma_R^2}{1 - \gamma_R^3}$$

$$\text{Si } \gamma_R = 1 \quad \eta_{REF} = \frac{2}{3}$$

$$\text{Donde } \gamma_R = Q_{PER-CAL} / [Q_{GAN-SOL} + Q_{GAN-FI}]$$

En las siguientes líneas los resultados para el edificio de oficinas.

4.5.4.2. Resultados

Los parámetros característicos necesarios para ejecutar el procedimiento se resumen en la siguiente tabla:

DESCRIPCIÓN	EDIFICIO		Oficinas
	SIGLAS		OFI
	TIPO DE EDIFICIO		Gran Terciario
	SUPERFICIE CONSTRUIDA (m ²)		7537.80
	ALTURA MEDIA (m)		3.10
	ÁREA ACONDICIONADA (m ²)		6629.50
	VOLUMEN ACONDICIONADO (m ³)		20327.40
	ÁREA TRANSFERENCIA (m ²)		4462.80
GEOMETRÍA	ÁREA MUROS (m ²)	NORTE	449.79
		NORESTE	0.00
		ESTE	74.05
		SURESTE	3.68
		SUR	431.53
		SUROESTE	5.88
		OESTE	73.57
		NOROESTE	0.00
	ÁREA HUECOS (m ²)	HORIZONTAL	0.00
		NORTE	967.68
		NORESTE	0.00
		ESTE	147.86
		SURESTE	18.15
		SUR	882.81
		SUROESTE	29.11
		OESTE	147.00
PARÁMETROS ENERGÉTICOS	COMPACIDAD (m)		4.56
	U _M sin PT (W/m ² .K)		1.69
	ΔU (W/m ² .K)		0.16
	U _M con PT (W/m ² .K)		1.86
	ASSE (m ²)	ENERO	864.47
		FEBRERO	932.55
		MARZO	1010.61
		ABRIL	1032.36
		MAYO	1280.58
		JUNIO	1468.71
		JULIO	1369.42
		AGOSTO	1122.85
		SEPTIEMBRE	938.59
		OCTUBRE	936.34
NOVIEMBRE	874.20		
DICIEMBRE	854.72		

Tabla 4–28. Parámetros característicos del edificio tipo Oficinas

	REN/H	
	INVIERNO	VERANO
8H	0.673	0.751
12H	0.955	1.164
16H	1.237	1.578
24H	1.801	1.785

Tabla 4–29. ACH debidas a infiltraciones en edificio 2 - OFI.

Cabe destacar que el área solar sur equivalente es el único parámetro que varía con los datos climáticos (véase su definición). Además las renovaciones hora debidas a infiltraciones son variables con el horario de operación del edificio.

Los valores de los coeficientes correctores del MCS son los que aparecen en la siguiente tabla en función del uso:

Edificio Oficinas	a_C	b_C	b_R	a_R		a_C	b_C	b_R	a_R
BAJA-8H	0.59	0.15	0.17	0.4	BAJA-16H	0.64	0.19	0.30	0.4
MEDIA-8H	0.55	0.16	0.19	0.4	MEDIA-16H	0.59	0.22	0.32	0.4
ALTA-8H	0.47	0.17	0.21	0.4	ALTA-16H	0.51	0.21	0.35	0.4
BAJA-12H	0.60	0.15	0.26	0.4	BAJA-24H	0.76	0.11	0.30	0.4
MEDIA-12H	0.54	0.16	0.28	0.4	MEDIA-24H	0.56	0.16	0.25	0.4
ALTA-12H	0.46	0.16	0.30	0.4	ALTA-24H	0.56	0.15	0.36	0.4

Tabla 4-30. Coeficientes correctores PSCEE edificio 2 - OFI.

El modelo corregido MCS frente a los resultados obtenidos de la simulación en HULC (RREFERENCIA), resultan:

kWh/m ²		Calefacción		Refrigeración	
		MCS	REFERENCIA	MCS	REFERENCIA
OFI1	BAJA-8H	2.15	2.43	24.29	26.02
OFI2	MEDIA-8H	1.57	1.88	28.45	30.32
OFI3	ALTA-8H	1.19	1.51	32.77	34.75
OFI4	BAJA-12H	2.46	2.73	38.77	41.26
OFI5	MEDIA-12H	1.75	2.05	44.92	47.50
OFI6	ALTA-12H	1.31	1.63	51.29	53.94
OFI7	BAJA-16H	2.32	2.59	45.32	47.97
OFI8	MEDIA-16H	1.50	1.81	53.52	56.24
OFI9	ALTA-16H	1.05	1.38	61.98	64.76
OFI10	BAJA-24H	5.79	5.96	47.02	49.47
OFI11	MEDIA-24H	2.43	2.69	42.61	44.45
OFI12	ALTA-24H	1.95	2.23	70.04	72.57

Tabla 4-31. Resultados anuales del modelo de referencia vs MCS

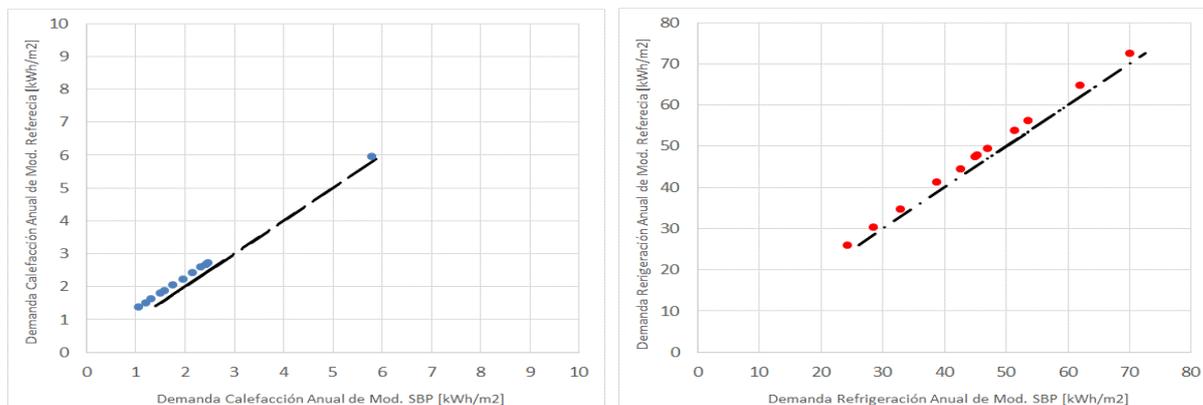


Tabla 4-32. Comparación de resultados anuales modelo de referencia vs MCS

Los resultados mensuales del edificio resultan:

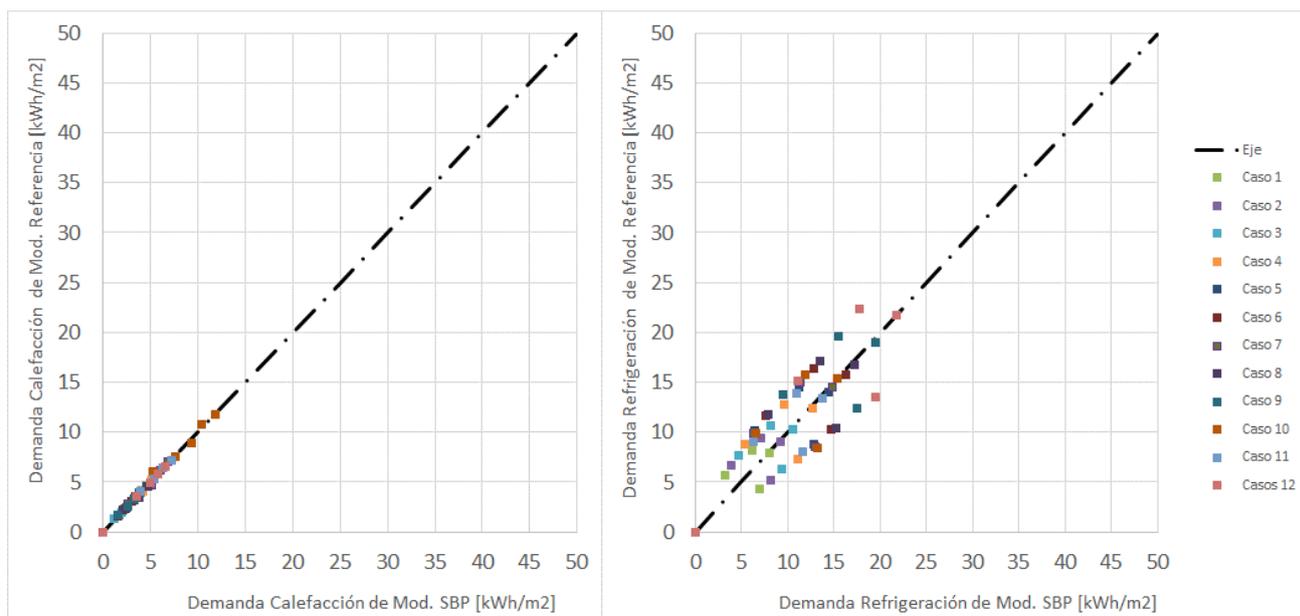


Figura 4-88. Comparación de resultados mensuales modelo de referencia vs PSCEE corregido edificio 2 – OFI.

Existe una cierta tendencia en los resultados de refrigeración: en los meses de inicio y final de estación se comenten errores superiores a los del resto de meses. Esto es porque el modelo es conservador en sus aproximaciones, e incluso, la propia corrección se hace minimizando el error global referido al valor anual.

La duración de la estación aparece en la siguiente tabla. Importante comentar que los meses con una demanda inferior al 10% del valor anual se consideran fuera de la estación. Además en aquellos meses en los que existe demanda de calefacción y refrigeración, y ambas son mayores del 10% anual respectivo, se analiza si la demand mayor es de calefacción o refrigeración y se asocia ese mes a esa estación.

OFICINAS		ESTACIÓN CALEFACCIÓN											
		Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
OFI1	BAJA-8H	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
OFI2	MEDIA-8H	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
OFI3	ALTA-8H	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
OFI4	BAJA-12H	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1
OFI5	MEDIA-12H	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
OFI6	ALTA-12H	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
OFI7	BAJA-16H	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1
OFI8	MEDIA-16H	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
OFI9	ALTA-16H	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
OFI10	BAJA-24H	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1
OFI11	MEDIA-24H	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
OFI12	ALTA-24H	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Tabla 4-33. Duración de la estación de calefacción edificio 2 – tipo Oficinas

OFICINAS		ESTACIÓN REFRIGERACIÓN											
		Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
OFI1	BAJA-8H	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0
OFI2	MEDIA-8H	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0
OFI3	ALTA-8H	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0
OFI4	BAJA-12H	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0
OFI5	MEDIA-12H	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0
OFI6	ALTA-12H	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0
OFI7	BAJA-16H	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0
OFI8	MEDIA-16H	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0
OFI9	ALTA-16H	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0
OFI10	BAJA-24H	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0
OFI11	MEDIA-24H	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0
OFI12	ALTA-24H	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0

Tabla 4-34. Duración de la estación de refrigeración edificio 2 – tipo Oficinas

Los resultados del MCS corregido para el edificio oficinas no son casualidad, si no que para el resto de edificios de la muestra la calidad es idéntica. Las siguientes imágenes dan una idea:

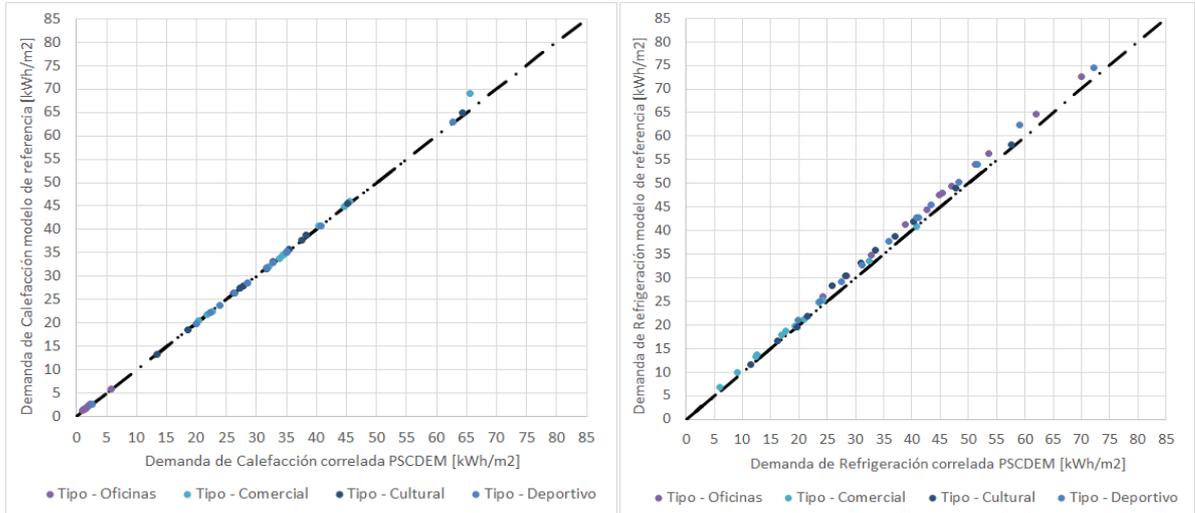


Figura 4-89. Comparación PSCDEM vs herramienta detallada los 4 edificios estudiados: Calefacción (izquierda) y Refrigeración (derecha)

4.5.4.3. Conclusiones

El MCS mensual tiene una utilidad clara como herramienta simplificada para estudios paramétricos, tanto a nivel edificios residenciales como edificios terciarios. No obstante la influencia del uso y el horario es crítica en los edificios terciarios. Por consiguiente se recomienda que para la creación del modelo simplificado se tenga una riqueza de casos variando el uso y los parámetros energéticos.

5. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

Las conclusiones se recogen referenciadas a los capítulos más relevantes del trabajo doctoral. Así mismo al final del epígrafe se recogen las líneas futuras que se creen más interesantes.

1. Potencial científico y tecnológico

En primer lugar recordar que el objetivo principal de la tesis es desarrollar una metodología aplicada de caracterización térmica inversa para edificios. Esta metodología permite obtener un paquete completo de caracterización para edificios existentes a varios niveles.

Este objetivo se demuestra en el trabajo doctoral mediante la obtención de 5 productos:

- Producto 1: Modelo simplificado de caracterización de componentes y equipos
- Producto 2: Procedimiento de verificación de ahorro o modelo de baseline
- Producto 3: Caracterización de consumo para gestión energética
- Producto 4: Herramienta simplificada para la realización de estudios paramétricos
- Producto 5: Modelo simplificado mensual, intermedio entre un modelo simplificado y un modelo detallado, y con utilidad para la corrección de ahorros en rehabilitación energética.

Ahora bien, cada uno de estos productos ha quedado enmarcado en la situación actual del conocimiento como una solución factible e interesante, tal y como muestra el punto 2.2. Esta conclusión no solo aparece vinculada a la revisión de material publicado, si no a la aplicación de este material a los problemas encontrados en los últimos 5 años vinculados a los proyectos de investigación en los que ha aparecido el doctorando.

2. Modelo de caracterización simplificado – MCS

El modelo de caracterización simplificado MCS, supone la columna vertebral del trabajo doctoral. La solución propuesta para modelizar destaca por:

- Estar fundamentada en las funciones de transferencia, conocidas y sencillas de operar.
- Capacidad de adaptación al sistema térmico a caracterizar y a la cantidad/calidad de datos experimentales disponibles. El MCS es válido para un equipo, con las implicaciones que supone, como para un edificio o espacio completo.
- Versatilidad, ya que en función del objetivo MCS combinado con otras herramientas, o por si solo, da solución a los diferentes objetivos de la tesis.

El punto más destacable del MCS es su conexión con la información física del edificio caracterizado a través de la relación entre los coeficientes del modelo y los parámetros estáticos, dinámicos y cuasiestáticos del edificio. Para que este potencial pueda desarrollarse la monitorización toma un papel importante.

3. Aplicaciones MCS

Las aplicaciones son una validación experimental de los objetivos desarrollados en la tesis. Es decir, son la aplicación de la metodología de caracterización MACTIE a través del MCS.

- Aplicación 1 – SINHOR

En esta aplicación se desarrolla un proceso de verificación de ahorros sobre una célula experimental. Para ello se llevan a cabo dos medidas de mejora como son la ventilación nocturna y la activación de la inercia, y con ellas se realiza el análisis de la influencia que tienen estas medidas comparándolas con la situación

de partida del edificio en temperaturas.

Entre los desarrollos conseguidos están:

- La identificación de los parámetros energéticos del edificio a partir de la identificación del MCS.
 - La dualidad Q-T y las dificultades de conocer con exactitud la energía sustraída o aportada por el sistema de climatización al aire del un espacio. Esta incertidumbre, en pasos de tiempo horarios, es demasiado relevante y puede hacer imposible la caracterización de los efectos de la inercia.
 - Una conclusión importante de este trabajo, es la importancia de los experimentos en evolución libre con y sin ganancias internas. La evolución libre de temperatura del aire interior en los periodos de no operación del edificio resulta primordial para conocer la respuesta del edificio ante las excitaciones climáticas.
- Aplicación 2 – MECLIDE

En este caso se valida la utilidad del MCS con la caracterización de una fachada especial. En esta aplicación se ejemplifica con detalle la manera de reducir un modelo detallado hasta un modelo simplificado y cómo el paso de tiempo elegido es la variable de decisión.

Entre los resultados del trabajo se destaca la demostración de la relación entre el flujo de calor por conducción del muro y sus temperaturas superficiales. Además el MCS es explotado para el cálculo de las pérdidas a través del elemento especial.

- Aplicación 3 – CHORUS

En este caso, el MCS aparece en la forma de “modelo integrado de consumo”, y por tanto en esta aplicación se demuestra su utilidad para caracterizar consumos energéticos de edificios. En esta aplicación el sistema es un edificio terciario completo, con un uso desconocido salvo por los horarios de operación del mismo. La aplicación queda sintetizada en una composición de diferentes estudios, en algunos casos a partir de datos de simulación, en la mayoría de datos experimentales. De los estudios se destaca:

- El MCS se adapta a la riqueza de datos medidos en 4 niveles. Cada nivel se traduce en una necesidad de variables medidas y una variación del peso relativo entre la componente determinista y estocástica de la variable objetivo.
- El MCS combinado con un modelo estocástico adquiere capacidad de autoaprendizaje pudiendo alimentarse del pasado. Este hecho le confiere adaptación a los cambios y una solución a la incertidumbre ligada al usuario.
- La combinación del modelo de dispersión aporta una ventaja al MCS, ya que el ruido que se produce en el consumo a causa de lo no medible supone la mayor parte del problema. Es decir, en esta aplicación se crean patrones y sobre ellos se puede conocer a priori la necesidad del modelo estocástico.
- De los 4 niveles propuestos, solo el nivel 3 es aconsejable para su uso como herramienta de baseline en verificación de ahorros, o incluso en predicciones a largo plazo.
- Uno de los estudios se realiza sobre un edificio desconocido, del cuál solo se sabe el consumo horario durante los años 2013 y 2014. Este estudio presenta una realidad habitual en los edificios existentes: se conoce el consumo en una base de tiempo horaria, diaria y probablemente mensual pero no se tienen variables climáticas ni de temperatura interior. La propuesta de un nivel 0 que caracteriza el consumo sin necesidad de mayor información, supone un desarrollo interesante.

Aún con el cambio de criterio que supone esta aplicación, al haber pasado hasta el nivel edificio completo, los errores que se cometen en bases temporales menores o en el entorno de la hora, son inferiores al 30%.

- Aplicación 4 – Corrección/Calibración

Esta aplicación y la siguiente suponen un salto a mayor base de tiempo: “MCS Demanda térmica mensual”. En el caso de la aplicación 4, como el MCS es intregable en un modelo concentrado de consumos. Esta aplicación se combina con la anterior, ya que la anterior supone la reducción desde una herramienta BEPS detallada hasta el MCS mensual. Una vez se tiene el modelo simplificado es más fácil realizar una corrección de resultados usando datos de consumo medidos con el usuario real y el clima real. Este desarrollo es validado en el marco de dos trabajos como son CE3 y ENCERTICUS. En uno consolidándose en la herramienta oficial. Y en en el segundo caso se valida con datos experimentales sobre edificios residenciales.

- Aplicación 5 – Toma de decisiones

En el proceso de reducción del BEPS hasta MCS Demanta Térmica Mensual se obtienen un valor de los coeficientes del MCS tales que, el modelo simplificado es comparable a la herramienta detallada. Este hecho es aprovechado en esta aplicación para demostrar la utilidad del MCS como herramienta de toma de decisiones o análisis paramétrico.

Vinculado a esta aplicación aparecen dos trabajos, como son PREDIMENER y el proyecto SBP. El caso del primero es el más relevante, en él se justifica la necesidad de una herramienta simplificada y la utilidad de la misma.

Por último hay que destacar que para el objetivo de edificios de energía casi nula, el paso desde una herramienta detallada hasta una herramienta simplificada corregida con o sin datos experimentales. Esto es así porque las tendencias llevan a la combinación de distintos, con producción distribuida y almacenamiento, y será necesario la realización de estudios económicos de gran escala.

4. Generales

A continuación se destacan algunas publicaciones vinculadas al trabajo doctoral con la participación del autor:

- Publicación 1: Management and rebuilding energy of existing buildings: diagnostic and characterization procedure energy from measured data. *En: Revista de la construcción*. 2013. Vol. 12. Núm. 3. Pag. 9-16
- Publicación 2: Thermal characterization of existing non residential buildings on a daily basis. - Comunicación en congreso. 11th REHVA World Congress & 8th International Conference on IAQVEC. Praga, Republica Checa. 2013
- Publicación 3: A Monitoring System for Identification and Validation of the Energetic Model of a Building using Wireless Sensor Networks. Comunicación en congreso. 38th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Montreal, Canada. 2012

Estas publicaciones se corresponden con trabajos realizados en el año 2012-2013 (publicación 1) y año 2011-2012 (publicación 2 y 3). Su vinculación con la tesis es directa por formar parte de los inicios del desarrollo del trabajo que aquí se ha sintetizado. Es por ello, que al ser productos mejorados durante los años posteriores se ha decidido solo destacarlos en el cierre del trabajo doctoral.

Líneas futuras

La continuación del trabajo doctoral y de la metodología pasa por:

- Desarrollar la calibración de una herramienta detallada de simulación del comportamiento energético de edicios basada en el método directo de cálculo de cargas.
- Continuar la validación del MCS de consumo integrado como herramienta de verificación de ahorros mediante datos experimentales.
- Vincular el MCS como herramienta de estudio del confort adaptativo del edificio, y de actuaciones de gestión energética que conlleven subenframientos/sobrecalentamientos de los espacios según interese.

6. REFERENCIAS

-
- [1] "PHDC," *Project supported by the European Commission*, 2011. [Online]. Available: www.phdc.eu.
- [2] S. Alvarez-Dominguez, J. L. Molina-Felix, J. M. Salmerón-Lissén, J. Sánchez Ramos, and F. J. Sánchez de la Flor, "Performance Assessment Methods," in *The architecture and engineering of draught cooling*, PHDC Press, 2010.
- [3] J. Sánchez, "PHDC: Sistemas de enfriamiento evaporativo pasivos e híbridos para edificios," 2009.
- [4] J. M. Cejudo López, "Método de identificación en el dominio de la frecuencia. Aplicación a la obtención de modelos en térmica de edificios," Universidad de Sevilla, 1991.
- [5] L. Ljung, *System Identification. Theory for the user*. New Jersey: Prentice Hall, 1994.
- [6] W. Delaney and E. Vaccari, *Dynamic Models and Discrete event simulation*. Marcel Dekker, 1989.
- [7] T. Söderström, *System identification*. UK: Prentice Hall International, 1989.
- [8] O. Katsuhiko, *Ingeniería de Control Moderna*, vol. 4. Madrid: Pearson - Prentice Hall, 2002.
- [9] H. Weinberger, *Curso en Ecuaciones Diferenciales en Derivadas Parciales*. España: Reverté SA, 1995.
- [10] G. Michalesco, "Approximation des systèmes complexes par des modèles de dimension réduite," 1990.
- [11] O. Quéméner, F. Joly, and A. Neveu, "The generalized amalgam method for modal reduction," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 55, no. 4, pp. 1197–1207, 2012.
- [12] J. J. Salgon and A. Neveu, "Application of modal analysis to modelling of thermal bridges in buildings," *Energy Build.*, vol. 10, no. 2, pp. 109–120, 1987.
- [13] J. Sicard, P. Bacot, and A. Neveu, "Analyse modale des échanges thermiques dans le bâtiment," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 28, no. 1, pp. 111–123, 1985.
- [14] J. Pryce, *Numerical Solution of Sturm-Liouville Problems*. Oxford: Clarendon Press, 1993.
- [15] A. Sage and J. Melsa, *System identification*. Londres: Academic Press INC, 1971.
- [16] N. RE, F. DG, and S. DE, "Review of process identification and parameter estimation techniques," *Int. J. Control*, vol. 13, no. 2, pp. 209–264, 1971.
- [17] A. van den Bos and P. Eykhoff, "Model building and parameter estimation as means for intelligent measurement," *Measurement*, vol. 6, no. 1, pp. 25–32, 1988.
- [18] H. Unbehauen and G. P. Rao, "A review of identification in continuous-time systems,"

- Annu. Rev. Control*, vol. 22, no. 0, pp. 145–171, 1998.
- [19] J. J. Bloem, “Dynamic methods for building performance assessment,” *Palenc 2010*, 2010.
- [20] P. Stoica and T. Söderström, “Uniqueness of estimated k-step prediction models of ARMA processes,” *Syst. Control Lett.*, vol. 4, no. 6, pp. 325–331, 1984.
- [21] K. Aström and P. Eykhoff, “System identification - A survey,” *Automatica*, vol. 7, pp. 123–162, 1971.
- [22] H. Madsen, “CTSM.” Technical University of Denmark, 2003.
- [23] P. Stoica and T. Söderström, “Uniqueness of prediction error estimates of multivariable moving average models,” *Automatica*, vol. 18, no. 5, pp. 617–620, 1982.
- [24] T. Söderström and K. J. Åström, “Special issue on trends in system identification,” *Trends Syst. Identif.*, vol. 31, no. 12, pp. 1689–1690, 1995.
- [25] N. Sinha, *Modeling and identification of multivariable dynamic systems*. New York: Van Nostrand, 1983.
- [26] H. Sokenson, *Parameter estimation - principles and problems*. New York: Marcel Dekker, 1980.
- [27] V. Dick and F. Tellez, “COMPASS Measurement and data analysis procedures,” CSTC, Bruselas, 1995.
- [28] H. A. L. van Dijk and F. M. Tellez, “Measurement an data analysis procedures. Final report.,” JOULE II COMPASS Project, 1995.
- [29] P. Strachan, “Model validation using the PASSYS Test cells,” *Spec. Issue Therm. Exp. Simpl. Build.*, vol. 28, no. 2, pp. 153–165, 1993.
- [30] U. Norlén, “Estimating thermal parameters of outdoor test cells,” *Build. Environ.*, vol. 25, no. 1, pp. 17–24, 1990.
- [31] X. Wang and J. Kreider, “Improved artificial neural networks for commercial building energy used prediction,” in *Solar Engineering - ASME*, 1992.
- [32] J. Kreider and A. Rabl, *Heating and cooling of buildings, design for efficiency*. New York: McGraw-Hill, 1994.
- [33] H. Madsen, *Time Series Analysis*. Chapman & Hall, 2008.
- [34] U. Norlen, “Determining the thermal resistance for IN-SITU measurements,” in *Application of System Identification in Energy Savings in Buildings*, 1993, vol. DG XII, pp. 402–429.
- [35] J. J. H. & Associates and L. B. N. Laboratory, “DOE-2 software,” *United States Dep. Energy*, 2001.
- [36] E. Chifofsky and J. Cross, “Reverse Engineering and Desing Recovery: A Taxonomy.” IEEE Software, 2004.

- [37] G. Box and F. Jenkins, *Time Series Analysis: Forecasting and Control*, vol. 2. Ockland: Holden Day, 1976.
- [38] UE, "Paslink," 2008. .
- [39] M. J. Jiménez, H. Madsen, and K. K. Andersen, "Identification of the main thermal characteristics of building components using MATLAB," *Outdoor Testing, Anal. Model. Build. Components*, vol. 43, no. 2, pp. 170–180, 2008.
- [40] P. Baker, "Data Exchange and cross analysis of Round Robin test carried out for the IQ-Test thematic network," Bruselas, 2006.
- [41] J. L. Molina-Felix, "Simulación energética de edificios mediante un modulo de respuesta en frecuencia," 1987.
- [42] R. Pino and A. Gómez, *Introducción a la inteligencia artificial: sistemas expertos, redes neuronales artificiales y computación evolutiva*. España: Universidad de Oviedo, 2001.
- [43] O. Tatari and M. Kucukvar, "Cost premium prediction of certified green buildings: A neural network approach," *Build. Environ.*, vol. 46, no. 5, pp. 1081–1086, 2011.
- [44] M. Soleimani-Mohseni, B. Thomas, and P. Fahlén, "Estimation of operative temperature in buildings using artificial neural networks," *Energy Build.*, vol. 38, no. 6, pp. 635–640, 2006.
- [45] J. Yang, H. Rivard, and R. Zmeureanu, "On-line building energy prediction using adaptive artificial neural networks," *Energy Build.*, vol. 37, no. 12, pp. 1250–1259, 2005.
- [46] A. A. Argiriou, I. Bellas-Velidis, and C. A. Balaras, "Development of a neural network heating controller for solar buildings," *Neural Networks*, vol. 13, no. 7, pp. 811–820, 2000.
- [47] Q. S. Li, D. K. Liu, J. Q. Fang, A. P. Jeary, and C. K. Wong, "Damping in buildings: its neural network model and AR model," *Eng. Struct.*, vol. 22, no. 9, pp. 1216–1223, 2000.
- [48] F. Kreider and X. Wang, "Artificial neural networks demonstration for automated generation of energy use predictors for commercial buildings," *ASHRAE Trans.*, vol. 97, 1991.
- [49] P. A. González and J. M. Zamarreño, "Prediction of hourly energy consumption in buildings based on a feedback artificial neural network," *Energy Build.*, vol. 37, no. 6, pp. 595–601, 2005.
- [50] S. Katipamula and M. Brambley, "Automated diagnostics: improving building system and equipment," in *Performance energy user news*, 1998, vol. 23.
- [51] B. Yu and D. Van Paasen, "Fuzzy neural networks model for building energy diagnosis," in *Eighth International IBPSA Convergence*, 2003.
- [52] CCEE, "INIVE - Internation Network for Information on Ventilation and Energy Performance," www.inive.org. .
- [53] L. Wouters and L. Vandaele, "PASLINK Final activity report," Bruselas, 1995.

- [54] V. Dick and V. der Linde, "PASLINK - Calibration and component test procedures," TNO, Bélgica, 1995.
- [55] "95/04908 The PASSYS project," *Fuel Energy Abstr.*, vol. 36, no. 5, p. 349, 1995.
- [56] V. Dick, "Development of the PASSYS test Method," BBRI & European Comission, Bruselas, 1994.
- [57] L. Vandaele and P. Wouters, "The Passys Services: Summary report.," BBRI & European Commission, Bruselas, 1994.
- [58] P. Wouters, L. Vandaele, P. Voit, and N. Fisch, "The use of outdoor test cells for thermal and solar building research within the PASSYS project," *Spec. Issue Therm. Exp. Simpl. Build.*, vol. 28, no. 2, pp. 107–113, 1993.
- [59] P. H. Baker and H. A. L. van Dijk, "PASLINK and dynamic outdoor testing of building components," *Outdoor Testing, Anal. Model. Build. Components*, vol. 43, no. 2, pp. 143–151, 2008.
- [60] P. A. Strachan and P. H. Baker, "Outdoor testing, analysis and modelling of building components," *Outdoor Testing, Anal. Model. Build. Components*, vol. 43, no. 2, pp. 127–128, 2008.
- [61] I. Heimonen, "Test Report on Round Robin Components," WP3 IQ-TEST, Finland, 2002.
- [62] P. Wouters and L. Vandaele, "Improving quality in test and evaluation procedures of solar and thermal performances of building components - The IQ-TEST Proyect," 2003.
- [63] R. Enriquez, S. Soutullo, M. J. Jiménez, and M. R. Heras, "First steps towards thermal dynamics identification of existing buildings through general simulation model calibration," in *Energy Efficiency in Buildings. CIEMAT*.
- [64] P. A. Strachan and L. Vandaele, "Case studies of outdoor testing and analysis of building components," *Outdoor Testing, Anal. Model. Build. Components*, vol. 43, no. 2, pp. 129–142, 2008.
- [65] A. Erkoreka and C. Escudero, "Upgrading and calibration of two PASLINK test cells. Evaluation through the 'IQ-TEST' round-robin test." Bruselas, 2010.
- [66] E. Hahne and R. Pfluger, "Improvements on PASSYS test cells," *Sel. Proc. ISES 1995 Sol. World Congr. Part II*, vol. 58, no. 4–6, pp. 239–246, 1996.
- [67] L. Castillo, R. Enríquez, M. J. Jiménez, and M. R. Heras, "Dynamic integrated method based on regression and averages, applied to estimate the thermal parameters of a room in an occupied office building in Madrid," *Energy Build.*, vol. 81, no. 0, pp. 337–362, 2014.
- [68] P. Baker, "In situ U-value measurements in traditional buildings - preliminary results," www.historic-scotland.gov.uk/gcu-interim-report-u-value-measurements-traditional-buildings.pdf, 2009. .
- [69] J. Littler, "Test cells: Do we need them?," *Spec. Issue Therm. Exp. Simpl. Build.*, vol. 28, no. 2, pp. 221–228, 1993.

- [70] K. Menoufi, A. Castell, L. Navarro, G. Pérez, D. Boer, and L. F. Cabeza, "Evaluation of the environmental impact of experimental cubicles using Life Cycle Assessment: A highlight on the manufacturing phase," *Appl. Energy*, vol. 92, no. 0, pp. 534–544, 2012.
- [71] H. Dijk and G. Van der Linden, "PASSYS Test procedures," 1994.
- [72] A. Castell, K. Menoufi, A. de Gracia, L. Rincón, D. Boer, and L. F. Cabeza, "Life Cycle Assessment of alveolar brick construction system incorporating phase change materials (PCMs)," *Appl. Energy*, no. 0.
- [73] A. de Gracia, L. Rincón, A. Castell, M. Jiménez, D. Boer, M. Medrano, and L. F. Cabeza, "Life Cycle Assessment of the inclusion of phase change materials (PCM) in experimental buildings," *Energy Build.*, vol. 42, no. 9, pp. 1517–1523, 2010.
- [74] L. Rincón, A. Castell, G. Pérez, C. Solé, D. Boer, and L. F. Cabeza, "Evaluation of the environmental impact of experimental buildings with different constructive systems using Material Flow Analysis and Life Cycle Assessment," *Appl. Energy*, vol. 109, pp. 544–552, Sep. 2013.
- [75] C. J. Martin and J. Watson, "Measurements made in the Energy Monitoring Company (EMC) test cells."
- [76] T. Bouache, S. Ginestet, K. Limam, G. Lindner, and W. Bosschaerts, "Identification of Thermal Characteristics of a Building," *Mediterr. Green Energy Forum 2013 Proc. an Int. Conf. MGEF-13*, vol. 42, no. 0, pp. 280–288, 2013.
- [77] J. Vesterberg, S. Andersson, and T. Olofsson, "Robustness of a regression approach, aimed for calibration of whole building energy simulation tools," *Energy Build.*, vol. 81, no. 0, pp. 430–434, 2014.
- [78] A. Rabl and A. Rialhe, "Energy signature models for commercial buildings: test with measured data and interpretation," *Energy Build.*, vol. 19, no. 2, pp. 143–154, 1992.
- [79] C. Ghiaus, "Experimental estimation of building energy performance by robust regression," *Energy Build.*, vol. 38, no. 6, pp. 582–587, 2006.
- [80] N. Bensouda, "Extending and formalizing the energy signature method for calibrating simulations and illustrating with application for three climates," 2004.
- [81] L. Barelli and G. Bidini, "Development of an energetic diagnosis method for the buildings: example of the Perugia University," *Energy Build.*, vol. 36, no. 1, pp. 81–87, 2004.
- [82] M. A. Piette, S. K. Kinney, and P. Haves, "Analysis of an information monitoring and diagnostic system to improve building operations," *Energy Build.*, vol. 33, no. 8, pp. 783–791, 2001.
- [83] J. E. Pakanen and T. Sundquist, "Automation-assisted fault detection of an air-handling unit; implementing the method in a real building," *Energy Build.*, vol. 35, no. 2, pp. 193–202, 2003.
- [84] M. F. Fels, "PRISM: An introduction," *Energy Build.*, vol. 9, no. 1–2, pp. 5–18, 1986.

- [85] Z. Li, C. J. Paredis, G. Augenbroe, and G. Huang, "A Rule Augmented Statistical Method for Air-conditioning System Fault Detection and Diagnostics," *Energy Build.*, no. 0.
- [86] S. Álvarez and F. J. Sánchez, "EUROCLASS: Development of an european methodology to experimentally assess and classify existing residential buildings based on their actual energy consumption," 1999.
- [87] J. A. Clarke, "Simulation-assisted control in building energy management systems," *Fuel Energy Abstr.*, vol. 34, no. 3, pp. 940–993, 2002.
- [88] J. A. Clarke, J. Cockroft, S. Conner, J. W. Hand, N. J. Kelly, R. Moore, T. O'Brien, and P. Strachan, "Simulation-assisted control in building energy management systems," *A View Energy Build. Perform. Simul. start third Millenn.*, vol. 34, no. 9, pp. 933–940, 2002.
- [89] D. Zhou and S. H. Park, "Simulation-Assisted Management and Control Over Building Energy Efficiency – A Case Study," *2011 2nd Int. Conf. Adv. Energy Eng.*, vol. 14, no. 0, pp. 592–600, 2012.
- [90] ASHRAE, "Development of a toolkit for calculation linear, change-point linear and multiple inverse building energy analysis models.," 2002.
- [91] M. S. Al-Homoud, "Computer-aided building energy analysis techniques," *Build. Environ.*, vol. 36, no. 4, pp. 421–433, Jan. 2001.
- [92] J. A. White and H. Reichmuth, "Simplified method for predicting building energy consumption using average monthly temperatures," in *Proceedings of the Intersociety Energy Conversion Engineering Conference*, 1996, vol. 3, pp. 1834–1839.
- [93] F. S. Westphal and R. Lamberts, "The use of simplified weather data to estimate thermal loads of non-residential buildings," *Perform. Simul. Better Build. Des.*, vol. 36, no. 8, pp. 847–854, 2004.
- [94] R. Yao and K. Steemers, "A method of formulating energy load profile for domestic buildings in the UK," *Energy Build.*, vol. 37, no. 6, pp. 663–671, 2005.
- [95] C. S. Barnaby and J. D. Spitler, "Development of the residential load factor method for heating and cooling load calculations," in *ASHRAE Transactions*, 2005, vol. 111 PART 1, pp. 291–307.
- [96] Q. Zhou, S. Wang, X. Xu, and F. Xiao, "A grey-box model of next-day building thermal load prediction for energy-efficient control," *Int. J. Energy Res.*, vol. 32, no. 15, pp. 1418–1431, 2008.
- [97] F. W. H. Yik, J. Burnett, and I. Prescott, "Predicting air-conditioning energy consumption of a group of buildings using different heat rejection methods," *Energy Build.*, vol. 33, no. 2, pp. 151–166, 2001.
- [98] M. Bauer and J.-L. Scartezzini, "A simplified correlation method accounting for heating and cooling loads in energy-efficient buildings," *Energy Build.*, vol. 27, no. 2, pp. 147–154, 1998.
- [99] A. Dhar, T. A. Reddy, and D. E. Claridge, "Modeling hourly energy use in commercial buildings with Fourier series functional forms," *J. Sol. Energy Eng. Trans. ASME*, vol. 120,

no. 3, pp. 217–223, 1998.

- [100] Y. F. Ma, H. J. Li, J. P. Lin, and X. Yu, “Greatly improved stability of passively Q-switched Ce:Nd:YAG laser by using corner cube prism,” *Laser Phys.*, pp. 1–4, 2010.
- [101] P. C. H. Yu and W. K. Chow, “Energy use in commercial buildings in Hong Kong,” *Appl. Energy*, vol. 69, no. 4, pp. 243–255, 2001.
- [102] A. Kimbara, S. Kurosu, R. Endo, K. Kamimura, T. Matsuba, and A. Yamada, “On-line prediction for load profile of an air-conditioning system,” in *ASHRAE Transactions*, 1995, vol. 101, no. Pt 2, pp. 198–207.
- [103] G. R. Newsham and B. J. Birt, “Building-level occupancy data to improve ARIMA-based electricity use forecasts,” in *BuildSys’10 - Proceedings of the 2nd ACM Workshop on Embedded Sensing Systems for Energy-Efficiency in Buildings*, 2010, pp. 13–18.
- [104] B. B. Ekici and U. T. Aksoy, “Prediction of building energy consumption by using artificial neural networks,” *Adv. Eng. Softw.*, vol. 40, no. 5, pp. 356–362, 2009.
- [105] R. Yokoyama, T. Wakui, and R. Satake, “Prediction of energy demands using neural network with model identification by global optimization,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 50, no. 2, pp. 319–327, 2009.
- [106] J. F. Kreider, D. E. Claridge, P. Curtiss, R. Dodier, J. S. Haberl, and M. Krarti, “Building energy use prediction and system identification using recurrent neural networks,” *J. Sol. Energy Eng. Trans. ASME*, vol. 117, no. 3, pp. 161–166, 1995.
- [107] R. Platon, V. R. Dehkordi, and J. Martel, “Hourly Prediction of a Building’s Electricity Consumption Using Case-Based Reasoning, Artificial Neural Networks and Principal Component Analysis,” *Energy Build.*, no. 0.
- [108] J. Cho, S. Shin, J. Kim, and H. Hong, “Development of an energy evaluation methodology to make multiple predictions of the HVAC&R system energy demand for office buildings,” *Energy Build.*, vol. 80, no. 0, pp. 169–183, 2014.
- [109] D. Monfet, M. Corsi, D. Choinière, and E. Arkhipova, “Development of an energy prediction tool for commercial buildings using case-based reasoning,” *Energy Build.*, vol. 81, no. 0, pp. 152–160, 2014.
- [110] J. S. Haberl and S. Thamilsaran, “Great Energy Predictor Shootout II: Measuring retrofit savings - overview and discussion of results,” *ASHRAE Trans.*, vol. 102, no. 2, pp. 419–435, 1996.
- [111] J. F. Kreider and J. S. Haberl, “Predicting hourly building energy use: the great energy predictor shootout - overview and discussion of results,” in *ASHRAE Transactions*, 1994, vol. 100, no. 2, pp. 1104–1118.
- [112] J. S. Haberl and S. Thamilsaran, “Great energy predictor shootout II measuring retrofit savings,” *ASHRAE J.*, vol. 40, no. 1, 1998.
- [113] C. Fan, F. Xiao, and S. Wang, “Development of prediction models for next-day building energy consumption and peak power demand using data mining techniques,” *Appl.*

- Energy*, vol. 127, no. 0, pp. 1–10, 2014.
- [114] H. Zhao and F. Magoulès, “A review on the prediction of building energy consumption,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 6, pp. 3586–3592, 2012.
- [115] K. J. Lomas, H. Eppel, C. Martin, and D. Bloomfield, “Empirical validation of thermal building simulation programs using test room data,” 1994.
- [116] A. / ASHRAE, “Standard method of test for the evaluation of building energy analysis computer programs,” *Standard 140*, vol. 140. 2004.
- [117] DOE, “EnergyPlus - Engineering Reference.” United States, 2010.
- [118] C. Yan, S. Wang, and F. Xiao, “A simplified energy performance assessment method for existing buildings based on energy bill disaggregation,” *Cool Roofs, Cool Pavements, Cool Cities, Cool World*, vol. 55, no. 0, pp. 563–574, 2012.
- [119] Y. Pan, Z. Huang, and G. Wu, “Calibrated building energy simulation and its application in a high-rise commercial building in Shanghai,” *Energy Build.*, vol. 39, no. 6, pp. 651–657, 2007.
- [120] S. Wang, C. Yan, and F. Xiao, “Quantitative energy performance assessment methods for existing buildings,” *Cool Roofs, Cool Pavements, Cool Cities, Cool World*, vol. 55, no. 0, pp. 873–888, 2012.
- [121] A. Smith, N. Fumo, R. Luck, and P. J. Mago, “Robustness of a methodology for estimating hourly energy consumption of buildings using monthly utility bills,” *Energy Build.*, vol. 43, no. 4, pp. 779–786, 2011.
- [122] T. Catalina, J. Virgone, and E. Blanco, “Development and validation of regression models to predict monthly heating demand for residential buildings,” *Energy Build.*, vol. 40, no. 10, pp. 1825–1832, 2008.
- [123] E. I. Administration, “Measuring Energy Efficiency in the United States’ Economy: A Beginning,” 1995.
- [124] S.-M. Deng and J. Burnett, “A study of energy performance of hotel buildings in Hong Kong,” *Energy Build.*, vol. 31, no. 1, pp. 7–12, 2000.
- [125] J. C. Lam and S. C. M. Hui, “Sensitivity analysis of energy performance of office buildings,” *Build. Environ.*, vol. 31, no. 1, pp. 27–39, 1996.
- [126] A. / BPI, “Standard Practice for Standardized Qualification of Whole-House Energy Savings predictions by Calibration to Energy Use History,” *ANSI/BPI-2400-S-2012*. 2012.
- [127] J. Sun and R. Agami, “Calibration of building energy simulation programs using the analytic optimization approach (RP-10151),” *HVAC&R Res.*, vol. 12, pp. 177–196, 2011.
- [128] P. Raftery, M. Keane, and A. Costa, “Calibrating whole building energy models: Detailed case study using hourly measured data,” *Energy Build.*, vol. 43, no. 12, pp. 3666–3679, 2011.
- [129] J. R. Ben Polly, “Evaluation of Automated Utility Bill Calibration Methods,” *NREL - BA*

Technical Update Meeting. 2013.

- [130] BESTEST-EX, "http://www.nrel.gov/buildings/bestest_ex.html," 2014. .
- [131] T. A. Reddy, I. Maor, and C. Panjapornpon, "Calibrating detailed building energy simulation programs with measured data - Part I: General methodology (RP-1051)," *HVAC R Res.*, vol. 13, no. 2, pp. 221–241, 2007.
- [132] T. A. Reddy, I. Maor, and C. Panjapornpon, "Calibrating detailed building energy simulation programs with measured data - Part II: Application to three case study office buildings (RP-1051)," *HVAC R Res.*, vol. 13, no. 2, pp. 243–265, 2007.
- [133] T. A. Reddy, I. Maor, and S. Jian, "No Title," *Proced. Reconciling Comput. Results With Meas. Energy Data*, 2006.
- [134] M. J. Gestwick and J. A. Love, "Trial application of ASHRAE 1051-RP: Calibration method for building energy simulation," *J. Build. Perform. Simul.*, vol. 7, no. 5, pp. 346–359, 2014.
- [135] D. Coakley, P. Raftery, and M. Keane, "A review of methods to match building energy simulation models to measured data," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 37, no. 0, pp. 123–141, 2014.
- [136] ASHRAE, "Measurement of energy and demand savings," *ASHARE Guidelines 14-2002*. 2002.
- [137] EVO, "International Performance Measurement and Verification Protocol," 1999.
- [138] D. of E. of U. States, "US DOE Federal Energy Management Programa (FEMP)," <http://www1.eere.energy.gov/femp/>, 2014. .
- [139] G. Mustafaraj, D. Marini, A. Costa, and M. Keane, "Model calibration for building energy efficiency simulation," *Appl. Energy*, vol. 130, no. 0, pp. 72–85, Jan. 2014.
- [140] K. Sun, D. Yan, T. Hong, and S. Guo, "Stochastic modeling of overtime occupancy and its application in building energy simulation and calibration," *Build. Environ.*, vol. 79, no. 0, pp. 1–12, 2014.
- [141] U. S. D. epartment of energy offiice of energy efficiency and renewable energy, "Measuremente and Verification - Guide for US government buildings," *DOE/GO*. 2000.
- [142] U. S. D. of energy offiice of energy efficiency and renewable energy, "M&V Guidelines: Measurements and Verification for Federal Energy Projects," *DOE/GO*. 2000.
- [143] G. of California, "Energy efficiency evaluation report," 2001.
- [144] C. C. Collaborative, "Guidelines for verifying existing building commissioning project savings," 2008.
- [145] N. W. U. – Sudáfrica, "The measurement and verification guideline for energy efficiency and demand-side management," 2010.
- [146] J. J. Bloem, *System identification applied to building performace data*. Bruselas: Joint Research

Centre - European commission, 1994.

- [147] J. M. Pinazo and E. Torrella, "Comportamiento Térmico de Edificios en Régimen Variable. Obtención de la función de transferencia en muros de construcción." Universidad Politécnica de Valencia.
- [148] D. G. Stephenson and G. P. Mitalas, "CALCULATION OF HEAT CONDUCTION TRANSFER FUNCTIONS FOR MULTI-LAYER SLABS.," *ASHRAE Trans.*, vol. 77, no. Pt 2, pp. 117–126, 1971.
- [149] G. Ciulla, V. Lo Brano, and A. Orioli, "A criterion for the assessment of the reliability of ASHRAE conduction transfer function coefficients," *Energy Build.*, vol. 42, no. 9, pp. 1426–1436, 2010.
- [150] Á. Ruiz-Pardo, S. Á. Domínguez, and J. A. S. Fernández, "Revision of the Trombe wall calculation method proposed by UNE-EN ISO 13790," *Energy Build.*, vol. 42, no. 6, pp. 763–773, Jun. 2010.
- [151] C. J. Tranter, "Conduction of heat in solids: H.S. Carslaw and J.C. Jaeger: (2nd Edition). Clarendon Press, Oxford, 1959. x + 510 pp. 84s," *J. Mech. Phys. Solids*, vol. 7, no. 4, p. 288, 1959.
- [152] B. I. Höglund, G. P. Mitalas, and D. G. Stephenson, "Surface temperatures and heat fluxes for flat roofs," *Build. Sci.*, vol. 2, no. 1, pp. 29–36, 1967.
- [153] T. J. R. Cooper, "1986 ASHRAE handbook: Refrigeration systems and applications: ASHRAE, Inc., USA 1986, ISSN 82 64 3223, US\$100," *Int. J. Refrig.*, vol. 10, no. 4, p. 243, 1987.
- [154] "96/00806 1995, ASHRAE Handbook, HVAC applications, Si edition," *Fuel Energy Abstr.*, vol. 37, no. 1, p. 49, 1996.
- [155] ASHRAE, "HANDBOOK FUNDAMENTALS 2009." 2009.
- [156] AENOR, "Eficiencia energética de los edificios. Consumo global de energía y definición de las evaluaciones energéticas," *UNE-EN 15603*. 2008.
- [157] AENOR, "Eficiencia energética de los edificios. Cálculo del consumo de energía para calefacción y refrigeración de espacios. (ISO 13790:2008)," *UNE-EN ISO 13790*. 2011.
- [158] D. S. CIEMAT, *Propuesta para la extensión de la norma básica de edificación de condiciones térmicas de los edificios (NBE.CT.79)*, vol. 1. Madrid: Secretría General Técnica del CIEMAT. Mnisterior de Industria y Energía., 1988.
- [159] M. J. N. Oliveira Panão, S. M. L. Camelo, and H. J. P. Gonçalves, "Solar Load Ratio and ISO 13790 methodologies: Indirect gains from sunspaces," *Energy Build.*, vol. 51, no. 0, pp. 212–222, 2012.
- [160] P. G. Cesaratto and M. De Carli, "A measuring campaign of thermal conductance in situ and possible impacts on net energy demand in buildings," *Energy Build.*, vol. 59, no. 0, pp. 29–36, 2013.
- [161] A.-C. E. N. TC89/WG8, "In-situ measurement of the thermal resistance and thermal

- transmittance," *EN 12494*. 1995.
- [162] F. Asdrubali and G. Baldinelli, "Thermal transmittance measurements with the hot box method: Calibration, experimental procedures, and uncertainty analyses of three different approaches," *Energy Build.*, vol. 43, no. 7, pp. 1618–1626, 2011.
- [163] AENOR, "Incertidumbre de medida. Parte 3: Guía para la expresión de la incertidumbre de medida," *UNE-ISO/IEC GUIA 98-3 IN*. 1995.
- [164] M. Pinto, J. Viegas, and V. P. de Freitas, "Air permeability measurements of dwellings and building components in Portugal," *Build. Environ.*, vol. 46, no. 12, pp. 2480–2489, 2011.
- [165] F. Causone, S. P. Corgnati, M. Filippi, and B. W. Olesen, "Experimental evaluation of heat transfer coefficients between radiant ceiling and room," *Energy Build.*, vol. 41, no. 6, pp. 622–628, 2009.
- [166] F. Kalmár and T. Kalmár, "Interrelation between mean radiant temperature and room geometry," *Cool Roofs, Cool Pavements, Cool Cities, Cool World*, vol. 55, no. 0, pp. 414–421, 2012.
- [167] F. R. d'Ambrosio Alfano, M. Dell'Isola, B. I. Paella, G. Riccio, and A. Russi, "On the measurement of the mean radiant temperature and its influence on the indoor thermal environment assessment," *Build. Environ.*, vol. 63, no. 0, pp. 79–88, 2013.
- [168] F. Frontini and T. E. Kuhn, "The influence of various internal blinds on thermal comfort: A new method for calculating the mean radiant temperature in office spaces," *Energy Build.*, vol. 54, no. 0, pp. 527–533, 2012.
- [169] G. de Termotecnica, "LIDER - Código Técnico de la Edificación," *LIDER*. 2013.
- [170] H. A. L. van Dijk Arkesteijn, CAM, "Windows and space heating requirements; parametric studies leading to simplified calculation method.," 1987.
- [171] Y. G. Yohanis and B. Norton, "Utilization factor for building solar-heat gain for use in a simplified energy model," *Appl. Energy*, vol. 63, no. 4, pp. 227–239, 1999.
- [172] ISO, "Energy performance of buildings — Calculation of energy use for space heating and cooling," *ISO/FDIS 13790:2007(E)*. 2007.
- [173] J. Jokisalo and J. Kurnitski, "Performance of EN ISO 13790 utilisation factor heat demand calculation method in a cold climate," *Energy Build.*, vol. 39, no. 2, pp. 236–247, 2007.
- [174] C. Coskun, "A novel approach to degree-hour calculation: Indoor and outdoor reference temperature based degree-hour calculation," *7th Int. Conf. Sustain. Energy Technol. 7th Int. Conf. Sustain. Energy Technol.*, vol. 35, no. 6, pp. 2455–2460, 2010.
- [175] T. Söderström, M. Mossberg, and M. Hong, "A covariance matching approach for identifying errors-in-variables systems," *Automatica*, vol. 45, no. 9, pp. 2018–2031, 2009.
- [176] ASHRAE, "Development of an analytical verification test suite for whole building energy simulation programs (building fabric)," *ASHRAE 1052-RP*. 2001.

- [177] A. Ruiz, F. J. Sánchez, and J. Sánchez, "Numerical simulation of a ventilated facade with PCM inside the air channel," in *INNO-SP-92*, 2012, vol. 1.
- [178] M. N. Ozisik, *Basic heat transfer*, vol. 2. US: McGraw-Hill Inc., 1977.
- [179] L. Barelli and G. Bidini, "Development of an energetic diagnosis method for the buildings: example of the Perugia University," *Energy Build.*, vol. 36, no. 1, pp. 81–87, 2004.
- [180] J. C. Lam, "Energy analysis of commercial buildings in subtropical climates," *Build. Environ.*, vol. 35, no. 1, pp. 19–26, 2000.
- [181] S. Álvarez and S. F.J., "EUROCLASS: Development of an european methodology to experimentally assess and clasify existing residential buildings based on their actual energy consumption, The Rating Methodology," 1999.
- [182] C. P. U. Commission, "DEER - Database for Energy Efficiency Resources," *DEER*, 2012.
- [183] A. van den Bos, "Physical model fitting - the choice of criterion of goodness of fit," *Measurement*, vol. 2, no. 2, pp. 98–102, 1984.
- [184] -Ing habil D Hofmann, "Modelling of errors in measurement," *Measurement*, vol. 1, no. 3, pp. 125–128, 1983.
- [185] A. van den Bos, "Parametric statistical model-based measurement," *Measurement*, vol. 14, no. 1, pp. 55–61, 1994.
- [186] U. C. III, "Guía práctica para la realización de la medida y del cálculo de errores." 1998.
- [187] U. of T. Les Kirkup, *Experimental methods, an introduction to the analysis and presentation of data*. Sydney: John Wiley & Sons, 1994.

7. ANEXOS

Los dos anexos que se exponen a continuación son desarrollos de la tesis que complementan la información expuesta anteriormente. El primero de ellos responde a los inicios de la resolución de una necesidad intrínseca del desarrollo de la tesis, que es cómo calcular la incertidumbre del modelo. El segundo describe de forma simplificada otras aplicaciones del MCS realizadas en el marco de la tesis.

7.1. CALIDAD E INCERTIDUMBRE

7.1.1. Introducción

Por el momento no existe una técnica reconocida y normalizada que sea capaz de probar la validez de los modelos causales elaborados de forma empírica. Lo que se puede hacer es comprobar si las inferencias causales que formula un investigador son consistentes con los datos disponibles, estableciendo incluso de esta manera el rango de validez. Aunque existen diversos trabajos que ofrecen argumentos para elegir el mejor ajuste como este [183], las reflexiones y conclusiones de los mismos no son claras y en la mayoría de los casos particulares para el modelo tratado en sus trabajos. Esto lleva a la necesidad de establecer unos criterios prácticos y funcionales para la metodología resultante.

A lo largo del siguiente anexo se define un modelo como un conjunto de relaciones que se usan para representar de forma sencilla una porción de la realidad empírica. Cuando un investigador elabora un modelo y posteriormente se comprueba que el modelo no se ajusta a los datos, se pueden tomar dos decisiones: modificar el modelo o abandonarlo. Pero si el modelo es consistente con los datos, esto nunca prueba los efectos causales. La consistencia entre los datos y el modelo no implica la consistencia entre el modelo y la realidad. Lo único que se puede afirmar es que los supuestos del investigador no son contradictorios y por lo tanto pueden ser válidos. Pero el "ser válidos", no quiere decir que sean la única explicación del fenómeno objeto de estudio, ya que es posible que otros modelos también se adapten a los mismos datos.

Asociación no implica causalidad: que exista una fuerte asociación entre dos variables no es suficiente para sacar conclusiones sobre las relaciones causa – efecto; por ejemplo, existe una fuerte correlación entre el número de bomberos que actúan en un incendio y la importancia del daño ocasionado por el mismo.

El objetivo del análisis de la regresión lineal es analizar un modelo que pretende explicar el comportamiento de una variable (variable endógena, explicada o dependiente), que denotaremos por Y , utilizando la información proporcionada por los valores tomados por un conjunto de variables (explicativas, exógenas o independientes), que denotaremos por X_1, X_2, \dots, X_n

Las variables del modelo de regresión deben ser cuantitativas. Pero, dada la robustez¹ de la regresión, es frecuente encontrar incluidas en el modelo como variables independientes a variables ordinales e incluso nominales transformadas en variables ficticias. Pero la variable dependiente debe ser cuantitativa.

El modelo lineal viene dado por la ecuación lineal:

$$Y = b_0 X_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + \dots + b_k X_k + u$$

Ecuación 7-1. Tipología de modelo lineal

Los coeficientes (parámetros) b_1, b_2, \dots, b_k denotan la magnitud del efecto de las variables explicativas (exógenas o independientes), esto es, representan los pesos de la regresión o de la combinación lineal de

¹ Un estadístico se dice que es *robusto* cuando sigue siendo válido a pesar de que uno o más de sus supuestos no se cumplan.

las predictoras X_1, X_2, \dots, X_k sobre la variable explicada (endógena o dependiente) Y . El coeficiente b_0 se denomina término constante (o independiente) del modelo. Y al término u se le llama término de error del modelo o componente de Y no explicada por las variables predictoras.

Si disponemos de T observaciones para cada variable, el modelo se expresa así:

$$Y_t = b_0 + b_1 X_{1t} + b_2 X_{2t} + \dots + b_k X_{kt} + u_t \quad t = 1, 2, 3, \dots, T$$

Ecuación 7-1. Modo de expresión del modelo lineal para hacer referencia al tamaño de la muestra

El problema fundamental que se aborda es el siguiente: suponiendo que la relación entre la variable Y y el conjunto de variables X_1, X_2, \dots, X_k es como se ha descrito en el modelo, y que se dispone de un conjunto de T observaciones para cada una de las variables ¿cómo pueden asignarse valores numéricos a los parámetros $b_0, b_1, b_2, \dots, b_k$ basándonos en la información muestral?

Estos valores son la estimación de los parámetros llamados coeficientes de regresión. Representan las unidades de cambio en la variable dependiente por unidad de cambio en la variable independiente correspondiente. En el caso de que sólo haya una variable dependiente se llega a la ecuación de una recta donde b_0 es la ordenada en el origen y b_1 la pendiente de la recta. Una vez encontradas las estimaciones de los parámetros del modelo, podremos hacer predicciones sobre el comportamiento de la variable Y en la población.

El análisis de regresión sirve tanto para EXPLORAR datos como para CONFIRMAR teorías.

Comúnmente, se suele hablar del coeficiente de correlación R elevado al cuadrado, que se llama coeficiente de determinación y es una medida de la bondad del ajuste del modelo ya que da la proporción de variación de Y explicada por el modelo. Se suele emplear R^2 ajustado, que es una corrección de R^2 para ajustar mejor el modelo a la población objeto de estudio.

El modelo lineal se formula bajo los siguientes supuestos [40]:

- Tamaño adecuado de la muestra: se recomienda $n = 20 \cdot n^\circ$ de variables predictoras.
- Las variables X_1, X_2, \dots, X_k son deterministas (no son variables aleatorias) ya que sus valores vienen de la muestra tomada.
- Se supone que todas las variables X relevantes para la explicación de Y están incluidas en la definición del modelo lineal.
- Las variables X_1, X_2, \dots, X_k son linealmente independientes (no se puede poner a una de ellas como combinación lineal de las otras). Esta es la hipótesis de independencia y cuando no se cumple se dice que el modelo presenta multicolinealidad. O sea: ninguna v_i independiente da un $R^2 = 1$ con las otras variables independientes.
- Linealidad de las relaciones: la v_i independiente presenta relación lineal con cada una de las dependientes. Se comprueba con los gráficos de regresión parcial. Su incumplimiento se arregla mediante transformaciones de los datos
- Los residuos siguen una distribución Normal $N(0, \sigma^2)$, no están correlacionados con ninguna de las variables independientes, ni están autocorrelacionados. Hay homocedasticidad: la varianza del error es constante para los distintos valores de las variables independientes.

La variable u (término de error o residuo) es una variable aleatoria con media nula y matriz de covarianzas constante y diagonal. O sea para todo t , la variable u_t tiene una media igual a cero y una varianza no dependiente de t (hipótesis de homocedasticidad) y además $\text{Cov}(u_i, u_j) = 0$, para todo i distinto de j (hipótesis de no autocorrelación) y tampoco están correlacionados con las variables independientes

El primer objetivo es el de obtener estimaciones, es decir, valores numéricos de los coeficientes b_0, b_1, b_2

, ... b_k (coeficientes de regresión parcial) en función de la información muestral. Las estimaciones de los parámetros se suelen hacer por el método de los mínimos cuadrados, que consiste en minimizar la suma de los cuadrados de los residuos, también llamada suma residual.

Lo fundamental de la regresión consiste en encontrar una función lineal de las variables independientes que permita predecir la variable dependiente

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + \dots + b_k X_k + u$$

Una aproximación intuitivamente atrayente al problema es la siguiente: tratar de dar una descripción tan corta como sea posible de la muestra. Esto se puede ver como una nueva apelación al principio de Ockham: construir explicaciones de la realidad que hacen uso del mínimo número de entidades.

En esencia, seleccionar un modelo entraña adoptar un compromiso entre la bondad de ajuste y la complejidad, medida por el número de sus parámetros. Se sabe que un modelo lineal suficientemente parametrizado podía ajustar perfectamente la muestra, pero que ello no significa que sea idóneo: puede tener muy poca capacidad de generalización. Por el contrario, un modelo que incluya los parámetros suficientes dará un ajuste susceptible de mejora. Se trata por tanto de alcanzar un equilibrio entre los dos objetivos: un buen ajuste con los mínimos parámetros precisos.

Una solución consistiría en estimar los modelos con una muestra (muestra de ajuste) y evaluarlos examinando su comportamiento en la predicción de otra diferente (muestra de validación). Actuando así, se estaría a salvo de impresiones excesivamente optimistas: la suma de cuadrados de los residuos o R^2 que se calcularían para cada modelo reflejaría su capacidad de generalización: su comportamiento con otras observaciones distintas de las que han servido para estimarlo.

Lamentablemente, esto requiere dividir nuestra disponibilidad de observaciones en dos grupos: uno para estimar y otro para validar. El obtener un diagnóstico realista por este procedimiento requiere sacrificar en aras de la validación una preciosa fracción de muestra que habría permitido quizás estimar mejor.

La idea de la validación cruzada incorpora una mejora adicional al planteamiento anterior, ya que no se tiene que usar sólo una fracción de la muestra para validar, se puede dividir la muestra en dos o más partes y emplear todas ellas en la validación.

Una aproximación ingenua al problema consistiría en estudiar la reducción en un cierto criterio (SSE, C_p , R_p^2 ...) originada por la introducción de cada variable, y retener como regresores todas aquellas variables que dieran lugar a una reducción significativa. Desgraciadamente, esta estrategia no tiene en cuenta el hecho de que, a menos que las columnas de la matriz de diseño X sean ortogonales, la reducción en SSE originada por la inclusión de una variable depende de qué otras variables estén ya presente en la ecuación ajustada. Se impone, emplear procedimientos más sofisticados [184]:

- Procedimiento basado en Subconjuntos de variables

De acuerdo con el párrafo anterior, la adopción de una estrategia ingenua podría dificultar el hallazgo de un modelo adecuado. Una posible solución sería, dados p regresores, formar todo los posibles subconjuntos de regresores y efectuar todas las posibles regresiones, reteniendo aquella que, de acuerdo con el criterio de bondad de ajuste que hayamos adoptado, parezca mejor. El inconveniente es el gran volumen de cálculo que es preciso realizar. En la aplicación que ocupa no tiene cabida este procedimiento, por lo que no se detalla con más profundidad.

- Procedimiento de Regresión escalonada

Se trata de un procedimiento muy utilizado ("stepwise regression"), aunque no garantiza obtener la mejor ecuación de regresión, suministra modelos que habitualmente son óptimos o muy próximos al óptimo, con muy poco trabajo por parte del analista. Se describe el procedimientos hacia delante ("forward selection procedure"); aunque existe la regresión escalonada hacia atrás o mixta.

En síntesis se trata de introducir de introducir las variables de una en una, y de mayor a menor contribución en el SSE. Hacia atrás consiste en lo mismo pero quitando variables y evaluando su

contribución al SSE.

Este procedimiento, de cara a los modelos de caracterización que se tienen, no sería del todo válido salvo cuando se requiera la toma de decisiones, como podría ser el número de denominadores a tener en cuenta, es decir, el número de pasos de tiempo atrás a considerar. Muchos procedimientos estadísticos suponen que los datos siguen algún tipo de modelo matemático que se define mediante una ecuación, en la que se desconoce alguno de sus parámetros, siendo éstos calculados o estimados a partir de la información obtenida en un estudio bien diseñado para tal fin. Existen diferentes procedimientos para estimar los coeficientes de un modelo de regresión, o para estimar los parámetros de una distribución de probabilidad. De entre esos procedimientos, probablemente el más versátil, ya que se puede aplicar en gran cantidad de situaciones y por ello uno de los más empleados, se conoce con el nombre de "método de máxima verosimilitud" (en inglés "method of maximum likelihood").

Aunque para aquellos que tienen una formación estadística este método es perfectamente conocido y comprendido, sin embargo muchos de los usuarios de los programas estadísticos, que están habituados a calcular modelos de regresión logística, o modelos de supervivencia de riesgo proporcional o de Cox, modelos de Poisson, y muchos otros, desconocen cómo se efectúa la estimación de los coeficientes de esos modelos, por lo que nos parece adecuado dedicar una de éstas páginas mensuales a describir su filosofía e interpretación. Por otro lado, no es infrecuente que empleemos técnicas de forma habitual y mecánica, sin conocer en qué se sustentan y en última instancia en qué consisten realmente: no me cabe ninguna duda que casi todo el mundo tiene claro qué es una distribución de probabilidad normal, pero ¿cuánta gente que utiliza la t de Student sabe qué es realmente eso?

Podemos considerar que el método de máxima verosimilitud, abreviado a menudo como MLE, tal y como hoy lo conocemos e interpretamos fue propuesto por Fisher (1890-1962), aunque ya de una forma mucho más artificiosa fue inicialmente atisbado por Bernoulli (1700-1782), cuyo planteamiento fue revisado y modificado por su coetáneo y amigo el gran matemático Euler (1707-1783). Sin embargo, la resolución de los problemas numéricos planteados por este método, en la mayor parte de los casos son de tal magnitud que no ha sido posible su amplia utilización hasta la llegada de los modernos ordenadores.

La función de verosimilitud permite comparar modelos [183], [185], por ejemplo dos modelos en el que en uno de ellos se incluye una variable adicional con respecto al primer modelo. Las diferencias en la función de verosimilitud se alteran arbitrariamente con la escala de medida, por lo que la forma adecuada de compararlas es mediante cocientes. De ahí que cuando se comparan modelos que han sido estimados mediante este procedimiento se hable de cociente de verosimilitud (likelihood ratio).

Cuando se trata de la estimación de modelos resulta de utilidad el concepto de modelo saturado. Un modelo se denomina saturado cuando utiliza tantos parámetros como observaciones hemos efectuado y, por tanto se ajusta perfectamente a los datos. Podemos comparar el modelo actualmente estimado con ese modelo teórico perfecto mediante la expresión:

$$D = -2 \cdot \text{Ln} \frac{\text{Verosimilitud } \theta \text{ del modelo actual}}{\text{Verosimilitud } \theta \text{ del modelo saturado o de referencia}}$$

Ecuación 7-2. Cálculo del índice de verosimilitud alcanzado por el modelo

D es una cantidad que denomina desviación (deviance en inglés). La desviación permite comparar modelos, se le denomina contraste de verosimilitud. Cuanto menor sea el valor de la desviación del modelo con respecto al referente, mejor es la aproximación obtenida con menor número de parámetros en el mismo. A su vez el parámetro de verosimilitud del modelo se calcula aplicando algunos de los métodos definidos en el apéndice A.

Es importante destacar que verosimilitud mentalmente, hace pensar en los parámetros de máxima verosimilitud empleados como técnica de minimización, pero verosimilitud es una característica que a lo largo de la tesis se va a cuantificar como variable de juicio de la calidad esbozada por el modelo y la identificación realizada.

7.1.2. Teoría del error

En un procedimiento experimental que proporciona el valor de una magnitud X , el resultado no coincide exactamente con el valor real de dicha magnitud. La diferencia entre el valor real y el valor medido se llama error de la medida:

$$\zeta = X_{med} - X_{real}$$

Ecuación 7-3. Definición de error

El error es siempre desconocido, pero, según el caso, puede estimarse una cota superior para su valor absoluto. Esta cota se denomina incertidumbre de la medida y se denota por ΔX .

Se destaca el trabajo de A. Rabl [78] por su visión tan real del panorama que liga a la identificación con los errores admisibles. En síntesis, A. Rabl, recalca que se deben de aceptar, en edificios ocupados, errores en la identificación del 20% en el valor del coeficiente global de transmisión de la epidermis, 50% en el área solar, y 50% en la constante de tiempo dominante del sistema.

Existen diversas tipologías de incertidumbres:

- Incertidumbres acotadas de forma certera.
- Incertidumbres acotadas sometidas a un nivel de confianza.

Caso 1: Incertidumbres acotadas de forma certera

En este primer caso, de la definición de error y de incertidumbre se deduce que el valor real de la medida se encuentra en el intervalo con toda seguridad:

$$X_{real} \in [X_{med} - \Delta X, X_{med} + \Delta X]$$

Ecuación 7-4.. Expresión normalizada de una magnitud medida

Lo que se puede representar gráficamente del siguiente modo:

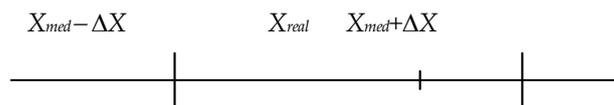


Figura 7-1. Concepto de incertidumbre

Por ello, el resultado de una medida se escribe siempre en la forma:

$$X = X_{med} \pm \Delta X$$

Ecuación 7-5. Expresión normalizada de una magnitud medida

Este corresponde con el caso en el que tan solo se lleva a cabo una única medición y por lo tanto el error debe ser asociado a la precisión del elemento de medida.

Aunque en general, no se trata de una práctica conveniente, a veces cobra sentido este modo de actuar como puede ser el caso en el que se mida el radio de un eje con un pie de rey o la longitud de una línea con una recta.

Como regla general, se puede afirmar que esta práctica es lícita cuando se puede asegurar de antemano que el error asociado a la precisión del elemento de medida es mucho mayor que el posible error asociado a otras causas que quedan recogidas con el uso de la incertidumbre típica definida en [186].

Caso 2: Incertidumbres sometidas a niveles de confianza

Este caso recoge la situación en la que, por naturaleza de la variable medida o por el tratamiento que se

le ha realizado, no es posible asegurar con toda seguridad una cota para la incertidumbre.

En este caso, la definición del error conlleva a afirmar que con un grado de confianza P_0 , la variable real se encuentra en un entorno de radio ΔX y centrado en X_{med} .

Esto conlleva al uso del concepto intervalo de confianza, que permite definir la incertidumbre matemáticamente como una variable ΔX que verifica:

$$P(X_{real} \in [X_{med} - \Delta X, X_{med} + \Delta X]) = P_0$$

Ecuación 7-6. Cálculo de la probabilidad asociada a una cierta incertidumbre en la medida

Donde P_0 representa el nivel de confianza asociado a la variable ΔX . En otras palabras, la probabilidad de que $X = X_{med} \pm \Delta X$ sea cierto es P_0 .

Cuando se tratan magnitudes de esta naturaleza, a veces resulta útil la definición de una incertidumbre típica que se identifica con la desviación típica del valor medio, estimado a partir de la muestra que se analiza. Las siguientes definiciones y conclusiones son tomadas del trabajo de investigación de la Universidad Tecnológica de Sidney [187] y sobre todo de la norma UNE que rige el cálculo de la incertidumbre en la medida [163].

Incertidumbre típica

Se define como el valor de ΔX que corresponde con la desviación típica de la media de los valores calculados. De este modo, el valor de la incertidumbre típica de una medición se calcula, salvo indicación en contra, asumiendo que las mediciones se distribuyen siguiendo una distribución normal y por lo tanto la expresión matemática que define su valor es:

$$\Delta X = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

Ecuación 7-7. Fórmula para el cálculo de la incertidumbre típica

Dónde:

σ : se entiende como la desviación típica de los valores obtenidos en las diferentes mediciones realizadas para obtener el valor de la medida que se pretende realizar².

n : representa el número de mediciones realizada.

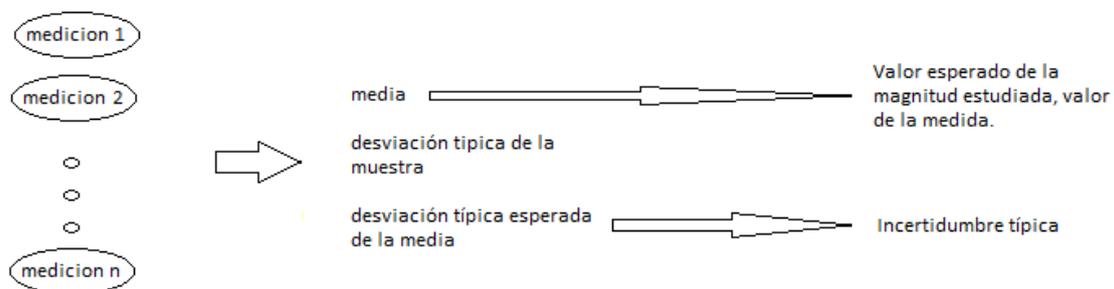


Figura 7-1. Integración del cálculo de incertidumbre en el proceso de medición

Haciendo uso de la distribución normal y admitiendo que se consigue la incertidumbre típica de una variable cuando P_0 sea 0.7, posibilita la especificación de la medida de una forma análoga al modo de

² Es importante destacar que una medición es completamente diferente de una medida. Se entiende que una medición es el hecho de tomar el dispositivo de medida y registrar el valor que indica mientras que medir involucra un tratamiento de todos esos valores.

expresarla del caso 1.

$$X = X_{med} \pm \Delta X$$

Ecuación 7-8. Expresión normalizada de una magnitud medida

Como se apunta en la introducción, existen dos posibles casos que deben ser tratados de forma independiente:

Caso 1: caso en que la fuente de error predominante es la resolución del elemento de medida.

Caso 2: existen otras causas que prevalecen sobre la incertidumbre asociada a la resolución del equipo de medida.

Equipos de medida

En este apartado se detalla como registrar el valor de una medida cuando el factor limitante está asociado a la escala del medidor.

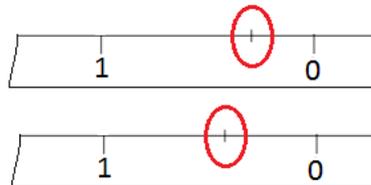


Figura 7-2. Ejemplo en el que la resolución es el factor limitante. Ambas medidas son iguales de precisas.

Tal y como se muestra en la figura, se realizan varias mediciones y se obtienen lecturas diferentes pero no se puede decir más que el valor está entre 0 y 1. En este caso, está justificada la realización de una sola medición y por lo tanto, el valor indicado por el equipo de medición. Esto hace que de nuevo se requiera una nueva subdivisión:

- Equipos analógicos

En el caso de realizarse la medición con un equipo analógico, se toma como valor el que se crea conveniente dentro del intervalo que se observa. En el caso de la figura, como la lectura cae entre 0 y 1, se asume como valor leído, 0.5 y el error asociado se entiende como la mitad de la precisión, +/- 0.5.

- Equipos digitales

En este caso, la lectura corresponde al valor mostrado en pantalla y por lo tanto el valor de la medida se tomará tal y como se muestra en el dispositivo. Así mismo, el error asociado se entiende como la totalidad de la precisión del elemento.

Caso 2: La resolución del medidor no es factor limitante

En este caso existen efectos externos no controlados que influyen en la medida mucho más que el propio medidor.

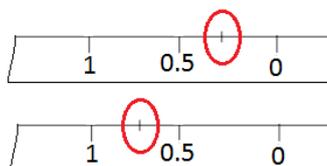


Figura 7-3. Ejemplo en el que la resolución NO es el factor limitante

Este podría ser el caso en el que se intentase medir presión en una región muy turbulenta. Cuando la precisión del medidor es muy alta y las condiciones del medio son relativamente variables, se pueden realizar diferentes medidas y obtener valores diferentes. En este caso, se debe llevar a cabo un tratamiento estadístico para determinar el valor de la medida.

Cada medición realizada será una medida independiente con su valor y su error. En el caso superior, la lectura sería 0.25 con un error de 0.25, de tal forma que la medida sería 0.25 ± 0.25 . De igual modo, en el segundo caso, se tendría una nueva lectura, 0.75 ± 0.25 .

Así, después de realizar una serie de mediciones, se entenderá que el valor esperado de la media es la media de los valores anotados: en este caso, $(0.25 + 0.75)/2 = 0.5$

Para la determinación de la incertidumbre asociada, al igual que para determinar el valor esperado, se debe realizar un desarrollo estadístico que se expone en la siguiente sección.

7.1.3. Determinación de la incertidumbre

En este apartado se muestra como determinar la incertidumbre asociada a una medida. Ya en la sección anterior se ha comentado como cuando, si se realiza una sola medida o si el equipo de medida es la principal fuente de error, la incertidumbre asociada es la mitad de la precisión para equipos analógicos y la precisión completa para equipos digitales. Por lo tanto, este apartado, se centra en el estudio del caso 2 en el que el medidor no es el factor limitante.

Cuando esto ocurre, se debe realizar un estudio estadístico y se toma la incertidumbre típica como indicador de la bondad del valor medio calculado en 0. Tal y como se define en la introducción, dicha incertidumbre se expresa como:

$$\Delta X = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

Ecuación 7-9. Incertidumbre típica

Dónde:

σ : se entiende como la desviación típica de los valores obtenidos en las diferentes mediciones realizadas para obtener el valor de la medida que se pretende realizar³.

n: representa el número de mediciones realizada

Aunque en la mayoría de las ocasiones, llegados a este punto, todo queda completamente cerrado puesto que la medida ha quedado completamente caracterizada a través de su valor esperado y su incertidumbre típica, existen ocasiones en las que se realizan mediciones para utilizarlas para obtener un valor que debe ser calculado a partir de una expresión matemática. Este puede ser el caso en el que se pretende calcular el área de un círculo tras medir su radio.

Para ello se plantean dos métodos fundamentales:

- A través de un desarrollo en serie de Taylor [187].
- A través del método de la propagación de la varianza [163], [186]

7.1.3.1. Desarrollo en serie de Taylor

Este método propone identificar las variables de afectadas por algún error y decir que:

³ Es importante destacar que una medición es completamente diferente de una medida. Se entiende que una medición es el hecho de tomar el dispositivo de medida y registrar el valor que indica mientras que medir involucra un tratamiento de todos esos valores.

$$Err(f(x, y)) = \left| \frac{\partial f}{\partial x} \right| \cdot \sigma(x) + \left| \frac{\partial f}{\partial y} \right| \cdot \sigma(y)$$

Ecuación 7-10. Cálculo de incertidumbre por Taylor

Donde:

$\sigma(x)$: es la incertidumbre típica asociada a la variable x.

$\sigma(y)$: es la incertidumbre típica asociada a la variable y.

Este método tiene la ventaja de ser sencillo de aplicar pero sobrestima los errores asociados a la variable de salida f(x,y)

7.1.3.2. Método de propagación de la varianza

Este método se basa en un desarrollo estadístico que explica cómo se propagan las varianzas de las variables de entrada por la expresión matemática en la que se introducen.

Dependiendo de la naturaleza de las variables empleadas, existen dos versiones:

- Aplicación para variables correlacionadas.
- Aplicación para variables no correlacionadas.

Se entiende que dos variables están correlacionadas cuando un cambio en una de ellas, induce un cambio en la otra. De forma análoga, dos variables son no correlacionadas cuando los cambios de valor de ambas variables son completamente independientes.

Ejemplo:

$u(x)$ e $v(x)$ están correlacionadas siendo x la variable de correlación, porque una variación en u, implica forzosamente un cambio en x y por lo tanto, un cambio en v.

- Aplicación para variables correlacionadas

Cuando las variables están correlacionadas, la expresión que se debe utilizar para determinar la incertidumbre típica asociada al resultado es:

$$\Delta X^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \sigma_{x_i}^2 + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} \sigma_{x_i x_j}$$

Ecuación 7-11. Cálculo de la varianza según norma UNE [46] para variables correlacionadas

Donde:

$\sigma(x_i)$: es la desviación típica asociada a la variable xi.

$\sigma(x_i x_j)$: es la covarianza asociada a las variables xi y xj.

Calculándose dicha covarianza como:

$$Cov(x_i, x_j) = \frac{\partial F}{\partial v} \times \frac{\partial G}{\partial v} \times \sigma_v^2$$

Ecuación 7-12. Fórmula para el cálculo de la covarianza de una variable

Siendo v, la variable de correlación y $\sigma(v)$ la desviación típica asociada a esa variable.

- Aplicación para variables NO correlacionadas

Este caso, es una particularidad del anterior y propone que la incertidumbre típica se calcule como:

$$\Delta X^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \sigma_{x_i}^2$$

Ecuación 7-13. Cálculo de la varianza según norma UNE [46] para variables no correlacionadas

Siendo:

$\sigma(x_i)$: es la desviación típica asociada a la variable x_i .

Esta expresión surge tras decir que la covarianza entre diferentes variables x_i es nula.

Supóngase dos variables x_i y x_j como F y G.

Téngase en cuenta la expresión de la covarianza:

$$Cov(x_i, x_j) = \frac{\partial F}{\partial v} \times \frac{\partial G}{\partial v} \times \sigma_v^2$$

Si no tiene una variable común, alguna de las dos derivadas parciales es nula y por lo tanto la expresión de la incertidumbre global

$$\Delta X^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \sigma_{x_i}^2 + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} \sigma_{x_i x_j}$$

queda reducida a

$$\Delta X^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \sigma_{x_i}^2$$

Obsérvese como el método de Taylor sobrestima los errores:

La fórmula del error compuesto descrita por la regla de la cadena responde a la siguiente expresión:

$$Err^2 = \left(\sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial f}{\partial x_i} \right| \sigma_{x_i} \right)^2$$

Comparándola con la expresión que propone la norma [163], ecuación que se muestra a continuación:

$$Err^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \sigma_{x_i}^2$$

es trivial ver que:

$$\left(\sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial f}{\partial x_i} \right| \sigma_{x_i} \right)^2 > \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \sigma_{x_i}^2$$

puesto que

$$(a + b)^2 \geq a^2 + b^2$$

7.1.4. Presentación de resultados

Tras el análisis realizado, se puede concluir que cualquier medida siempre viene caracterizada por dos elementos: su valor esperado y su incertidumbre que según el caso representará a la incertidumbre típica o a la incertidumbre como cota superior del error cometido.

En caso de tratarse de la incertidumbre típica, siempre se puede hacer uso de las propiedades de la distribución normal para ampliar el intervalo de confianza de la cota del error dada por $X \pm \Delta X$.

Para ello, se remite al lector a [163] donde puede ampliar la información que aquí se aporta pero se cree conveniente apuntar que simplemente multiplicando este valor por 2, se obtiene un intervalo de

confianza de 90% y multiplicándolo por 3 del 99%.

7.2. OTRAS APLICACIONES MCS

7.2.1. Aplicación 1: ejemplo teórico obtención mcs

En las siguientes líneas se expone la aplicación de la metodología comentada a lo largo de este documento para una local con una sola cara expuesta al exterior, lo que puede coincidir con la tipología de la mayoría de los despachos de la ETSI de Sevilla y con el recinto en KUBIK TECNALIA. Se ha decidido extraer los datos de un programa de simulación horaria, con la premisa de que existe una riqueza tanto climática como de la respuesta ante esa excitación por parte del sistema, con el objeto de demostrar su aplicabilidad.

7.2.1.1. Caso 1: elemento epidermis

El local tiene forma de cubo con un lado de 3.2m, tiene una orientación sur para su cara expuesta, el resto es totalmente adiabático. Esta cara expuesta tiene un bloque cerámico de 29 cm de espesor y 0.421 W/Km^2 . Por tener controlada la simulación, se eliminan los efectos radiantes, anulando incluso la excitación exterior, y se fijan los coeficientes convectivos a 20 y 5 W/K m^2 exterior e interior respectivamente ($U=1.065 \text{ W/K m}^2$).

7.2.1.1.1. Caso1: modelo detallado

Para la identificación del modelo en esta base de tiempo, el sistema es excitado con temperatura exterior con los datos del archivo meteorológico que usan los programas de certificación energética.

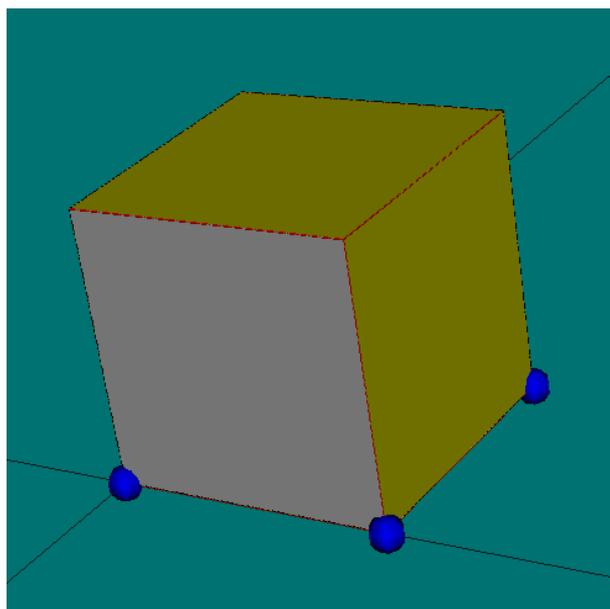


Figura 7-4. Esquema del espacio considerado para el caso 1: en color claro el elemento exterior y en colores oliva las paredes adiabáticas.

En este caso se parte de una posición aventajada con respecto a lo que aparecería cuando se miden edificios existentes reales, ya que se hasta el coeficiente de transmisión del muro. Se puede comprobar que bajo una excitación escalón, la respuesta del muro en régimen permanente debe ser $U_A \cdot (T_{EXT} - T_{INT})$. Para ello se excita en temperatura exterior con una diferencia de temperatura de 30°C con respecto al interior, lo que ofrece una carga por transmisión como la representada en la figura.

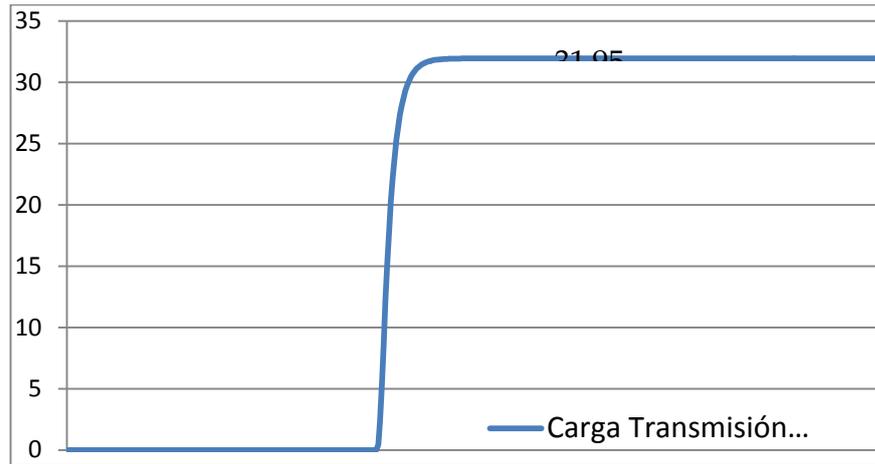


Figura 7-5. Respuesta del sistema frente a una excitación escalón de 30°C en temperatura exterior

Si se analiza el término del permanente, y asumiendo un área expuesta de 3.2x3.2 m² resulta un coeficiente global de transferencia de 1.065 W/Km². Otro dato importante es que el sistema alcanza el permanente 50 h después de comenzar la excitación.

Conocidos los parámetros estáticos del sistema en régimen permanente, se requiere ahora la estimación de las constantes de tiempo principales del mismo. Para ello se excitará el sistema con una temperatura exterior en forma de triángulo de 50°C de altura.

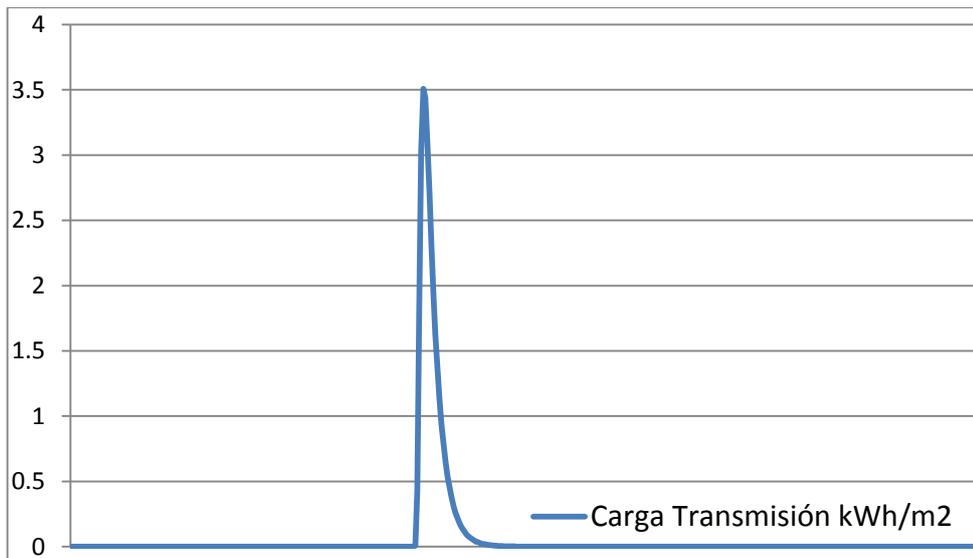


Figura 7-6. Respuesta del sistema frente a una excitación triángulo de 50°C

Con esta respuesta se hace uso de la herramienta “Análisis de funciones de transferencia” para calcular las razones comunes y las constantes de tiempo del sistema resultando para un paso de tiempo de 1hora:

τ_1	5.384
τ_2	1.307
τ_3	0.468

Tabla 7-1. Valores de las constantes de tiempo

7.2.1.1.2. Caso 1: denominadores

Estas constantes de tiempo permiten el cálculo de los denominadores, que en el modelo son los coeficientes que crean la dependencia de la variable output con respecto a su valor en instantes

de tiempo pasados.

Los coeficientes d_j se han denotado como denominadores y quedándose solo con los dos primeros a partir de las dos primeras constantes de tiempo, se tiene que:

d_1	-1.296
d_2	0.386

Tabla 7-2. Denominadores asociados a las dos constantes de tiempo significativas

7.2.1.1.3. Caso 1: numeradores

Se simula el sistema con una temperatura interior constante, y se excita en temperatura exterior con la que queda reconocida en el archivo climático de LIDER. Se elige el mes de febrero como mes de estudio (elección a libertad). Y con estos datos se arranca el proceso de identificación.

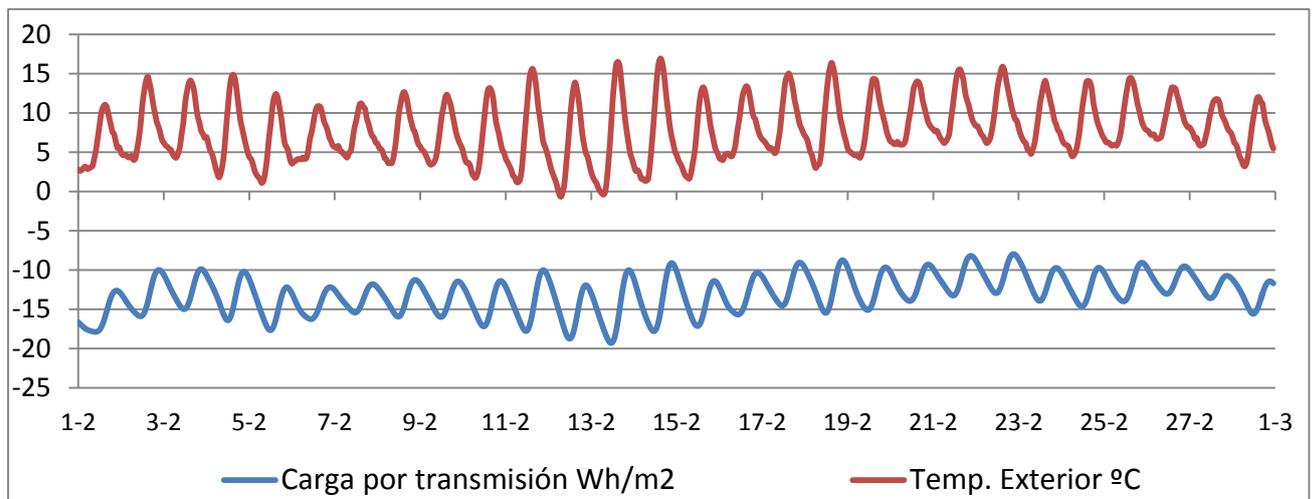


Figura 7-7. Respuesta del sistema frente a una temperatura exterior °C tipo

Para este caso la hoja polos proporciona que el sistema quedaría caracterizado con cierta calidad usando los siguientes numeradores:

	Numeradores
a_0	1.663E+01
a_1	-4.694E+00
a_2	-2.387E+00
a_3	-2.396E+00
a_4	-2.388E+00
a_5	-2.364E+00
a_6	-2.350E+00
a_7	0.000E+00

Tabla 7-3. Numeradores analíticos para la respuesta anterior

Usando una herramienta de optimización para la respuesta del sistema ante la excitación comentada, se obtienen los siguientes valores:

	2 Num	3 Num	4 Num
a_0	-0.1023	0.0232	0.0059

a_1	0.1977	-0.0689	0.0082
a_2	0.0000	0.1420	0.0318
a_3	0.0000	0.0000	0.0506
R^2	0.9961	0.9996	0.9999
$RP=U$	1.0517	1.0623	1.0647

Tabla 7-4. Resultados en bruto de la optimización

Según el criterio de signos elegido, el flujo es negativo cuando es saliente del espacio y positivo cuando es entrante, lo que se traduce en que a_0 debe ser positivo, y a_1 será negativo en la mayoría de los casos (alternancia de signos) o positivo siempre y cuando el modelo solo requiera dos numeradores para recortar la serie infinita con una cierta calidad.

De acuerdo a esta restricción, se descarta la correlación de 2 numeradores, puesto que se le ha dejado a la herramienta de optimización la libertad de encontrar el mejor ajuste sin restricciones, y en igualdad de condiciones el caso de 3 numeradores satisface esa restricción deseada. En el caso de 4 numeradores, se esperaba que el segundo numerador tuviera signo negativo a la vista del caso de 3 numeradores, por lo que queda en estado condicional puesto que se cumple el signo principal de a_0 .

Graficando los resultados anteriores para el caso de 3 numeradores:

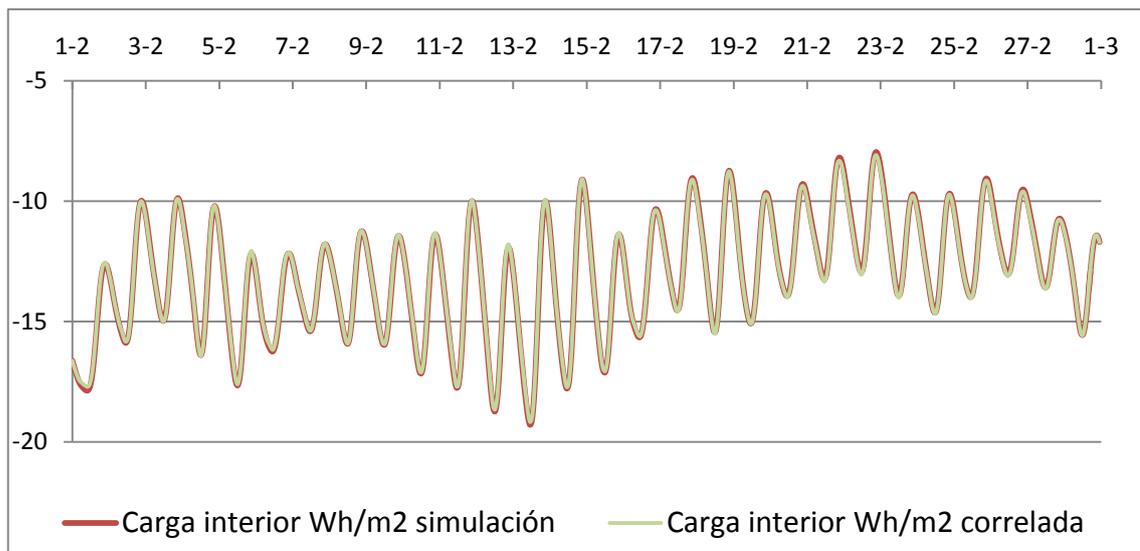


Figura 7-8. Valor de carga interior simulada vs carga interior correlacionada para Febrero (3 numeradores)

Puesto que se tienen los datos analíticos del problema se puede comprobar que (el primer denominador es igual a la unidad puesto que se refiere al paso de tiempo actual):

$$RP = \frac{\sum_{j=0}^2 a_j}{1 + \sum_{j=1}^2 d_j} = 1.061 \text{ Wh/m}^2\text{K}$$

Este valor, considerando que la simulación mantiene constante lo que sucede en una hora, nos permite pasar a potencia y hablar de 1.061 W/m²K. El error que se comete es inferior al 0.5%.

Este error es debido principalmente al hecho de reducir una serie infinita a tres numeradores y dos denominadores. Si se añaden numeradores la aproximación al valor analítico sería más alta, y esto queda justificado puesto que al analizar con la hoja “polos” de la herramienta “Análisis de funciones de transferencia”, se observa que hasta el cuarto numerador no aparece la repetición de signos en los coeficientes, y el cambio de orden de magnitud. Por este motivo, se procede a la repetición del método para cuatro numeradores, resultando:

$$RP = \frac{\sum_{j=0}^2 a_j}{1 + \sum_{j=1}^2 d_j} = 1.065 \text{ Wh/m}^2\text{K} (1.0647) \text{ (error inferior al 0.03 \%)}$$

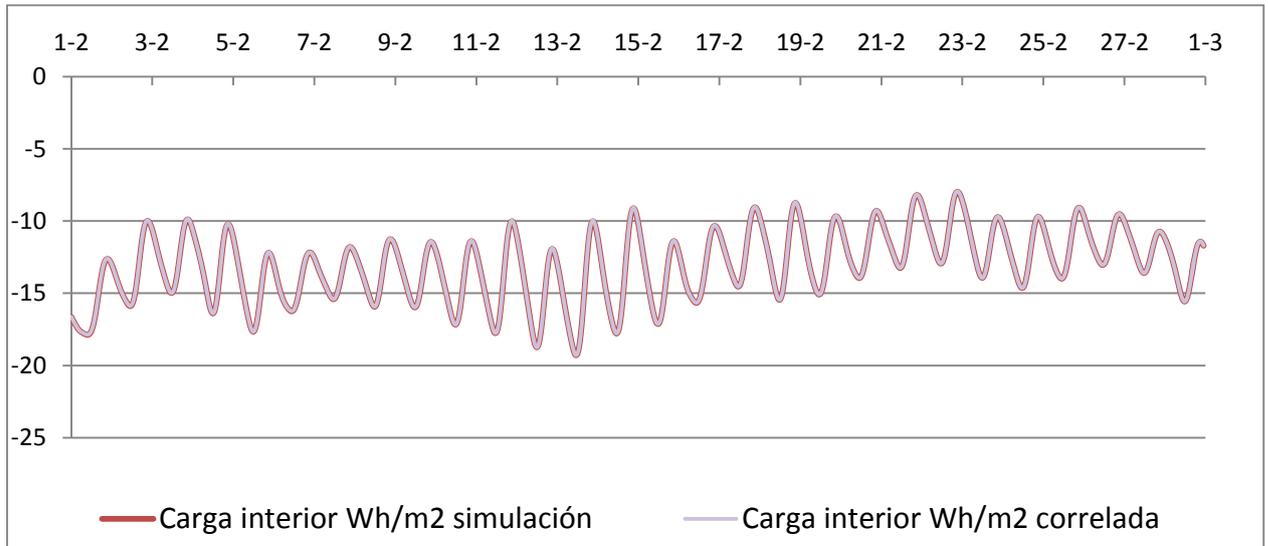


Figura 7-9. Valor de carga interior simulada vs carga interior correlacionada para Febrero (4 numeradores)

Aunque el ajuste tenga mayor precisión que el anterior en cuanto al régimen permanente, los valores de los coeficientes no se ajustan a la restricción estipulada del criterio de signos, por lo que el paso de 3 a 4 numeradores se va a descartar. Este salto si es admisible usando la herramienta de Matlab, con la que se ha hecho pero no se muestran los resultados por considerarse repetitivos, pero hay que mencionar que al restringir la búsqueda el óptimo con 4 numeradores tiene pero calidad de ajuste que el de 3 numeradores presentado.

Para este el caso de 3 numeradores, la representación de la correlación sobre la recta de 45°, teniendo en ordenadas el valor de la carga obtenida mediante simulación (medido) y en abscisas el valor correlado, es la siguiente:

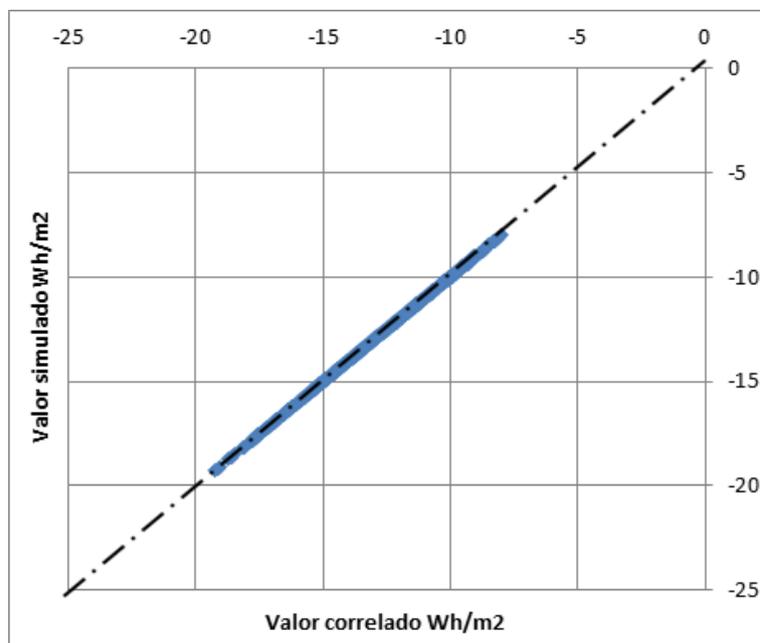


Figura 7-10. Resultados para la correlación de Febrero con 3 numeradores

Hay que destacar que debido a la bondad del ajuste que se ha obtenido con la base de tiempo de una hora no se ha realizado la optimización de acuerdo a esa variable, pero en el caso de que esta base de tiempo hubiera sido inferior a una hora del orden de minutos, si se hubiera requerido ir variando esta base de

tiempo hasta encontrar una base aceptada de acuerdo a las características del sistema y al uso posterior del modelo. También, cualquier base de tiempo superior a una hora proporcionaría un ajuste de una calidad igual o superior al realizado para esta.

7.2.1.1.4. Caso 1: comprobación

Para la comprobación de la validez de esta correlación, se introduce la temperatura exterior de Marzo y se compara el resultado de la correlación con el de la simulación. Esta etapa se repite para Julio, considerándola una etapa climática totalmente diferente a la de Febrero.

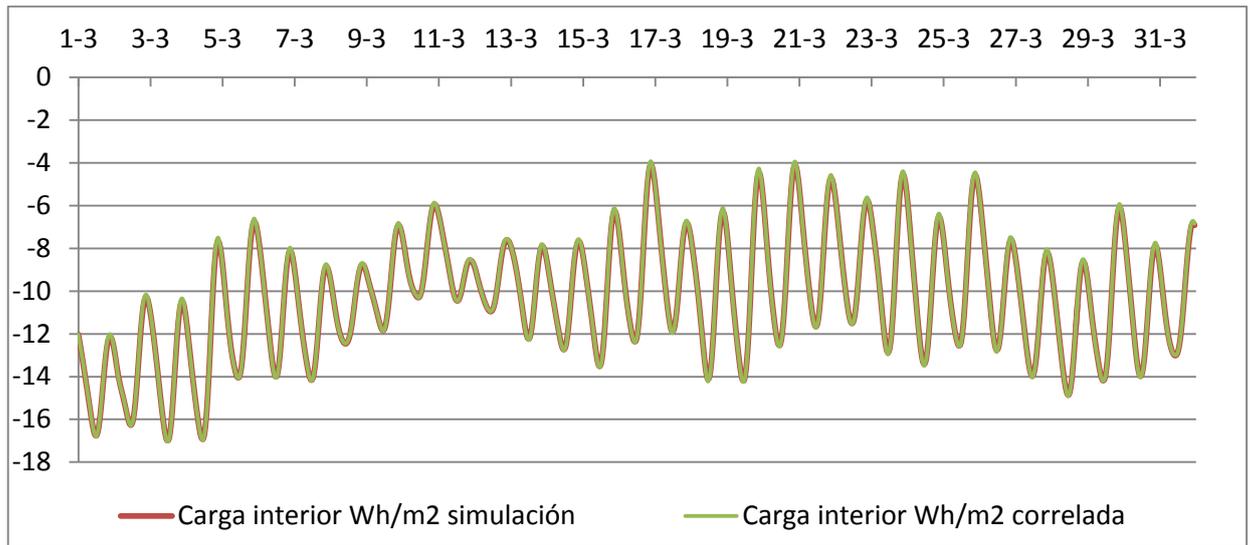


Figura 7-11. Valor de carga interior simulada vs carga interior correlacionada para Marzo (predicha) con la correlación de Febrero (3 numeradores)

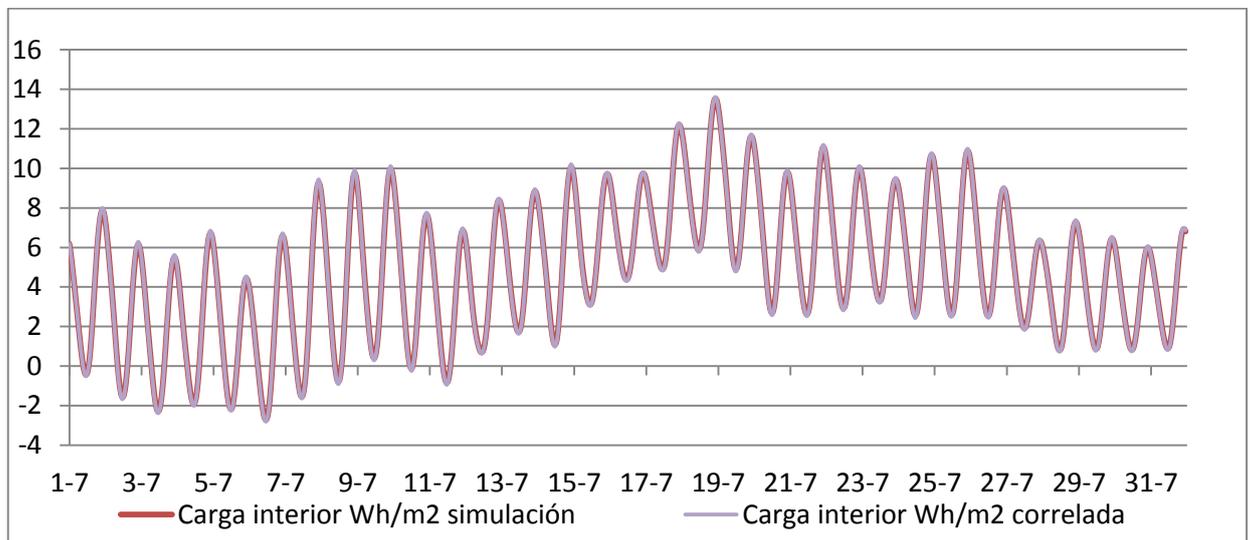


Figura 7-12. Valor de carga interior simulada vs carga interior correlacionada para Julio (predicha) con la correlación de Febrero (3 numeradores)

Estos últimos resultados muestran la validez y robustez de la metodología incluso en base horaria. El siguiente paso es añadir el resto de excitaciones siempre y cuando estas queden medidas con la calidad que cierta calidad.

7.2.1.2. Caso 2: integración de un hueco vidriado

Para este caso el sistema ha sido modificado, por lo que se procede al cálculo de los parámetros

estáticos y dinámicos asociados al nuevo sistema. La ventana que se incorpora a la fachada es de 1.2 m² situada en el centro de la cara.

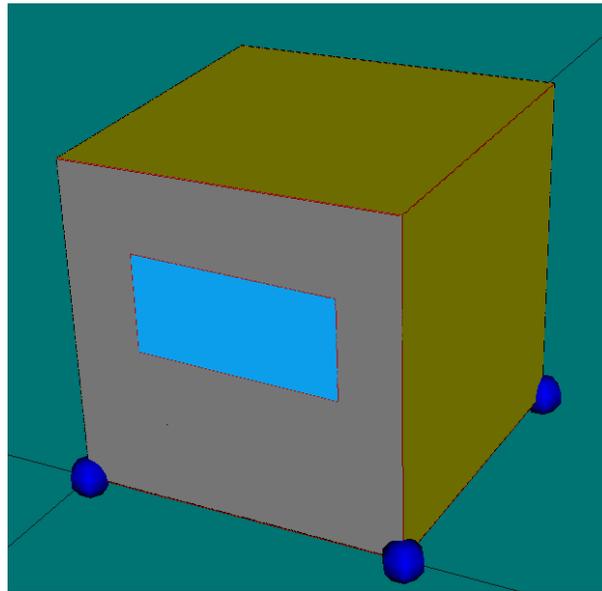


Figura 7-13. Esquema del espacio considerado para el caso 1: en color claro el elemento exterior con su hueco y en colores oliva las paredes adiabáticas.

7.2.1.2.1. Caso 2: modelo analítico

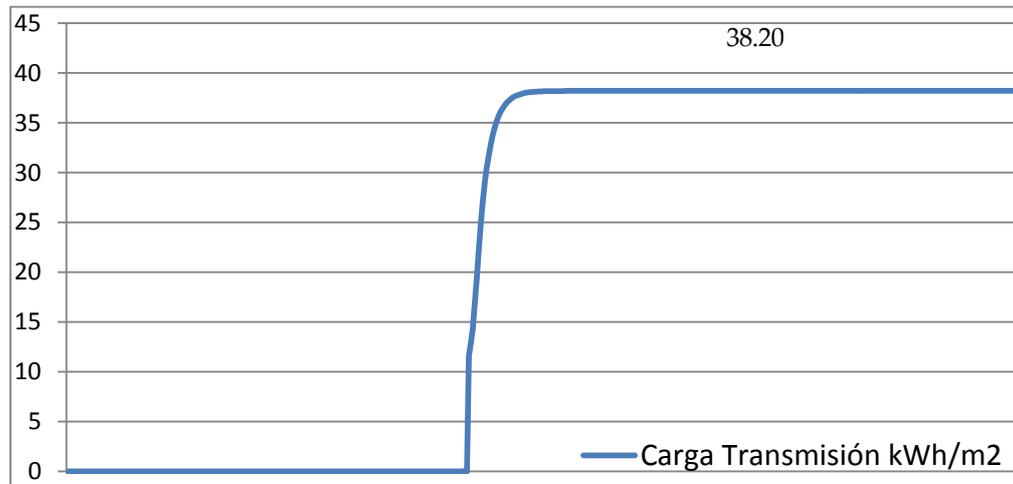


Figura 7-14. Respuesta del sistema frente a una excitación escalón de 30°C en temperatura exterior

Teniendo en cuenta los datos de la fachada, se tiene un coeficiente global de transferencia de 1.273 W/Km², en el que se incluye el efecto de los puentes térmicos del marco de la ventana.

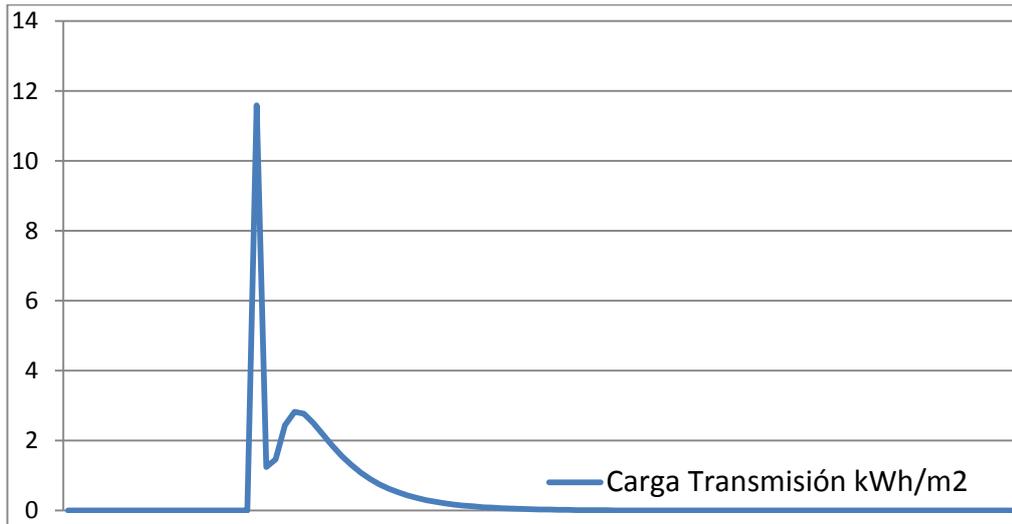


Figura 7-15. Respuesta del sistema frente a una excitación triángulo de 50°C

Las constantes de tiempo asociadas al nuevo sistema resultan:

τ_1	5.385
τ_2	1.271
τ_3	0.747

Tabla 7-5. Nuevas constantes de tiempo tras la incorporación del hueco vidriado

Se puede ver como ahora aparece otro pico en la respuesta debido al hueco.

La tercera constante de tiempo ahora tiene más peso que en el caso anterior, debido a que el sistema es menos capacitivo al incorporarle el hueco vidriado.

Para este caso la hoja polos proporciona que el sistema quedaría caracterizado con cierta calidad usando los siguientes numeradores:

	Numeradores
a_0	1.294E+00
a_1	-1.701E-01
a_2	-5.661E-01
a_3	-5.059E-01
a_4	0.000E+00

Tabla 7-6 Numeradores analíticos para la respuesta anterior

7.2.1.2.2. Caso 2: denominadores

Los denominadores asociados a las dos primeras constantes de tiempo son:

d_1	-1.286
d_2	0.378

Tabla 7. Nuevos denominadores tras la adición del hueco vidriado

7.2.1.2.3. Caso 2: numeradores

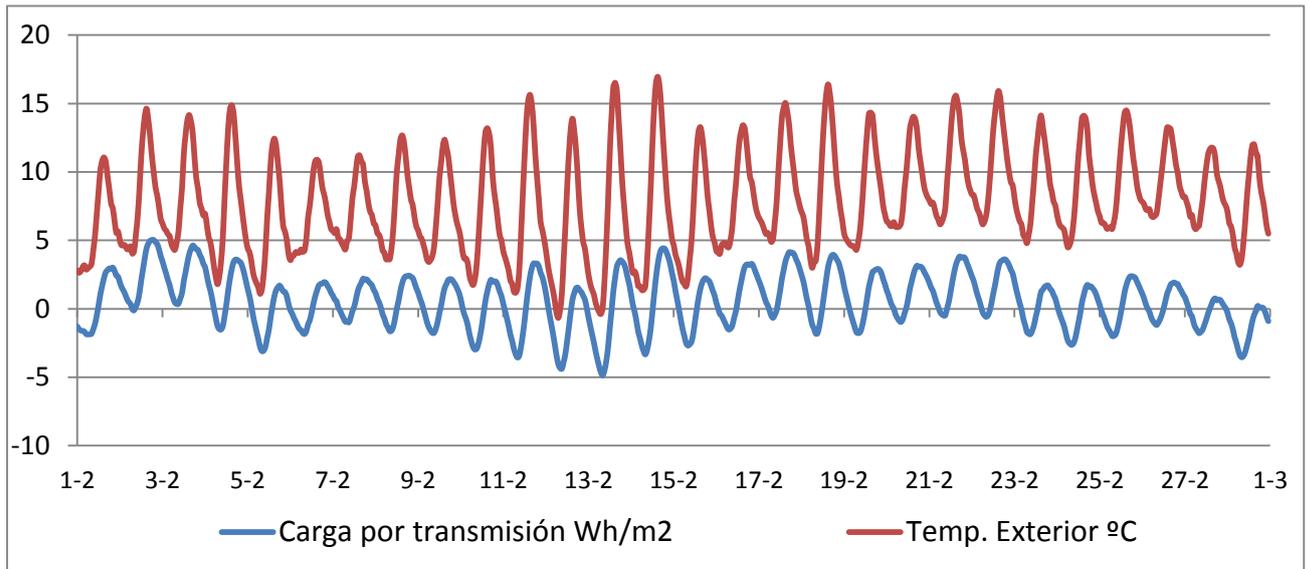


Figura 7-16. Respuesta del sistema frente a una temperatura exterior °C tipo

Llevando a cabo un proceso de optimización, resultan los siguientes numeradores:

	2 Num	3 Num	4 Num
<i>a0</i>	0.1530	0.3628	0.3620
<i>a1</i>	-0.0735	-0.4914	-0.4547
<i>a2</i>	0.0000	0.2271	0.1560
<i>a3</i>	0.0000	0.0000	0.0383
<i>R2</i>	0.9166	0.9974	0.9997
<i>RP</i>	0.8607	1.0669	1.1010

Tabla 7-8. Resultados en bruto de la optimización

Para este caso el criterio de signos se cumple para los 3 escenarios. Por este motivo la variable de decisión, viendo que entre 3 y 4 numeradores el ajuste presenta una calidad buena, es el cumplimiento del régimen permanente. En ese caso la elección es de 4 numeradores para aproximarse al valor de 1.274.

$$RP = \frac{\sum_{j=0}^2 a_j}{1 + \sum_{j=1}^2 d_j} = 1.11 \text{ Wh/m}^2\text{K} \text{ (error inferior al 12 \%)}$$

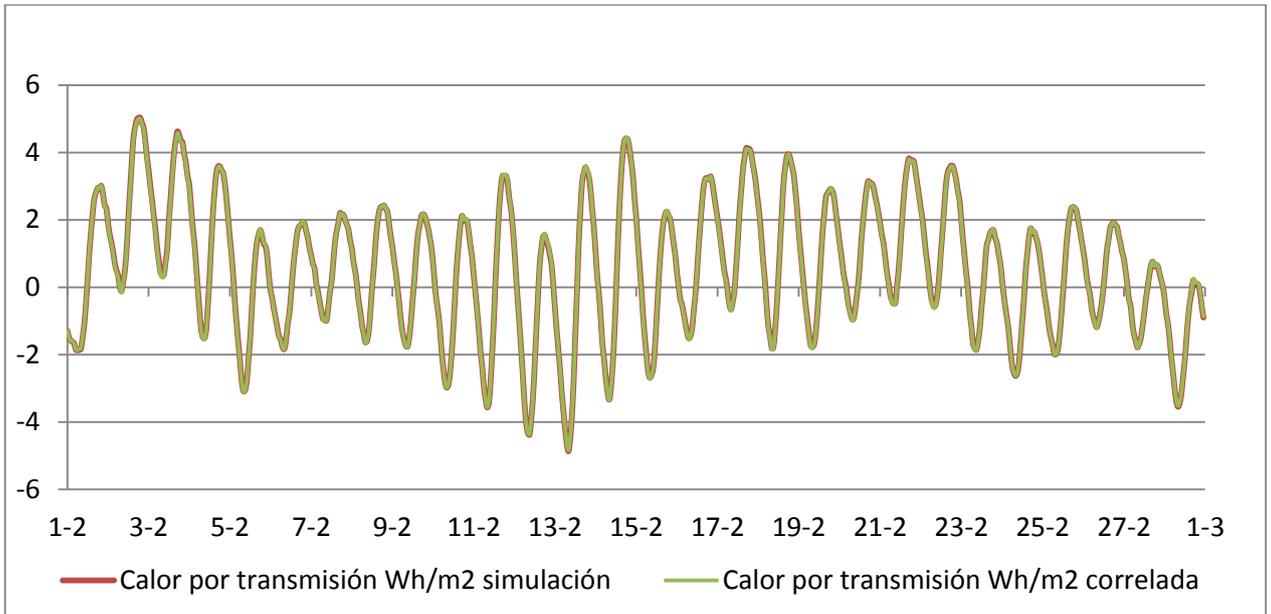


Figura 7-17. Valor del calor a través del cerramiento simulado vs correlacionado para Febrero (4 numeradores)

7.2.1.2.4. Caso 2: comprobación

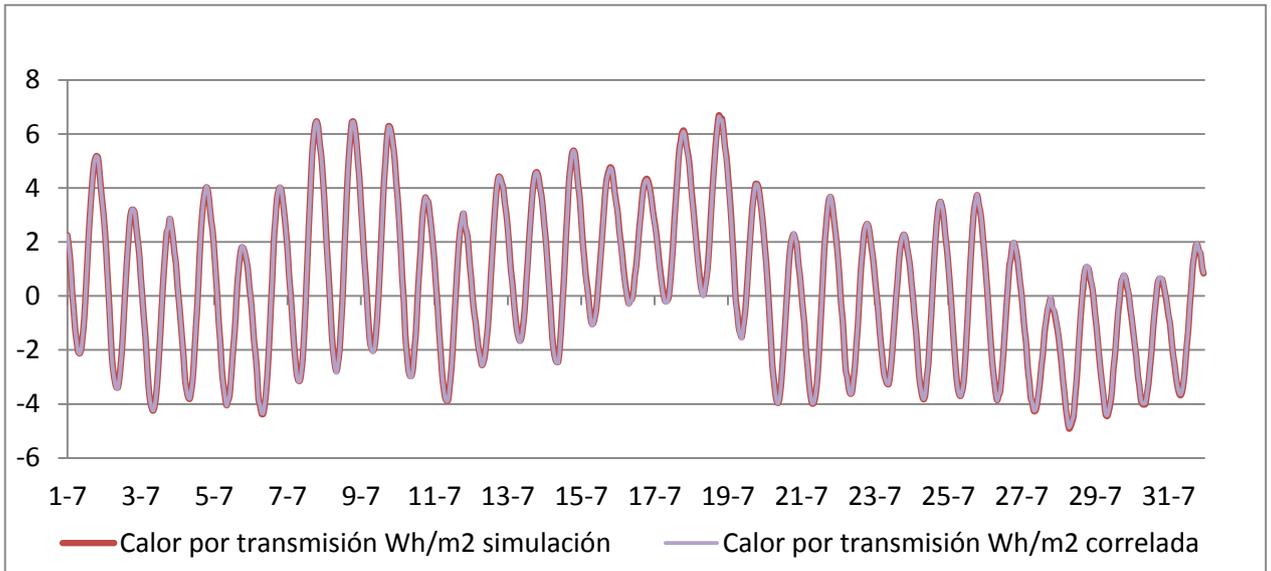


Figura 7-18 – Valor del calor a través del cerramiento simulado vs predicho para Julio con la correlación de Febrero (4 numeradores)

La conclusión del caso anterior sigue siendo válida cuando se incorpora otro elemento al cerramiento. El siguiente paso es añadir la radiación a la excitación, lo cual está siendo desarrollado.

7.2.1.2.5. Caso 2: base de tiempo de dos horas

En este paso se va a cambiar la base de tiempo de una hora a dos horas. Para ello se calculan los nuevos denominadores y numeradores, resultando los siguientes valores:

- Denominadores

d_1	-0.897
d_2	0.143

- Numeradores

	2 Num	3 Num	4 Num
<i>a0</i>	0.2244	0.3641	0.3589
<i>a1</i>	-0.0024	-0.2532	-0.2334
<i>a2</i>	0.0000	0.1603	0.1350
<i>a3</i>	0.0000	0.0000	0.0133
<i>R2</i>	0.9634	0.9996	0.9998
<i>RP</i>	0.9028	1.1030	1.1130

Tabla 7-9. Resultados en bruto de la optimización (paso de tiempo 2horas)

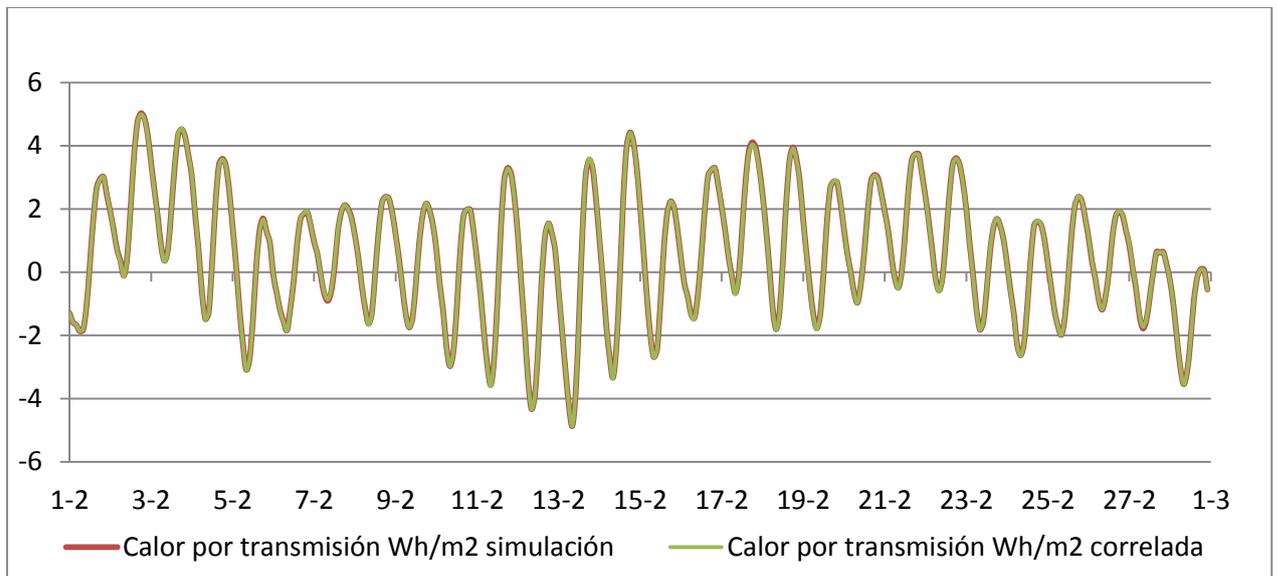


Figura 7-19 – Valor del calor a través del cerramiento simulado vs correlacionado para Febrero (4 numeradores-paso de tiempo dos horas)

La conclusión de este paso es que el cumplimiento del régimen permanente se hace con mayor calidad, y que puesto, que en la situación de partida el ajuste ya era de bastante calidad, este paso solo queda justificado para demostrar la validez del método cuando se modifica la base de tiempo.

7.2.2. Aplicación 2: cálculo ua de una célula experimental

7.2.2.1. Descripción

Describir la célula y los datos experimentales que se tienen.

Esta aplicación sintetiza una de las primeras aplicaciones del modelo con datos experimentales. Los esfuerzos consiguieron:

4. Obtención de parámetros estáticos y su relación en el modelo de caracterización simplificado
5. Primeros avances en la dualidad entre el modelo de temperatura y el de carga: necesidad de anidar ambos modelos para que uno sea input de otro y viceversa.

7.2.2.2. Caracterización experimental del coeficiente global de transferencia

Aplicación del método clásico en régimen permanente: “*the average method*”. Son necesarias tres medidas: temperatura interior (K), temperatura exterior (K), y flujo de calor a través de la pared (W/m²). El intervalo de tiempo entre medidas es normalmente de una hora. De la siguiente fórmula se obtiene la estimación de la resistencia térmica después de N medidas:

$$R_N = \frac{\sum_{i=1}^N (T_{int,i} - T_{ext,i})}{\sum_{i=1}^N q_i}$$

Equivale a dividir la diferencia de temperaturas media entre el flujo de calor medio.

De acuerdo al documento CEN/TC89/WG8 N90, “*Building components and elements –in situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance (ISO 9869)*” {{299 AENOR - CEN TC89/WG8 1995}}, este método es preciso si se cumple que:

- I. La duración del test excede las 72 horas (3 días).
- II. La estimación al final del periodo de test no debe desviarse más del 2% de la estimación 24 horas antes.
- III. La estimación correspondiente a los 2-3 primeros del periodo no debe desviarse más del 2% de la estimación de los 2-3 últimos.
- IV. Durante el experimento la pared no debe estar expuesta ni a radiación solar ni a penetración de lluvia.
- V. El cambio de la energía interna de la pared debe ser menor que el 2% del flujo que pasa a través de la pared durante el periodo de test. Este cambio puede estimarse como la diferencia entre la temperatura media de la pared al comienzo y al final del test (K), multiplicado por el calor específico (J/kg·K) y la masa de la pared (kg/m²)

Dichas condiciones reflejan la necesidad de un escenario estable y controlado durante el periodo de medida, lo que en la práctica no suele ocurrir.

Una modificación del método anterior desarrollada por Paul Baker {{300 Baker, Paul 2011}} permite con el mismo fundamento obtener el valor del coeficiente buscado. El valor de U puede estimarse con una simple media, donde es necesario medir el flujo de calor a través de la pared mediante un fluxómetro, y las temperaturas interior y exterior en intervalos de una hora:

$$U_t = \frac{\sum_{i=0}^t Q_i}{\sum_{i=0}^t T_{int,i} - \sum_{i=0}^t T_{ext,i}} \text{ W/m}^2\text{K}$$

Hay inconvenientes en el uso de las temperaturas interna y externa del aire, en términos de las

incertidumbres introducidas. En el caso de la temperatura interna puede haber estratificación, luego la temperatura medida puede no ser representativa de la localización del fluxómetro. Mientras que la temperatura externa puede ser representativa para el edificio, en la superficie externa puede haber exposición a radiación solar e intercambio radiante con los alrededores. Esto ocurre con el resto de técnicas comentadas, por lo que la opción recomendada sería el uso de las temperaturas superficiales internas y externas, un superficies representativas del elemento que se quiere caracterizar, evitando influencias de radiantes o puentes térmicos.

Aplicación

Sobre una célula experimental similar a la presentada en el punto anterior, pero sin el acoplamiento de una fachada ventilada se realiza el siguiente experimento.

- Se mantiene a temperatura interior constante durante el siguiente periodo: 21-11 al 26-11 a 30°C y del 28-11 al 02-12 a 30°C
- Se realizan las siguientes mediciones:
 - Temperatura y humedad exterior (Lleida)
 - Radiación solar
 - Temperatura y humedad interior de cada celda
 - Temperatura superficie interior de cada muro
 - Temperatura superficie interior cubierta y suelo
 - Energía eléctrica consumida por el sistema de climatización BdC

Las mediciones realizadas sobre la celda para el periodo de análisis son las que se representan en la siguiente figura:

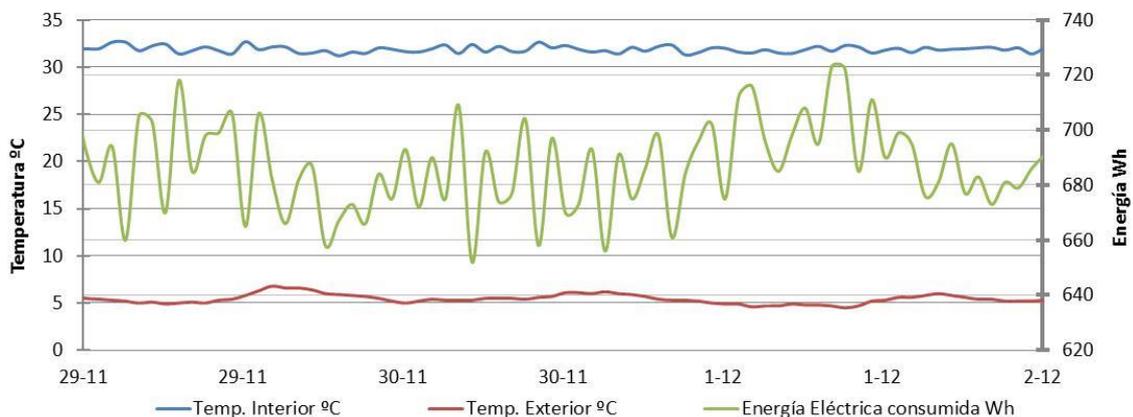


Figura 7-20. Datos medidos del experimento sobre la célula experimental

Siguiendo las indicaciones anteriores, del periodo experimental se extraen los datos del intervalo del 29 de noviembre de 2011 al 2 de diciembre de 2012 debido a que la radiación global sobre superficie horizontal medida en esos días es lo suficientemente baja. De esta forma se puede hacer la hipótesis de que las ganancias de calor a través de los cerramientos opacos (único tipo de cerramiento presente en la célula) son despreciables, pudiendo asociar la energía calorífica entregada por la bomba de calor a las pérdidas por transmisión.

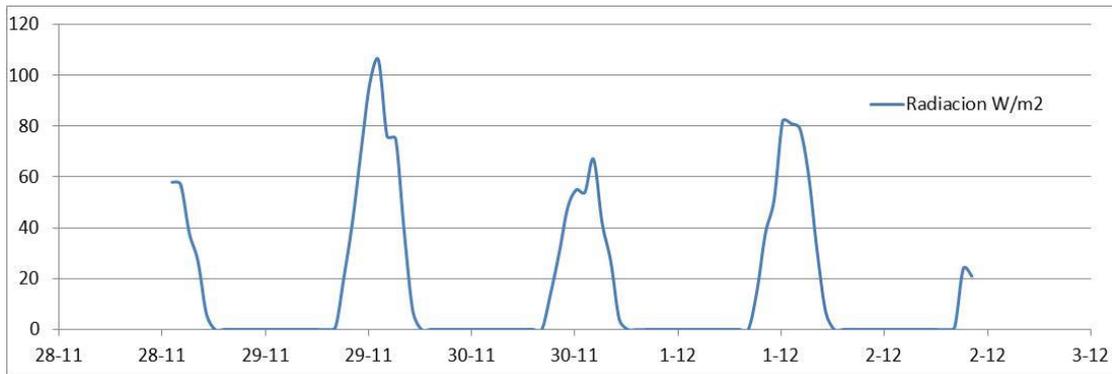


Figura 7-21. Radiación global horizontal W/m² medida sobre la célula de ensayo

La fórmula que se va a emplear es la explicada en este apartado, sustituyendo las temperaturas de aire por las temperaturas superficiales para el caso de buscar el coeficiente de transferencia superficie-superficie. De esta forma se puede calcular el coeficiente de transferencia asociado a la transmisión por conducción. La fórmula resulta:

$$R_N = \frac{\sum_{i=1}^N (T_{S-int,i} - T_{S-ext,i})}{\sum_{i=1}^N q_i}$$

Dónde R_N se corresponde con 1/U_{GLOBAL}.

El las temperaturas superficiales son medidas en cada superficie de la celda, por lo que la temperatura considerada es la media ponderada por las áreas de cada una de las variables medidas.

A su vez la energía calorífica suministrada por la BdC no es medida como tal, si no que se tiene un contador del consumo eléctrico del sistema. Para calcular de forma simplificada la energía calorífica asociada al consumo eléctrico medido se requieren las condiciones nominales del sistema, y la variación de las mismas en función de la carga parcial y de las condiciones climáticas; puesto que esto último no aparece en el catálogo del fabricante, se aproximarán con las curvas de comportamiento de autónomos que usa CALENER GT.

Sistema: ASHA07LCC-AOHR07LCC Inverter Fujitsu (existen dos unidades instaladas en la celda). Cada unidad es medida por separado, por lo que se calculan por separado y se suma la energía calorífica aportada por cada unidad en el paso de tiempo elegido.

ESPECIFICACIONES	
ALIMENTACIÓN	230 V-50 Hz
REFRIGERACIÓN	
CAPACIDAD	2,10 kW
ENTRADA DE ALIMENTACIÓN	0,47 kW
CORRIENTE	2,5 A
RAZÓN DE EFICIENCIA DE ENERGÍA	4,47
CALEFACCIÓN	
CAPACIDAD	3,00 kW
ENTRADA DE ALIMENTACIÓN	0,66 kW
CORRIENTE	3,2 A
CORRIENTE MÁX	
Refrigeración	6,0 A
Calefacción	8,5 A

Figura 7-22. Captura del manual técnico de la BdC instalada en el experimento

Las curvas necesitadas son las siguientes (pág. 43 Manual de curvas de CALENER GT):

COP-ELEC_T (HEAT-EIR-FT)	Variación del valor nominal de la relación entre la potencia eléctrica consumida y la potencia calorífica suministrada por la bomba de calor (HEAT-EIR en DOE2), en función de la temperatura seca del aire de entrada y seca del aire exterior, o bien, en función de la temperatura seca del aire a la entrada y del agua a la entrada para los sistemas autónomos con bomba de calor aire/agua. El valor de HEAT-EIR, en DOE2, coincide con el inverso del COP-ELEC definido en CALENER-GT.		
	$f(T_s^{ext}, T_s^{ext})$		
	Bi-Lineal-T, Bi-Cuadrática-T		
	T_s^{ext}	Temperatura seca del aire a la entrada de la batería.	°F
T_s^{ext}	Temperatura seca del aire exterior.	°F	

COP-ELEC_FCP (HEAT-EIR-FPLR)	Variación del valor nominal de la relación entre la potencia eléctrica consumida y la potencia calorífica suministrada por la bomba de calor (HEAT-EIR en DOE2), en función del factor de carga parcial. El valor de HEAT-EIR en DOE2 coincide con el inverso del COP-ELEC definido en CALENER-GT.	
	$f(PLR)$	
	Cúbica, Cuadrática, Lineal	
PLR	Factor de carga parcial, definido como cociente entre la carga del sistema y la capacidad sensible del mismo (en el caso de calefacción la carga sensible coincide con la total).	n/a

Figura 7-23. Capturas del manual de curvas de CALENER GT

El procedimiento seguido para calcular la energía calorífica aportada es el siguiente:

- A partir de la curva [COP_ELEC_T] se calcula el factor corrector del consumo asociado a las condiciones climáticas y de operación del sistema.
- Puesto que se conoce el consumo eléctrico real y el nominal, se despeja el factor corrector del consumo eléctrico debido a la carga parcial de la siguiente fórmula [COP_ELE_FCP]:

Consumo eléctrico real (W)=Consumo eléctrico nominal (W)·[COP_ELEC_T]·[COP_ELE_FCP]

A partir de este parámetro se despeja el factor de carga parcial con el que se encuentra trabajando el sistema (relación entre la potencia calorífica real entrega y la nominal).

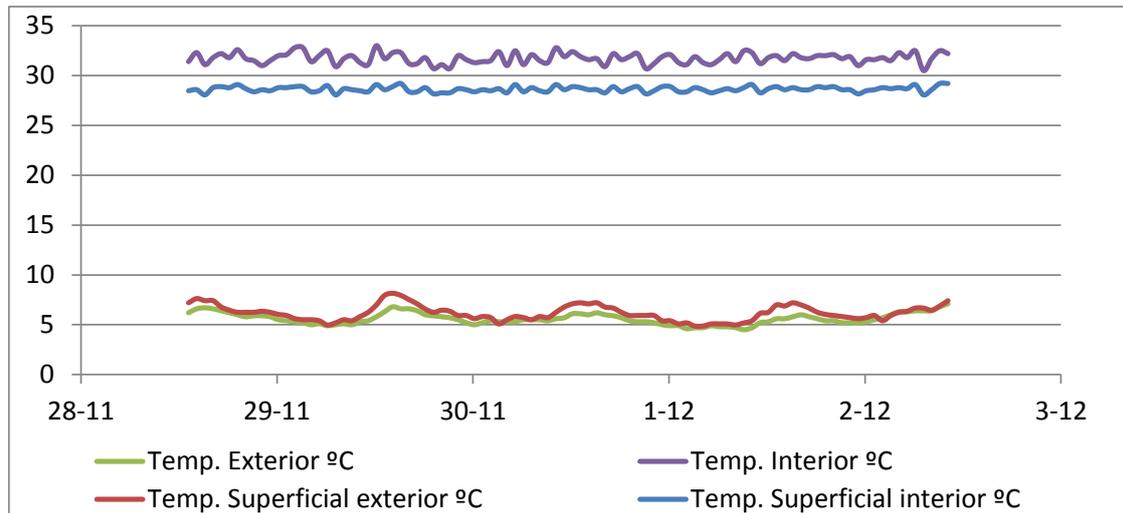


Figura 7-24. Temperaturas superficiales y del aire medidas

Con estas temperaturas y la energía calorífica entregada por el equipo (hipótesis de que es energía es la que se corresponde con las pérdidas a través del cerramiento), se calcula el coeficiente de transferencia buscado:

Escenario A): se considera la diferencia de temperaturas superficiales en los cerramientos

$$U_{\text{SUPERFICIE-SUPERFICIE}} = 1.45 \text{ W/m}^2\text{-K}$$

Escenario B): se considera la diferencia de temperaturas aire exterior – aire interior

$$U_{\text{AIRE-AIRE}} = 1.18 \text{ W/m}^2\text{-K}$$

Este valor es el calculado entre los días 29 de noviembre al 1 de diciembre, probando que el valor calculado para el día 2 de diciembre de 2011 difiere un 0.8% (superficie-superficie) y un 0.95% (aire-aire) con respecto al estimado en el periodo anterior, por lo que se puede considerar una situación de régimen permanente.

Al igual que con el método anterior, se va a realizar una estimación teórica de los cerramientos a partir de su composición:

MURO	Espesor (m)	Conductividad (W/mk)	Densidad (kg/m3)	U_{muro} W/m²K
Termoarcilla	0.29	0.421	1080	1.39
Enfoscado	0.04	1.4	2100	
CUBIERTA	Espesor (m)	Conductividad (W/mk)	Densidad (kg/m3)	U_{cubierta} W/m²K
Arena y grava	0.06	2	1450	0.49
Poliestireno	0.08	0.046	30	
Hormigón	0.04	0.35	1000	
Entrevigado	0.25	1.323	1330	

Tabla 7-10. Resultados del estudio analítico de las transmitancias de la celda experimental

Solo considerando área de transferencia la que está en contacto con el aire exterior, se tiene U total de:

$$U = 1.30 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$$

Este valor es ligeramente inferior al estimado de forma experimental (11%), pero permite añadir confianza al valor estimado de forma experimental.