

UNIVERSIDAD DE SEVILLA
Escuela Superior de Ingenieros.
Departamento de Ingeniería Energética

CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN
ENERGÉTICA DE EDIFICIOS EXISTENTES EN
BASE A MEDIDAS. APLICACIÓN AL SECTOR
RESIDENCIAL

TESIS DOCTORAL

Por

Rocío González Falcón

Director: Dr. Servando Álvarez Domínguez

Sevilla, Julio de 2007

UNIVERSIDAD DE SEVILLA
Escuela Superior de Ingenieros.
Departamento de Ingeniería Energética

CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN ENERGÉTICA DE
EDIFICIOS EXISTENTES EN BASE A MEDIDAS.
APLICACIÓN AL SECTOR RESIDENCIAL

TESIS DOCTORAL

Director de la tesis

Doctorando

Fdo: Dr. Servando Álvarez
Domínguez

Fdo: D^a Rocío González Falcón

Sevilla, Julio de 2007

AGRADECIMIENTOS

A Servando Álvarez, por su labor de dirección y el entusiasmo que me ha transmitido siempre por este trabajo.

A todos mis compañeros del grupo de Termotecnia, por la inestimable ayuda que siempre han estado dispuestos a prestarme.

También quisiera agradecer a mi familia, mis padres y hermanos, su apoyo incondicional, tan importante para mí.

Y, en especial, a mi mejor compañero, mi marido Curro. Por su aliento en los momentos de desánimo que acompañan un trabajo como este. Por su entrega y apoyo durante estos últimos meses. Por ser lo más importante en mi vida, a ti y a nuestro hijo os dedico esta tesis.

INDICE DE CONTENIDOS

AGRADECIMIENTOS	i
INDICE DE CONTENIDOS	ii
INDICE DE FIGURAS	vi
INDICE DE TABLAS	x
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Marco general	1
1.2 Antecedentes	4
1.2.1 Directiva 2002/91/CE	4
1.2.2 Actuaciones sobre el sector de edificios existentes	8
1.3 Objetivos y alcance de la tesis	9
1.4 Estructura de la tesis.....	10
1.4.1 Capítulo 2	10
1.4.2 Capítulo 3	11
1.4.3 Capítulo 4	12
1.4.4 Capítulo 5	13
1.4.5 Capítulo 6	14
1.4.6 Capítulo 7	14
CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE	15
2.1 Introducción	15
2.2 Fundamentos de los métodos de evaluación	19
2.2.1 Indicadores energéticos	20
2.2.2 Métodos de cálculo.....	23
2.2.3 Escenario de comparación	25

2.2.4	La escala de puntuación.....	30
2.3	Revisión de modelos de caracterización y evaluación energética	30
2.3.1	Modelos en la Unión Europea	30
2.3.2	Modelos en otros Países	44
 CAPÍTULO 3. CARACTERIZACIÓN ENERGÉTICA BASADA EN MEDIDAS ...		54
3.1	Introducción	54
3.2	Metodologías de caracterización	56
3.3	Protocolos de Inspección Técnica del edificio	59
3.4	Protocolos de Monitorización	59
3.5	Métodos de ajuste de medidas (normalización)	60
3.5.1	Superficie del edificio.....	61
3.5.2	Clima	62
3.6	Métodos de desglose del consumo energético	62
3.6.1	Desglose de facturas energéticas basado modelos de simulación	63
3.6.2	Desglose de facturas energéticas basado en técnicas de regresión	64
3.7	Estimación del rendimiento medio estacional	67
3.7.1	Método simplificado para el cálculo del rendimiento medio estacional	71
3.8	Caracterización energética según la normativa europea.....	80
3.8.1	Definición de Indicadores de la Eficiencia Energética	80
3.8.2	Procedimientos de toma de medidas	81
 CAPÍTULO 4. EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO ENERGÉTICO.....		82
4.1	Introducción	82
4.2	Variaciones del escenario de comparación	83
4.3	Existencia de estadística amplia sobre consumos de edificios	86
4.3.1	Estimación de la variación del consumo frente al clima	89
4.3.2	Obtención de la distribución de consumos normalizados	91
4.3.3	Obtención del escenario de comparación para cada clima.....	95
4.3.4	Influencia del grado de similitud en el escenario de comparación	98
4.3.5	Obtención de escenario de comparación con grado de similitud alto ..	104
4.4	Inexistencia de estadística sobre consumos de edificios.....	105
4.4.1	Ajuste de la distribución de consumos normalizados.....	106
4.4.2	Obtención de leyes de variación del consumo.....	108
4.4.3	Obtención del escenario de comparación	109
4.5	Existencia de estadística reducida sobre consumos de edificios.....	111
4.5.1	Análisis del parque edificatorio y muestreo	111
4.5.2	Toma de medidas y tratamiento de los resultados.....	114

4.6	Escala de puntuación.....	114
CAPÍTULO 5. DISTRIBUCIÓN DE CONSUMOS.....		117
5.1	Selección de la muestra de datos	118
5.2	Selección de los modelos de distribución	119
5.2.1	Estimación de parámetros de los modelos	120
5.3	Evaluación de los modelos de distribución	121
5.3.1	Métodos gráficos.....	122
5.3.2	Tests de ajuste estadístico	124
5.3.3	Discusión de los resultados de la evaluación	125
5.4	Procedimiento de obtención de la distribución de consumos	126
5.4.1	Determinación del parámetro de forma alfa	127
5.4.2	Determinación de la constante de traslación c_0'	129
5.4.3	Determinación del factor de escala beta	130
CAPÍTULO 6. MEDIDAS DE AHORRO ENERGÉTICO		134
6.1	Introducción	134
6.2	Factores de actuación sobre el ahorro energético	135
6.2.1	Factores que intervienen en la demanda energética	136
6.2.2	Factores que intervienen en el rendimiento.....	136
6.3	Estimación de potenciales de ahorro energético	137
6.3.1	Estimación de potenciales de ahorro por mejora de equipos	138
6.3.2	Estimación de potenciales de ahorro por mejora del aislamiento	156
6.3.3	Revisión de potenciales de ahorro por mejora de las instalaciones.....	166
CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS		169
7.1	Conclusiones generales.....	169
7.2	Aportaciones.....	170
7.3	Desarrollos futuros.....	170
REFERENCIAS		172
ANEXO A. RESUMEN DE SISTEMAS DE CERTIFICACIÓN		180
a.1.	Descripción general.....	180
ANEXO B. DESCRIPCIÓN DE BASES DE DATOS RECS.....		184
b.1.	Descripción general.....	184
b.2.	Sector residencial: RECS.....	186

b.2.1. Organización y contenido de ficheros	186
ANEXO C. CURVAS DE COMPORTAMIENTO DE EQUIPOS	189
c.1. Calderas	189
c.2. Equipos Autónomos aire-aire	193
c.2.1. Refrigeración.....	194
c.2.2. Calefacción (bomba de calor).....	195
ANEXO D. DESCRIPCIÓN DE CASOS SIMULADOS	197
d.1. Programa de simulación. DOE2.2	197
d.2. Descripción de los edificios.....	197
d.2.1. Edificio residencial unifamiliar: Vivienda adosada.....	197
d.2.2. Edificio residencial multifamiliar: Vivienda en bloque.....	202
d.3. Definición de los sistemas	208
d.4. Estados de carga parcial	210

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Reparto del consumo de energía final en Europa, año 2002. Fuente: Eurostat.	1
Figura 1.2. Evolución prevista del consumo de energía final en Europa. Fuente: European Commission. .	2
Figura 1.3. Reparto del consumo de energía final en España, año 2002. Fuente: Ministerio de Economía	2
Figura 1.4. Evolución prevista del consumo de energía final en España. Fuente: Ministerio de Economía.	3
Figura 2.1. Ejemplo de distribuciones de consumos anuales en kWh/m ² para los distintos usos procedentes de la base de datos RECS.	27
Figura 2.2. Distribución de frecuencias acumuladas del consumo eléctrico total. Viviendas unifamiliares. EE.UU.	27
Figura 2.3. Ejemplo de dependencia de la calificación lineal de los extremos.	28
Figura 2.4. Escala de puntuación del método SAP	31
Figura 2.5. Obtención del CI (Carbon Index).	32
Figura 2.6. Certificados expedidos mediante los métodos NHER y SAP.	33
Figura 2.7. Reparto de puntos entre categorías del método BREAM.	34
Figura 2.8. Comparación del coste energético del E.O. (£/m ²) con los de referencia.	36
Figura 2.9. Consumos energéticos por usos en kWh/m ² para valores de referencia ("típicos" y de "buena práctica") de cuatro edificios tipo de oficinas.	37
Figura 2.10. Costes energéticos por usos en £/m ² para valores de referencia ("típicos" y de "buena práctica") de cuatro edificios tipo de oficinas.	37
Figura 2.11. Emisiones de CO ₂ para valores de referencia ("típicos" y de "buena práctica") de cuatro edificios tipo de oficinas.	37
Figura 2.12. Informe de Calificación Energética (Energy Label) y del Plan Energético (Energy Plan)	39
Figura 2.13: Informe de Calificación Energética (Energy Label)	40
Figura 2.14. Edificios de referencia utilizados para las distintas tipologías de viviendas en el método EPA.	42

Figura 2.15. Ejemplo del certificado expedido mediante al método ERBM.....	43
Figura 2.16: Reparto de los puntos entre categorías del método LEED.....	47
Figura 2.17: Informe presentado por la herramienta: "Statement of Energy Performance".....	50
Figura 2.18: Certificado expedido por EnerGuide	51
Figura 3.1: Datos requeridos en los protocolos de caracterización desarrollados en el proyecto EUROCLASS (EUROCLASS, Julio de 2001).....	57
Figura 3.2: Ejemplo de diferencias entre el grado de carga parcial sobre un equipo autónomo en régimen de calefacción dimensionado correctamente y otro dimensionado en exceso.	70
Figura 3.3 Ejemplo de frecuencias de operación de un equipo para diferentes rangos de carga parcial..	74
Figura 3.4 Frecuencias de operación a carga parcial y temperatura media exterior para un equipo autónomo en régimen de refrigeración. Vivienda adosada. Sevilla.....	77
Figura 3.5 Frecuencias de operación a carga parcial y temperatura media exterior para un equipo autónomo en régimen de refrigeración. Bloque de viviendas. Sevilla	77
Figura 3.6 Frecuencias de operación a carga parcial y temperatura media exterior una caldera. Bloque de viviendas. Sevilla.....	79
Figura 4.1: Información disponible relativa al stock de edificios en los distintos países europeos.....	83
Figura 4.2: Distribuciones de consumos (kWh/m ² -año) para los distintos usos energéticos. RECS 2001	87
Figura 4.3: Representación de los consumos de calefacción frente a los grados-día de calefacción. Viviendas unifamiliares. EEUU.	88
Figura 4.4: Consumo de calefacción frente a grados-día de invierno. Viviendas unifamiliares. EEUU.	91
Figura 4.5: Variación de la dispersión de la muestra de consumos de calefacción normalizados frente al clima.....	92
Figura 4.6: Consumos de calefacción de la base de datos normalizados.....	93
Figura 4.7: Distribución de frecuencias de consumos de calefacción normalizados	94
Figura 4.8: Distribución de frecuencias acumuladas del consumo normalizado.....	94
Figura 4.9: Distribución de frecuencias de consumos de calefacción obtenidas para cada clima	96
Figura 4.10: Distribución de frecuencias acumuladas de consumos de calefacción para un clima determinado (GD = 1500)	98
Figura 4.11: Distribución de frecuencias acumuladas de los consumos energéticos por usos. Viviendas unifamiliares. EE.UU.	99
Figura 4.12: Distribución de frecuencias acumuladas del consumo eléctrico total. Viviendas unifamiliares. EE.UU.....	100
Figura 4.13: Distribución de frecuencias acumuladas de los consumos energéticos por usos con la discriminación climática. Viviendas unifamiliares. EE.UU.	102
Figura 4.14: Nuevo escenario de comparación. Distribución de frecuencias acumuladas del consumo eléctrico total con la discriminación climática. Viviendas unifamiliares. EE.UU.	102
Figura 4.15: Variación de las curvas normalizadas con el grado de similitud.....	104
Figura 4.16: Ejemplo del ajuste de una curva de distribución tipo Weibull a la muestra de datos de consumos normalizados de calefacción.	107

Figura 4.17: Valores de referencia, en términos de demanda (kWh/m ²), para el valor mínimo aceptable en la calificación energética de viviendas de protección oficial en España (CEV).....	109
Figura 5.1: Distribución de consumos normalizados de calefacción y de refrigeración. Origen base de datos RECS 2001.....	119
Figura 5.2: Comparación de datos de consumos normalizados de calefacción obtenidos de la muestra (datos reales) frente a datos ajustados mediante los modelos de distribución siguientes: Gamma, Lognormal y Weibull.	122
Figura 5.3: Comparación de datos de consumos normalizados de refrigeración obtenidos de la muestra (datos reales) frente a datos ajustados mediante los modelos de distribución siguientes: Gamma, Lognormal y Weibull.	123
Figura 5.4: Probabilidad acumulada y función densidad, con inflexión en el percentil del 20% ($\alpha=1.72$).	129
Figura 5.5: Probabilidad acumulada y función densidad, con inflexión en el percentil del 20% y ratio 90%-10% igual a 3.5 ($\alpha=1.72$; $c_0=0.272$).	130
Figura 5.6: Probabilidad acumulada y función densidad, con inflexión en el percentil del 20% y ratio 90%-10% igual a 3.5 ($\alpha=1.72$; $\beta =120.41$; $c_0=32.705$). Y valor de referencia $x_{50} = 130$ kWh/m ²	132
Figura 5.7: Variación de la distribución de consumos en función del ratio 90%/10% (3.5; 4; 5)	133
Figura 6.1: Variación del ahorro en función de la mejora del rendimiento para distintos valores de FMcp	140
Figura 6.2: Variación del rendimiento nominal de calderas frente a la potencia nominal según marca CE.	141
Figura 6.3 Variación de los parámetros η^* y C^* con el factor de carga parcial (fcp).	146
Figura 6.4 Ejemplo de curva de variación del parámetro C^* con el factor de carga parcial y valores medios, C^*_i , para cada rango de carga parcial.	147
Figura 6.5 Ejemplo de frecuencias de operación de un equipo para diferentes rangos de carga parcial.	147
Figura 6.6: Curvas de comportamiento a carga parcial obtenidas partir de las exigencias del RD.	149
Figura 6.7: Frecuencia observada de caldera dentro de cada rango de carga parcial. Resultados de la simulación de modelos de edificios residenciales en Sevilla.	151
Figura 6.8: Curvas de comportamiento a carga parcial para equipos autónomos con control típico on-off y control modulante (inverter).....	152
Figura 6.9: Frecuencia observada del autónomo en régimen de refrigeración dentro de cada rango de carga parcial. Resultados de la simulación de modelos de edificios residenciales en Sevilla.	153
Figura 6.10: Frecuencia observada de caldera dentro de cada rango de carga parcial. Para caldera de capacidad correcta y de capacidad sobreestimada.....	155
Figura 6.11: Frecuencia observada del autónomo en régimen de refrigeración dentro de cada rango de carga parcial. Para autónomo de capacidad correcta y de capacidad sobreestimada.	155
Figura 6.12: Variación del ahorro porcentual frente al grado de sobreestimación de caldera (curva superior) y equipo autónomo (curva inferior). En vivienda adosada en Sevilla	156
Figura 6.13: Distribuciones de ahorros en demanda de calefacción para cada orientación, en Sevilla y para un aumento del nivel de aislamiento en muros exteriores $\Delta U=0.12$ W/m ² K.....	157
Figura 6.14: Correlaciones para la estimación del ahorro en demanda de calefacción debido a mejora de aislamiento en muros exteriores, cubiertas, suelos y ventanas.	160

Figura 6.15: Factor de Mejora a Carga Parcial frente al grado de sobredimensionamiento debido a mejora del nivel de aislamiento del edificio	165
Figura 6.16: Variación del ahorro en función del ahorro relativo en demanda (FM_d) para distintos valores del FM_{cp}	166
Figura 6.17: Potenciales de ahorro debidos a mejoras en las instalaciones de climatización en viviendas de Estados Unidos. Fuente EPA.....	167
Figura 6.18: Paquetes de medidas de mejora propuestos por "Best Practices Guide For Residential Hvac Retrofits"	168
Figura d.1: Vista en tres dimensiones de la fachada norte (izquierda) y sur (derecha) de la vivienda adosada.	198
Figura d.2: Plano acotado de las plantas baja (0+) y primera (1+) de la vivienda adosada.	199
Figura d.3: Plano de alzado lateral de la vivienda adosada.	199
Figura d.4: Plano de alzados de la vivienda adosada.	200
Figura d.5: Variación horaria de la ocupación en la vivienda adosada.	202
Figura d.6: Variación horaria de la carga debida a iluminación y equipos en la vivienda adosada.	202
Figura d.7: Vista en tres dimensiones de la fachada este de la vivienda en bloque.	203
Figura d.8: Vista en tres dimensiones de la fachada oeste de la vivienda en bloque.	203
Figura d.9: Plano acotado de las plantas primera (1+), segunda (2+) y tercera (3+) de la vivienda en bloque.....	206
Figura d.10: Plano de alzados de la vivienda en bloque	205
<i>Figura d.11: Variación horaria de la ocupación en la vivienda en bloque.</i>	<i>208</i>
<i>Figura d.12: Variación horaria de la carga debida a iluminación y equipos en la vivienda en bloque. ..</i>	<i>208</i>

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Estimación de ahorros debido a actuaciones en edificios existentes (E4, periodo 2005-2007) .	9
Tabla 2.1. Ejemplo de coeficientes de paso de Energía Final a Energía Primaria (kWh E.P./ kWh E.F.) por tipo de energía para España.....	20
Tabla 2.2. Tarifas energéticas y coeficientes de paso de energía final a emisiones de CO ₂ empleadas en el método SAP (Reino Unido).	21
Tabla 2.3. Escala de puntuación del método BREAM.	35
Tabla 2.4. Valores de eficiencia energética de equipos para la obtención de los niveles de referencia en el método HERS.....	45
Tabla 2.5. Escala de puntuación en estrellas del HERS.....	46
Tabla 3.1: 1993 RECS. Usos finales de energía para las distintas fuentes energéticas.....	66
Tabla 3.2: Condiciones de ensayo para fijar valores Standard de los acondicionadores de aires según la norma prEN 14511.	68
Tabla 3.3. Ejemplo de variación de rendimientos a carga parcial de equipos autónomos.	69
Tabla 3.4. Calculo de parámetros para la estimación del factor corrector del rendimiento nominal de equipo autónomo en vivienda unifamiliar adosada. Simulado para Sevilla.	78
Tabla 3.5. Calculo de parámetros para la estimación del factor corrector del rendimiento nominal de equipo autónomo en vivienda en bloque. Simulado para Sevilla.....	78
Tabla 3.6. Corrección de rendimientos nominales en función de las condiciones de operación y carga parcial.....	78
Tabla 3.7. Calculo de parámetros para la estimación del factor corrector del rendimiento nominal de calderas estándar y de condensación en vivienda en bloque. Simulado para Sevilla.	79
Tabla 3.8. Corrección de rendimientos nominales en función de las condiciones de operación y carga parcial.....	80
Tabla 4.1: Resumen del análisis de la dependencia estadística entre variables de consumo y variables climáticas	89
Tabla 4.2: Escala propuesta para la interpretación del grado de dependencia estadística entre variables.	89

Tabla 4.3: Variación del ratio 90/10% frente al tipo de uso.....	99
Tabla 4.4: Variación de la evaluación de vivienda unifamiliar con el grado de similitud	103
Tabla 4.5: Variación de la relación entre el percentil 90% y 10% frente al grado de similitud.....	104
Tabla 4.6: Reparto de edificios de viviendas según el tipo, entre las provincias andaluzas.....	111
Tabla 4.7: Procedimiento de cálculo del indicador C propuesto por prEN 15217.....	115
Tabla 4.8: Escala de puntuación propuesta por prEN 15217.....	116
Tabla 5.1: Parámetros estimados para los modelos de distribución propuestos para el Consumo normalizado de calefacción.....	121
Tabla 5.2: Parámetros estimados para los modelos de distribución propuestos para el Consumo normalizado de refrigeración.....	121
Tabla 5.3: Valores de los estadísticos para medir la bondad del ajuste de los datos de consumo normalizado de calefacción.....	125
Tabla 5.4: Valores de los estadísticos para medir la bondad del ajuste de los datos de consumo normalizado de refrigeración.....	125
Tabla 5.5: Valores críticos para medir la bondad del ajuste de los datos con $\alpha=0.05$	125
Tabla 5.6: Variación del parámetro α con el punto de inflexión	128
Tabla 5.7: Percentiles de la variable Y ($\alpha=1.72$)	128
Tabla 5.8: Valores característicos de la distribución normalizada en función de α	129
Tabla 5.9: Variación de la constante de traslación frente al ratio 90-10%	130
Tabla 5.10: Valores del factor de escala β y de la constante de traslación C_0' en función de α . Para valor de referencia $x_{50} = 130 \text{ kWh/m}^2$ y ratio 90%-10% igual a 3.5 ($K=3.5$).....	131
Tabla 5.11: Valores del factor de escala β y de la constante de traslación C_0 en función del ratio 90%/10% Para valor de referencia $x_{50} = 130 \text{ kWh/m}^2$	132
Tabla 6.1. Variación del rendimiento frente a la potencia nominal según el marcado CE de calderas...	141
Tabla 6.2. Clasificación por EER, en condiciones Eurovent, de equipos autónomos tipo splits y multi-splits según la Directiva 2002/31/EC.....	142
Tabla 6.3. Rendimientos mínimos de calderas según R.D. 275/1995	149
Tabla 6.4. Valores medios del C^* para calderas estándar y de condensación.....	150
Tabla 6.5. Porcentajes de ahorro estimados para sustitución de caldera estándar por caldera de condensación. Para viviendas en Sevilla.....	150
Tabla 6.6. Valores medios del C^* para equipos autónomos con control típico on-off y control modulante (inverter).....	152
Tabla 6.7. Porcentajes de ahorro estimados por sustitución de autónomo convencional por inverter. Para viviendas en Sevilla.....	153
Tabla 6.8. Parámetros representativos de la distribución de ahorros en demanda de calefacción, para Sevilla.....	157
Tabla 6.9. Ahorros Ratio ahorro de demanda de calefacción / reducción de transmitancia térmica	158
Tabla 6.10. Constantes de proporcionalidad para correlaciones de estimación del ahorro en demanda de calefacción debido a la mejora del aislamiento en muros exteriores, cubiertas, suelos y ventanas.....	161

Tabla 6.11. Grados Día Modificados en Sevilla	161
Tabla 6.12. Ahorros en demanda de calefacción [$\text{kWh}/\text{m}^2_{\text{componente}}$] debidos a incremento del nivel de aislamiento en muros y ventanas al norte en Sevilla	161
Tabla 6.13. Constantes de proporcionalidad para correlaciones de estimación del ahorro en demanda de calefacción debido al incremento del factor solar en ventanas.	162
Tabla 6.14. Radiación global solar incidente en Sevilla.....	163
Tabla 6.15. Ahorros en demanda de calefacción [$\text{kWh}/\text{m}^2_{\text{componente}}$] debidos a incremento del factor solar en ventanas al sur en Sevilla.....	163

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 Marco general

El consumo energético en el sector de la edificación está experimentando en Europa un crecimiento importante en los últimos años. Se estima que en el año 2002, el consumo del sector de la vivienda y los servicios, compuesto en su mayoría por edificios, constituye el 41% del consumo de energía final de la Unión Europea (ver Figura 1.1).

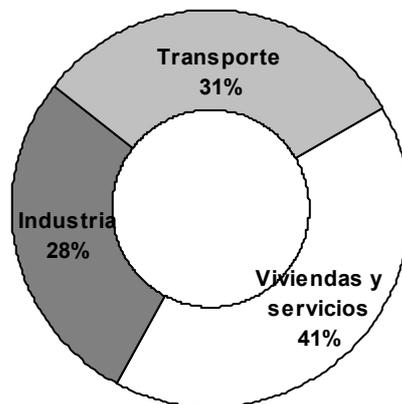


Figura 1.1. Reparto del consumo de energía final en Europa, año 2002. Fuente: Eurostat¹.

Este consumo presenta una tendencia creciente debido al proceso de expansión en el que se encuentran actualmente el sector de la edificación. Según la Dirección General para la Energía y el Transporte de la Unión Europea (Figura 1.2),

¹ European Commission. Eurostat. <http://epp.eurostat.ec.europa.eu>

se prevé que continúe la actual relevancia de este sector en el futuro, con un crecimiento equivalente al del resto de sectores.

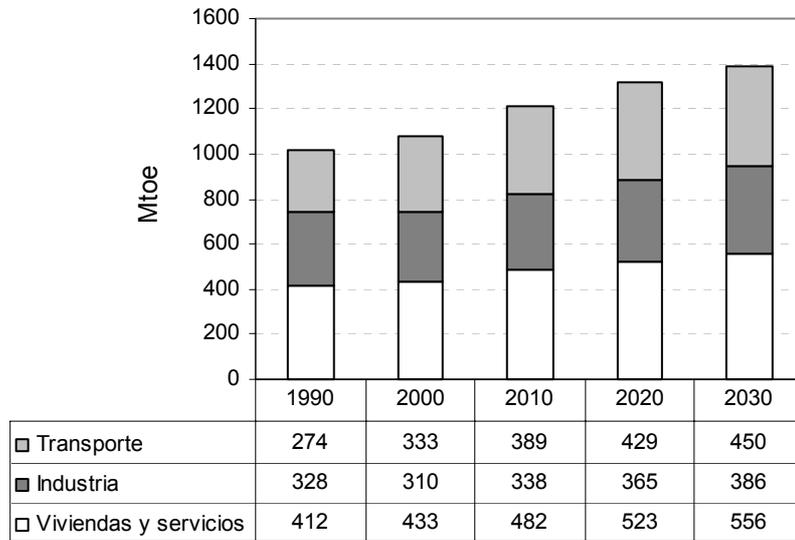


Figura 1.2. Evolución prevista del consumo de energía final en Europa. Fuente: European Commission².

Los edificios tienen una gran incidencia en el consumo a largo plazo, pues se trata de un producto de una gran durabilidad. Se estima que los edificios existentes actualmente en Europa consumirán alrededor de los 2/3 de lo que el sector de la edificación, en su totalidad, consumirá en el año 2050 (G. Henderson y otros, BELAS). Por ello, se puede considerar que la mejora del comportamiento energético de los edificios existentes constituye una fuente importante de ahorro energético, que, además, tendrá una repercusión importante durante un periodo de tiempo prolongado.

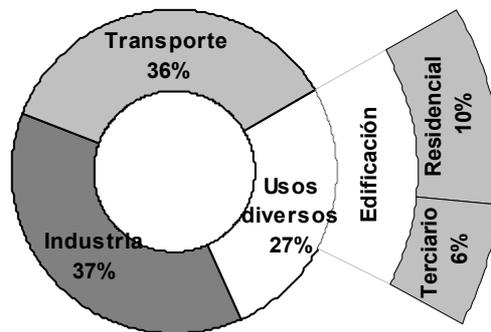


Figura 1.3. Reparto del consumo de energía final en España, año 2002. Fuente: Ministerio de Economía³

² European Commission. DG for Energy and Transport. *European Energy and Transport trends to 2030*, Enero de 2003.

³ Ministerio de Economía. Estrategia de ahorro y eficiencia energética en España. Noviembre de 2003.

En el caso de España, el consumo energético de los edificios, suma de los consumos de calefacción, refrigeración y agua caliente sanitaria, se situó en el año 2000 en 14491 ktep. Esto representa un 16% del total nacional, del que un 9,87% se corresponde con el sector residencial y el resto, un 6,13%, procede del sector terciario (ver Figura 1.4).

Los estudios técnicos realizados durante la elaboración de la E4 (Ministerio de Economía, Noviembre de 2003), basados en datos sobre la evolución de la población y el crecimiento económico en España, estimaron un crecimiento importante del consumo en todos los sectores (ver Figura 1.4).

Concretamente, la evolución para el sector edificación durante el periodo de ejecución del E4 supone un incremento en el consumo anual del 4.1%. También se estimó un potencial de ahorro en el sector de 1.733 ktep, lo que se corresponde con el 7,5% del consumo previsto para el año 2012.

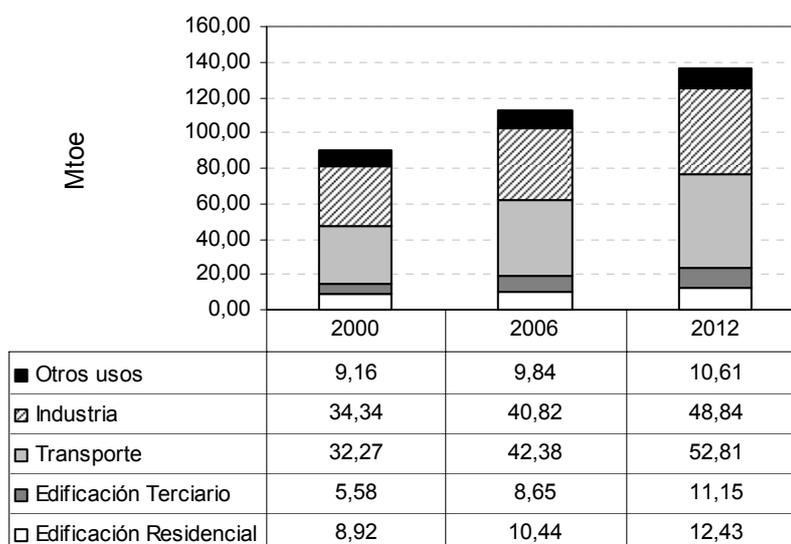


Figura 1.4. Evolución prevista del consumo de energía final en España. Fuente: Ministerio de Economía⁴

Por consiguiente, el sector edificación constituye un pilar importante hacia el que dirigir las actuaciones de política energética, como por ejemplo las medidas promovidas por los países de la Unión Europea de cara al cumplimiento de los objetivos fijados en el Protocolo de Kyoto.

⁴ Ministerio de Economía. Estrategia de ahorro y eficiencia energética en España. Noviembre de 2003.

1.2 Antecedentes

1.2.1 Directiva 2002/91/CE

Los compromisos adquiridos en el Protocolo de Kyoto obligan a los países de la Unión Europea a fomentar la eficiencia energética. Dado que el sector de la edificación constituye un consumo energético importante, el consejo de la Unión pidió que se tomaran medidas específicas para el mismo. Por ello, se publica el 4 de enero de 2003 la Directiva 2002/91/CE relativa a la eficiencia energética de los edificios. Esta obliga a los países miembros a su transposición antes de enero de 2006, permitiendo una extensión de tres años más para la aplicación de las disposiciones de los artículos 7, 8 y 9.

La Directiva exige que tanto los edificios nuevos como los existentes de unas ciertas dimensiones, sometidos a reformas importantes, deban cumplir unos requisitos mínimos de eficiencia energética, adaptados a las condiciones climáticas locales. Además, la Directiva obliga, en su artículo siete, a que *"cuando los edificios sean construidos, vendidos o alquilados, se ponga a disposición del propietario, o por parte del propietario, a disposición del posible comprador o inquilino, un certificado de eficiencia energética"*. Esto pone de manifiesto que este certificado será obligatorio tanto para edificios nuevos como existentes, en el caso de que se proceda a la venta o alquiler de estos últimos. De esta forma, la posible capacidad de actuación sobre el comportamiento energético de los edificios existentes, aparece ligada, exclusivamente, al certificado de eficiencia energética propuesto por la Directiva.

Se considera la certificación energética como una herramienta importante para potenciar la transformación del mercado y, aplicada a los edificios existentes de la manera adecuada, parece un buen mecanismo para promover, entre los propietarios y arrendatarios, la inversión en medidas de mejora de la eficiencia energética.

La definición oficial que la Directiva hace del certificado de eficiencia energética (artículo 2(3)) es la siguiente: "un certificado reconocido por el Estado miembro, o por una persona jurídica designada por él, que incluye la eficiencia energética de un edificio..." Dado que el concepto de eficiencia energética se define (artículo 2(2)) como "la cantidad de energía consumida realmente o que se estime necesaria para satisfacer las distintas necesidades asociadas a un uso estándar del edificio [...] Dicha magnitud deberá quedar reflejada en uno o más indicadores cuantitativos..." el primer paso en el proceso de certificación consistirá en la

caracterización energética del edificio, entendiéndose como tal, el proceso para la determinación de los indicadores cuantitativos, asociados al comportamiento energético del edificio.

De la definición dada sobre la eficiencia energética en el párrafo anterior se deduce que existen dos posibles vías para la obtención de la eficiencia energética de un edificio. Una de ellas es la que proporciona el consumo real del edificio, que estará constituida por un sistema de caracterización basado en medidas. La otra es la que facilita una estimación del consumo energético del edificio para unas condiciones estándar de uso (operación y consigna), por lo que requerirá de la implementación de un método de cálculo para la simulación del mismo.

Los resultados arrojados por un sistema de caracterización energética basado en medidas van a diferir siempre de los correspondientes a un sistema basado en simulación. Las razones que fundamentan esta afirmación son las siguientes:

- Un método de cálculo implica el desarrollo de un modelo que simule el edificio y sus sistemas, que siempre estará sujeto a simplificaciones.
- La construcción del edificio y la instalación de sus sistemas no siempre se corresponden con lo proyectado (existencia de superficies con escasez de aislamiento, deficiencias en la puesta en servicio de los sistemas de climatización, etc.)
- El edificio puede operar de una manera ineficiente (luces encendidas innecesariamente, consignas por encima de lo necesario, etc.), o simplemente de manera diferente a la simulada.
- Degradación, debida al paso del tiempo, de las eficiencias de los equipos y sistema de iluminación.

En el artículo sobre el certificado de eficiencia energética de la Directiva (artículo 7 (2)) se especifica lo siguiente: "El certificado de eficiencia energética de un edificio deberá incluir valores de referencia tales como la normativa vigente y valoraciones comparativas, con el fin de que los consumidores puedan comparar y evaluar la eficiencia energética del edificio." En él se describe el contenido del certificado de eficiencia energética, pero no se concluye nada acerca de los procedimientos a emplear para obtener estos resultados. Es por ello necesario desarrollar un procedimiento de evaluación, que permita valorar comparativamente cada uno de los indicadores energéticos calculados.

En el párrafo anterior, en el que se muestra el contenido del certificado según la Directiva, se pone de manifiesto que uno de los propósitos del certificado

de eficiencia energética es informar al posible comprador o inquilino sobre el comportamiento comparativo de las diferentes opciones posibles en el mercado, medido en términos de eficiencia energética. Es evidente que estas comparaciones deberán hacerse mediante una metodología común. Por ello, la única vía para realizar comparaciones entre edificios nuevos y existentes es mediante un procedimiento de evaluación único, basado en un sistema de caracterización energética vía simulación. Esto se debe a que el sistema de caracterización basado en medidas no es aplicable a edificios nuevos, mientras que la simulación se puede llevar a cabo tanto en edificios nuevos como existentes.

Al emplear un sistema de evaluación basado en simulación se procederá a comparar la eficiencia energética estimada del edificio para un uso estándar, con unos valores de referencia que pueden estar relacionados con la normativa vigente. Este sistema proporcionará, por tanto, una medida del comportamiento energético del edificio y de sus sistemas, sin tener en cuenta aspectos tan importantes como la operación, el mantenimiento y las posibles deficiencias durante la construcción y la instalación de los sistemas en edificios existentes. Esto puede ser suficiente, incluso conveniente, si se trata únicamente de informar al consumidor sobre la eficiencia energética de un edificio tal y como fue proyectado, pero si el objetivo es la mejora global de la eficiencia energética, un sistema de evaluación basado en medidas para la certificación de edificios existentes constituiría una buena oportunidad de actuación sobre aspectos importantes de la eficiencia energética como son la operación y el mantenimiento.

Un procedimiento basado en medidas puede proporcionar al propietario o inquilino información acerca del comportamiento energético de su edificio frente a otros de similares características, animándolos a invertir en la mejora de su eficiencia energética.

Haciendo referencia al contenido del párrafo 16 de la Directiva en el que aparece la siguiente recomendación: "... en la medida de lo posible, el certificado debe describir la situación real de la eficiencia energética del edificio y podrá ser revisado en consecuencia..." se pone de manifiesto un claro interés de la Directiva por informar acerca del consumo real de los edificios existentes, para lo cual habría que recurrir a un sistema de certificación basado en medidas.

Se demuestra, por tanto, que ambas vías, la basada en medidas y la basada en simulación, no pueden ser alternativas, aunque si complementarias. De hecho, el interés que muestra la Directiva por ambas opciones queda demostrado en los párrafos que se han analizado anteriormente. Por ello, el interés en desarrollar una

metodología tanto de caracterización energética como de evaluación posterior por ambas vías, medidas y simulación, queda claramente justificado.

En último lugar, la Directiva obliga a incluir en el certificado unas recomendaciones para la mejora de la relación coste-eficacia de la eficiencia energética. En este sentido, el empleo de un método de cálculo para la caracterización energética de los edificios presenta una ventaja en cuanto a la posibilidad de estimación de potenciales de ahorro, que puede llevarse a cabo a través de variaciones de los parámetros de entrada. Además, la herramienta de simulación permite obtener un desglose del consumo por usos (calefacción, refrigeración, agua caliente sanitaria e iluminación), que será muy útil para localizar los mayores potenciales de mejora. Pero también es cierto que el desglose por usos puede resultar poco realista si se utilizan durante la simulación patrones de uso muy diferentes a los reales, por lo que los potenciales de ahorro estimados también lo serán.

En el caso de desarrollar un sistema basado en medidas para el tratamiento de edificios existentes, es obvio que sólo se dispondrá de valores totales de consumos, siendo necesario un tratamiento de los datos medidos en función de la información que se disponga acerca de las características del edificio y su régimen de funcionamiento. En este caso se podrán cuantificar las mejoras reales alcanzadas entre periodos evaluados.

Las vías fundamentales para la disminución de las emisiones de CO₂ se dividen en dos bloques: el primero es el que se basa en la utilización de fuentes de energía renovables y el segundo es el encaminado en disminuir el consumo energético, ya sea mediante el aumento de la eficiencia energética de los sistemas consumidores de energía como mediante el ahorro directo del energía. Este ahorro puede venir dado a partir de edificios concebidos para un buen aprovechamiento energético, con aislamiento apropiado y aprovechando la energía solar. También puede potenciarse el ahorro energético mediante una operación correcta de los sistemas, asegurando un confort térmico pero sin derrochar energía.

Según la Directiva, la certificación energética debe evaluar la eficiencia energética y el ahorro potencial del edificio por lo que se debe obtener vía simulación, donde se establezcan unas condiciones de operación y consigna fijas. Hay que recordar que el periodo de validez de este certificado es de 10 años, por lo que debe hacer referencia a aquellos aspectos del edificio que tengan esa vigencia. La operación correcta de los sistemas consumidores de energía en un edificio es un

factor pasajero que depende mucho de las personas que ocupen el edificio en cada momento.

Pero la necesidad de actuar sobre edificios existentes exige medidas para potenciar el ahorro directo de energía, ya que otro tipo de mejoras orientadas a la transformación del propio edificio o de los sistemas que lo componen se encuentran limitadas en función del coste de las mismas. Para ello la simulación como método para la obtención del indicador energético a evaluar deja de lado la valoración de sobre el uso que se esté haciendo de los sistemas, ya que se propone un uso estándar en el modelo simulado. Sin embargo un método basado en medidas si valora el factor operacional, ya que el procedimiento obliga a analizar los consumos energéticos reales, procedentes de facturas o medidas. En este caso este certificado no tendría tanta validez para el futuro comprador, como se propone en la Directiva, como para el usuario de la vivienda. Podría tener un carácter voluntario e informativo para el usuario, facilitando datos relativos a su consumo energético y monetario, así como un análisis de los principales causantes de un consumo excesivo y determinadas propuestas de mejoras. También se podrían convertir en una herramienta de control del consumo energético y de premio a buenas conductas medioambientales (tipo energy star: Home Energy Analysis, capítulo dos, apartado 2.3.2)

1.2.2 Actuaciones sobre el sector de edificios existentes

Para cumplir con los compromisos del protocolo de Kyoto será necesaria una actuación sobre el sector de la edificación. En este sentido las posibilidades de mejora del consumo energético en el sector vienen condicionadas por el tipo de actuación y si esta se produce únicamente sobre los edificios nuevos o también sobre los edificios existentes.

La nueva reglamentación que actúa sobre la demanda energética de los edificios en España, sustituyendo a la antigua NBE CT 79, va a tener consecuencias importantes en la energética edificatoria del país. Los edificios nuevos que se construyan a partir de la entrada en vigor de la misma deberán cumplir nuevas exigencias relativas a la demanda energética.

Esta reglamentación tendrá efecto únicamente sobre edificios nuevos, y las posibles actuaciones sobre edificios existentes se reducen, hasta el momento, a las acciones promovidas por el Ministerio de Industria en el "*Plan de Acción 2005-2007 de la Estrategia de Ahorro y Eficiencia en España 2004-2012*", que se pueden resumir en las siguientes medidas:

- MEDIDA 1: Rehabilitación de la envolvente térmica de los edificios Existentes.
- MEDIDA 2: Mejora de la eficiencia energética de las instalaciones térmicas de los edificios existentes.
- MEDIDA 3: Mejora de la eficiencia energética de las instalaciones de iluminación interior en los edificios existentes.

Las medidas anteriores suponen un coste cuya gestión se repartirá entre las Administraciones Autonómicas y Locales, el Ministerio de la Vivienda, el Ministerio de Industria y el IDAE⁵. Los ahorros previstos para el periodo 2005 a 2007 suman un total de 640 ktep (ver Tabla 1.1), lo que constituye un ahorro del 3%, con respecto al consumo previsto en edificación para el 2007.

Tabla 1.1. Estimación de ahorros debido a actuaciones en edificios existentes (E4, periodo 2005-2007)

	Ahorro (ktep)	%Ahorro
MEDIDA 1	186	0.97%
MEDIDA 2	217	1.13%
MEDIDA 3	237	1.23%
	640	3.32%

La futura implantación de la certificación energética en edificios existentes, requerida por la Directiva, también va a constituir un mecanismo importante de actuación sobre el parque edificatorio existente si se lleva a cabo de la manera adecuada. En primer lugar, si se opta por certificar no sólo en base a simulación sino también en base a medidas, se dispondrá de los consumos energéticos de aquellos edificios que se certifiquen. Esto proporcionaría información acerca de los consumos energéticos asociados a este sector, lo que ayudaría a cuantificar y verificar los posibles ahorros producidos como consecuencia de determinadas políticas energéticas. Si además se ponen en práctica mecanismos que potencien la mejora energética de los edificios existentes, los ahorros obtenidos pueden llegar a ser importantes.

1.3 Objetivos y alcance de la tesis

Tras un análisis detallado del espíritu de la Directiva (ver apartado 1.2.1, página 4), en esta se expresa una necesidad clara de dar a conocer los consumos reales de los edificios existentes en cada país, y su valoración comparativa frente a otros edificios de similares características. Esto exigirá el desarrollo de una

⁵ Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. <http://www.idae.es>

metodología de caracterización y evaluación basada en medidas, y aplicable exclusivamente a edificios existentes.

En la situación actual no se dispone de datos fiables sobre el consumo energético de los edificios existentes en España. La información al respecto es dispersa e irregular, y, dada la falta de uniformidad, tanto en la cantidad como en la calidad de los datos disponibles, no se puede obtener una muestra representativa de la población. La presente tesis propone una solución a esta carencia, con el objetivo fundamental de asentar las bases para el estudio del comportamiento energético de la población de edificios existentes en nuestro país.

Se investigará acerca de los procedimientos más adecuados para la caracterización detallada del comportamiento energético de edificios existentes, basada en medidas y datos tomados del mismo.

Se desarrollará una metodología para la evaluación del comportamiento energético de edificios existentes, que dependerá de los datos disponibles sobre consumos energéticos en el país. Esta se centrará en el establecimiento de un escenario de comparación adaptado a las características del edificio a evaluar.

Se elaborarán procedimientos simplificados, alternativos a la simulación, para la estimación de potenciales de ahorro asociados a medidas de mejora de la eficiencia energética en edificios existentes.

Los resultados de la investigación serán aplicables a edificios del sector residencial y a edificios del pequeño terciario. Quedan excluidos los grandes edificios del sector terciario, ya que, debido a su gran diversidad y complejidad, deberán ser tratados de manera independiente.

1.4 Estructura de la tesis

1.4.1 Capítulo 2

En el capítulo segundo se lleva a cabo una revisión y análisis detallado de los sistemas de certificación de edificios existentes implantados actualmente en distintos países, tanto de la Unión Europea como del resto del mundo. El objetivo fundamental de esta investigación previa es el de analizar las distintas variables implicadas en los procesos de certificación existentes, así como determinar las ventajas e inconvenientes de cada sistema y su posible aplicabilidad para España.

La clasificación general y el análisis de los sistemas de certificación revisados, se ha llevado a cabo según los siguientes aspectos:

- Tipos de edificios evaluados.
- Sectores edificatorios evaluados.
- Método de cálculo empleado para la obtención del consumo.
- Datos requeridos para la evaluación del consumo.
- Usos energéticos evaluados.
- Criterios para la evaluación del edificio.
- Resultados aportados.
- País de aplicación.
- El carácter obligatorio o voluntario del mismo.
- Enfoque de la certificación.

1.4.2 Capítulo 3

En el tercer capítulo se establecen los procedimientos para la obtención de los indicadores energéticos de edificios existentes, a partir de medidas y datos tomados del propio edificio. La problemática fundamental parte del hecho de que las medidas sólo arrojan valores totales de consumos. Por ello, para que quede identificado correctamente el comportamiento energético del edificio, será necesario proceder a la segregación por usos (calefacción, refrigeración, agua caliente sanitaria, iluminación y otros) del consumo total. En este capítulo se muestran los posibles métodos a emplear para llevar a cabo la segregación por usos de los datos medidos.

Otro aspecto importante a considerar es la determinación de la demanda energética. Este posible indicador energético tampoco se puede determinar de forma directa a partir de medidas. Esto obliga a que se requiera de un nuevo tratamiento de las medidas, una vez se haya producido la segregación por usos. Para ello será necesario desarrollar un procedimiento que determine el rendimiento medio estacional de los sistemas, tanto de climatización como de agua caliente sanitaria. Multiplicando este rendimiento medio por el consumo asociado al uso energético correspondiente, se obtendrá la demanda energética. En este capítulo se propone un método para la determinación de los rendimientos medios. Para ello, será necesario conocer una serie de datos sobre los equipos que forman el sistema. Estos datos son el rendimiento instantáneo, la capacidad nominal y las curvas de variación de la eficiencia con la carga parcial y con las condiciones exteriores.

Para poder llevar a cabo una buena estimación del rendimiento medio, se ha realizado un estudio acerca del comportamiento a carga parcial de los edificios del sector residencial.

La obtención del consumo energético segregado por usos, del rendimiento medio estacional asociado a los sistemas del edificio y, consecuentemente, de la demanda energética, muestra una caracterización detallada del comportamiento energético del edificio, permitiendo la identificación de los consumos excesivos y de las causas de los mismos. Esto permitirá guiar el proceso de elaboración de recomendaciones acerca de medidas de mejora.

1.4.3 Capítulo 4

En el siguiente capítulo de la tesis se aborda la metodología de evaluación del comportamiento energético de los edificios existentes. Una vez elegidos los indicadores energéticos que se vayan a considerar en la certificación, es necesario establecer el conjunto de valores o de edificios que permitan obtener el escenario de comparación necesario para llevar a cabo el proceso de evaluación.

Para obtener el escenario de comparación será necesario decidir con anterioridad el grado de similitud entre este y el edificio objeto, es decir, contra quién se va a comparar el edificio durante su evaluación. Por ejemplo, se podría decidir, como ocurre en la mayoría de los sistemas de certificación en curso, establecer un escenario de comparación distinto para cada tipo de edificio (residencial y no residencial), en este caso el grado de similitud existente entre el edificio objeto y el escenario de comparación empleado sería el tipo de edificio. Este factor, tipo de edificio, se mantendría invariante dentro del escenario de comparación, por lo que el edificio objeto se compararía sólo con otros de su mismo tipo. En la tesis se analizarán las implicaciones que el grado de similitud tiene sobre el posible escenario de comparación.

Se ha observado que en la mayoría de los sistemas de certificación existentes, la determinación del grado de similitud pretende evitar situaciones de desigualdad. Por ejemplo, el empleo de la discriminación climática es muy común en países con diversidad de climas, por ejemplo Estados Unidos, generándose un marco de comparación distinto para cada clima o localidad. Por el contrario, en otros países como Dinamarca y Reino Unido, dónde la diversificación climática no es muy acusada, no se considera la variación del escenario de comparación con el clima. En el caso de España, dada su variedad climática, sería conveniente emplear un sistema con discriminación climática.

Existen varios procedimientos para la obtención del escenario de comparación, que dependerán, fundamentalmente, de la existencia o no de una estadística amplia acerca de los consumos energéticos del país. En la tesis se detallan cada uno de ellos, permitiendo una adaptación progresiva a la situación de España desde el estado actual, en el que no existe una base de datos adecuada sobre consumos energéticos en edificios, hasta un futuro en el que se haya desarrollado.

El objetivo final es la obtención de una distribución de consumos, que constituirá el escenario de comparación para el edificio objeto. La posición del consumo del edificio objeto dentro de esta distribución determinará su situación frente a otros edificios similares, siendo evaluado en consecuencia.

La obtención del escenario de comparación para la situación actual de España, en la que no se dispone de estadística sobre consumos energéticos, requiere, por un lado, ajustar y adaptar la forma de la distribución de consumos obtenida en otros países a España, y por otro lado, obtener unas leyes teóricas que representen la variación de los consumos de referencia en función del clima. Esto permitiría obtener la distribución del consumo, o escenario de comparación, para cada clima.

1.4.4 Capítulo 5

Dado que no existe una población conocida sobre consumos de edificios en España, no será posible obtener las distribuciones de consumos a partir de datos estadísticos. Por consiguiente será necesario ajustar y adaptar la forma de la distribución de consumos obtenida en otros países al caso de España.

En este capítulo se describe el procedimiento seguido para asignar un modelo de probabilidad a una muestra de datos de consumos reales, procedente de otros países, de forma que el modelo elegido pueda interpretarse como la población de la que proceden esos datos.

Además de buscar la distribución que mejor se ajusta a los datos de consumos disponibles, se describe el procedimiento para la obtención de la distribución de consumos a partir de una serie de parámetros característicos. Esto permitirá adaptar la forma de la distribución a las diversas localidades españolas, de acuerdo con la información disponible sobre consumos en cada una de ellas.

1.4.5 Capítulo 6

En el capítulo sexto de la tesis, se propone una metodología que responde al requerimiento de la Directiva acerca de las recomendaciones sobre medidas de mejora a incluir en el certificado de eficiencia energética. Para ello se propone desarrollar un catálogo de medidas viables técnicamente y rentables económicamente. En este caso se debe recurrir a la simulación de diversos escenarios caracterizados para distintos tipos de edificios, climas y características de la construcción y de sus sistemas.

Se propone un procedimiento para la selección de aquellas recomendaciones con un mayor impacto sobre la eficiencia energética del edificio. Este procedimiento recurrirá a los datos de consumos segregados por usos y separados en demanda y rendimiento, obtenidos según el procedimiento de caracterización explicado en el tercer capítulo de la tesis.

También se desarrollan dos metodologías simplificadas para la estimación de los potenciales de ahorro asociados a diversas medidas de mejora como son: la sustitución o puesta a punto de equipos de refrigeración y calefacción, y la variación del nivel de aislamiento del edificio. Además de una revisión de los potenciales de ahorro asociados a actuaciones sobre posibles fallos o problemas que, comúnmente, suelen darse en las instalaciones de climatización de edificios residenciales.

Con todo ello se puede elaborar el catálogo de medidas de mejora para diversas circunstancias. Es decir, esta lista de medidas se adecuará a los distintos tipos de edificios, climas y características de la construcción y de sus sistemas.

1.4.6 Capítulo 7

Para terminar, todas las conclusiones y aportaciones obtenidas durante el desarrollo del trabajo se resumen en este último capítulo. Donde también se plantearán las líneas de desarrollo que han quedado abiertas a futuros estudios.

CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE

2.1 Introducción

La evaluación energética de un único equipo, como es el caso del etiquetado energético de los electrodomésticos propuesto por la Directiva 92/75/CEE⁶, es relativamente sencilla. Se trata de medir consumos anuales en determinadas condiciones fijadas por normativa. Por medio de una escala de clases (de la A a la G), se ofrece información sobre el grado de eficiencia energética del electrodoméstico, en comparación con otros electrodomésticos similares. Para ello se corregirá el consumo en función de las características del equipo. Por ejemplo, para obtener el Índice de eficiencia energética de los frigoríficos (Real Decreto 1326/1995), se lleva a cabo una normalización del consumo energético anual en función del volumen y del número de estrellas del mismo.

Pero, para proceder a la evaluación energética de edificios, tal y como exige la Directiva 2002/91/CE, se deberá recurrir a otros procedimientos. La gran complejidad y diversidad de los mismos impide proponer ensayos debido a los altos costes asociados.

En general, los métodos de evaluación energética de edificios tratan de evaluar, en términos comparativos, la eficiencia energética de un edificio. Teniendo en cuenta que la eficiencia energética se define según la Directiva 2002/91/CE como *"la cantidad de energía consumida realmente o que se estime necesaria para satisfacer las distintas necesidades asociadas a un uso estándar del edificio"*, será necesario establecer una metodología de cálculo de la eficiencia energética de los

⁶ Directiva 92/75/CEE⁶ del Consejo, de 22 de septiembre de 1992, relativa a la indicación del consumo de energía y de otros recursos de los aparatos domésticos, por medio del etiquetado y de una información uniforme sobre los productos

edificios que, según el Anexo de la Directiva 2002/91/CE, deberá integrar una serie de aspectos, entre los que figuran por ejemplo las características térmicas de los edificios.

La calidad energética de un determinado edificio se establece siempre de forma relativa, es decir comparando cómo se comporta dicho edificio en relación con otros situados en la misma localidad, que pertenecen al mismo sector edificatorio (residencial, hoteles, oficinas...) y que presentan características análogas tales como compacidad o características ocupacionales y funcionales, incluyendo la distribución temporal de las mismas.

En la actualidad existen diversos sistemas de certificación funcionando en algunos países tanto de Europa, Dinamarca y Reino Unido, como de Estados Unidos, existiendo diferencias entre los esquemas seguidos en cada caso que se explicarán y analizarán en el siguiente documento.

La clasificación general de los sistemas de certificación revisados se puede realizar en función de los siguientes aspectos:

- Tipos de edificios evaluados.
- Sectores edificatorios evaluados.
- Método de cálculo empleado para la obtención del consumo.
- Datos requeridos para la evaluación del consumo.
- Usos energéticos evaluados.
- Criterios para la evaluación del edificio.
- Resultados aportados.
- País de aplicación.
- El carácter obligatorio o voluntario del mismo.
- Enfoque de la certificación.

Los tipos de edificios evaluados pueden ser nuevos o existentes. En el caso de que los edificios evaluados sean de nueva construcción, el consumo energético se calculará de forma teórica, estimando para ello las condiciones ocupacionales y funcionales del edificio, así como las características del sistema de climatización e iluminación. En este caso toda la información técnica acerca del edificio, necesaria para llevar a cabo la certificación, se puede obtener con relativa facilidad a partir de los datos del proyecto.

Si por el contrario el edificio ya se encuentra construido y habitado, la certificación deberá tener en cuenta los actuales niveles de consumo, que dependerán no sólo de las características constructivas del edificio, entendiendo

como tales el conjunto de propiedades que describen la calidad térmica de la envuelta, la compacidad, la orientación y los elementos de sombra que componen el edificio, sino de las características ocupacionales y funcionales reales del edificio, además de otros aspectos como son la operación y el mantenimiento de los sistemas de climatización e iluminación existentes.

En cuanto a la recopilación de la información técnica necesaria para llevar a cabo la certificación, supondrá un coste mayor en el caso de los edificios existentes, ya que deberá realizarse una tarea de inspección en campo para obtenerla, pues generalmente los propietarios de los edificios no disponen de esta información. La cantidad de información necesaria dependerá del grado de detalle con el que se defina el sistema de certificación, pudiendo necesitar en ocasiones realizar ensayos destructivos en el edificio, como por ejemplo perforaciones en muros y forjados para determinar el tipo de aislamiento empleado.

Sobre los métodos de cálculos empleados en los distintos esquemas de certificación de edificios existentes, denominados en la presente tesis métodos de caracterización energética, es necesario destacar la importancia de estos durante el desarrollo de los mismos, con el objetivo de reducir el número de datos requeridos para la evaluación del edificio y también debido al hecho de que en muchos casos no es posible disponer de los consumos energéticos para cada uno de los usos que vayan a ser evaluados.

Por tanto, los métodos de cálculo empleados para los modelos de certificación pueden responder a distintos objetivos como son:

- Estimación de necesidades energéticas del edificio
- Normalización/corrección del consumo energético medido del edificio en función del clima y del uso para poder compararlo con un comportamiento energético estimado, de diseño o histórico (vía estadística).
- Estimación de potenciales de ahorro energético asociado a propuestas de mejora.

Los modelos para la estimación del consumo energético de los edificios utilizados en los distintos sistemas de certificación van desde procedimientos basados en medidas tomadas de contadores energéticos, hasta modelos dinámicos de simulación, teniendo en cuenta que será necesaria la incorporación de algún método que permita la estimación de los ahorros, siempre que el sistema de certificación se diseñe con el objetivo de proponer medidas de ahorro energético entre sus resultados.

Dentro de los métodos de calificación existentes aparecen diversas maneras de abordar cada uno de estos conceptos. Muchas alternativas dependen fuertemente del modo de obtención de la variable calificativa. En función de cómo se obtenga el valor de variable los métodos se clasifican en dos grandes grupos:

- Métodos de "Caja negra": son aquellos que se basan en datos medidos. Mediante análisis estadísticos de los resultados de medir simultáneamente consumos energéticos y algún parámetro de control (como la temperatura exterior), se puede llegar a deducir la normalización en función del clima del comportamiento energético del edificio. Un ejemplo de este tipo de métodos son los denominados métodos de la firma energética (F.Flouquet, 1992).
- Métodos analíticos: en los que el consumo es obtenido mediante un modelo teórico. En función de variables de diseño y de las características del sistema de climatización, se calcula el consumo energético. Además, se puede normalizar el consumo usando las características climáticas establecidas por la norma.

Por otro lado los métodos pueden diferir de un país a otro en función de la existencia de estudios, previos o en desarrollo, sobre el consumo energético en el parque edificatorio.

Los sistemas de certificación existentes pueden evaluar usos energéticos diferentes. Existe la posibilidad de evaluar los consumos de calefacción, refrigeración, iluminación, agua caliente sanitaria, electrodomésticos (sector residencial) y equipos de oficina (sector no residencial).

En cuanto a los resultados principales que pueden calcular los distintos esquemas de certificación existentes se pueden resumir los siguientes:

- Consumo de energía final.
- Demanda de energía.
- Consumo de energía primaria.
- Coste energético.

En algunos esquemas se calculan otros datos adicionales como son las emisiones de CO₂, otras emisiones (SO₂ y NO_x) y consumo de agua.

Esta revisión se va a centrar en todos aquellos esquemas de certificación empleados para evaluar edificios existentes, distinguiendo también entre aquellos esquemas que trabajan con el sector residencial o el no-residencial.

En primer lugar se van a presentar las características generales de todos aquellos sistemas de certificación que estén funcionando dentro de la Unión Europea para, posteriormente, extender la revisión a otros países fuera del entorno europeo pero con procesos de certificación ampliamente implantados y desarrollados, como es el caso de Estados Unidos y Canadá.

2.2 Fundamentos de los métodos de evaluación

Teniendo en cuenta que la certificación energética se establece siempre de forma relativa, es decir comparando cómo se comporta un edificio en relación con otros, será necesario escoger cuál será el grado de similitud entre el edificio a calificar (edificio objeto) y los edificios contra los que se va a comparar. Estos podrían estar situados en la misma localidad, pertenecer al mismo sector edificatorio (residencial, hoteles, oficinas...) y presentar características análogas tales como compacidad o características ocupacionales y funcionales, incluyendo la distribución temporal de las mismas. Esta decisión condicionará decisivamente la metodología a seguir para el desarrollo del procedimiento de evaluación así como la calificación obtenida por el edificio, un mismo edificio no calificaría igual si se compara con el total de la población de edificios españoles que si se compara únicamente con los edificios de su sector y de su localidad.

En este documento se explicará cómo influye el grado de similitud sobre estos factores y se discutirán los posibles grados de similitud que pueden presentarse.

Además de las discusiones acerca del grado de similitud entre edificio objeto y los edificios que constituyan el marco de comparación, este documento incluye la descripción y el análisis de los tres conceptos fundamentales existentes dentro de cualquier procedimiento de certificación/calificación, que serán los siguientes:

- **La variable calificativa (indicadores energéticos)**, o el conjunto de variables susceptibles de ser evaluadas o comparadas.
- **El escenario de comparación**, constituido por el grupo de edificios (o el grupo de valores) que permitan generar un marco de comparación mediante la obtención de una distribución de la variable calificativa.
- **La escala de puntuación**, o los criterios y límites escogidos para dar una determinada puntuación a un edificio cuando su variable calificativa sea cotejada dentro del escenario de comparación.

2.2.1 Indicadores energéticos

Un indicador se puede definir como un parámetro, o un valor derivado de una serie de parámetros, que proporciona información acerca de un determinado hecho. El indicador muestra un significado mas allá del directamente asociado a su valor (Flanders, 2000). El indicador puede ser una herramienta útil en el campo de la energética edificatoria, ya que permite simplificar, cuantificar y resumir, mediante un único parámetro, gran parte de la información energética de un edificio.

La definición del indicador energético puede variar en función de los objetivos perseguidos. Existen diferencias entre los sistemas de certificación en función del tipo de indicador empleado para la evaluación energética del edificio. Este puede tener un carácter global, representando el consumo energético del edificio, o puede ser parcial, cuantificando alguno de los aspectos que afectan al consumo energético como por ejemplo la envolvente del edificio.

En el caso de optar por indicadores globales del consumo energético se puede diferenciar entre los esquemas de certificación en los que se evalúa el uso energético en términos de energía primaria y los que lo hacen en términos de energía final.

El primer tipo de esquemas, en los que el consumo se mide en el origen de la cadena energética, responde, generalmente, a criterios políticos para cubrir objetivos energéticos en el ámbito nacional. En este caso sería necesario estimar unos coeficientes de paso de energía final a energía primaria para cada región o país.

Tabla 2.1. Ejemplo de coeficientes de paso de Energía Final a Energía Primaria (kWh E.P./ kWh E.F.) por tipo de energía para España.

<i>Carbón</i>	<i>GLP</i>	<i>Gasoleo</i>	<i>Fueloil</i>	<i>G.N.</i>	<i>Biomasa</i>	<i>Electricidad</i>
1	1	1	1	1	1	2.9 ⁷

Existen dos variantes de esta alternativa que califican en función del nivel de emisiones de CO₂ correspondientes al consumo de energía primaria o al coste energético. Para obtener estos valores habría que tener en cuenta los coeficientes de paso a emisiones o las tarifas energéticas respectivamente, en función del tipo de energía utilizada. Como ejemplo se muestra en la Tabla 2.2 los valores de las tarifas energéticas empleadas por el método SAP (BRE, Julio 2001) para la

⁷ Coeficientes de pérdidas por transporte y distribución de la energía eléctrica tomados del anexo V del Real decreto 1483/2001, de 27 e diciembre, por el que se establece la tarifa eléctrica para el 2002.

obtención del coste energético, obtenidas a partir de los valores medios de los tres años anteriores al 2001, y los coeficientes de paso a emisiones de CO₂. Ambas tablas son usadas por el método SAP para la determinación del coste energético, en el primer caso, y del índice de emisiones (“Carbon Index”) en el segundo.

Tabla 2.2. Tarifas energéticas y coeficientes de paso de energía final a emisiones de CO₂ empleadas en el método SAP (Reino Unido).

	standing charge (£)	(£/GJ)		kg CO ₂ per GJ
Gas (mains)	28	3.74	Gas (mains)	54
Bulk LPG	57	8.22	Bulk LPG	69
Bottled gas – propane 47 kg cylinder		11.02	Bottled gas (propane)	69
Heating oil		4.53	Heating oil	75
House coal		4.62	House coal	81
Smokeless fuel		7.46	Anthracite	88
Anthracite nuts		5.15	Smokeless solid fuel	109
Anthracite grains		5.16	Electricity	115
Wood		4.50	Wood	7
Electricity (on-peak)		20.80	Household waste	12
Electricity (off-peak)	16	7.93	Biomass	7
Electricity (standard tariff)		19.69	Biogas (landfill)	7
Electricity 10 hour tariff (on-peak)		16.50	Waste heat from power stations	5
Electricity 10 hour tariff (off-peak)	15	8.75		
Electricity (24-hr heating tariff)	48	8.97		
Community scheme	28			
Heat from boilers (any fuel)		4.55		
Heat from CHP or waste heat		3.17		
Energy cost inflator	1.05			

En el caso de emplear como indicador el consumo de energía final, se estarán evaluando las calidades tanto de la envuelta como aquellos sistemas activos del edificio evaluables dentro del procedimiento de certificación, que generalmente se reducen a los sistemas de calefacción y refrigeración, pudiendo extenderse en algunos esquemas a otros usos como son el agua caliente sanitaria y la iluminación. El conocimiento de los consumos parciales de energía puede proporcionar una información muy útil, que oriente sobre las deficiencias o virtudes de un determinado edificio, permitiendo proponer mejoras sobre el edificio que puedan aumentar su calificación. También podrían establecerse algunas limitaciones sobre los consumos energéticos asociados a ciertos usos. En la mayoría de los casos la división del consumo en sus diferentes usos de energía será una tarea necesaria para la implementación de los distintos procedimientos.

El indicador del comportamiento energético propuesto por la normativa europea (prEN15203, 2005) se corresponde con la suma ponderada del consumo anual de todas las fuentes de energía dividido entre la superficie total acondicionada del edificio.

El consumo energético expresado en términos de energía final presenta una relación directa con los valores procedentes de las facturas energéticas, siendo

estas últimas un elemento importante a tener en cuenta en el caso de evaluar edificios existentes. En este sentido es importante destacar que si se decide evaluar el edificio en función de datos procedentes de facturas, la calificación obtenida no va a depender únicamente de las características de la envuelta y de los sistemas instalados en el edificio, sino que también va a considerar el uso que se hace de los mismos, tanto en la operación como en el mantenimiento. Por ello es necesario especificar si se va a considerar dentro de la certificación estos aspectos o, por el contrario, se va a evaluar únicamente el comportamiento del edificio y de sus sistemas desde el punto de vista energético, en definitiva se trata de decidir si se va a certificar el edificio, su uso o ambas cosas (Cohen R y otros, 2002).

Para ello hay que conocer previamente cuáles son los aspectos que afectan de forma relevante a la eficiencia energética del edificio. El diseño de la epidermis; el sistema de climatización empleado y el comportamiento de los ocupantes son los tres aspectos fundamentales que afectan al comportamiento energético del edificio. Tanto las características de la epidermis como de los sistemas de climatización son identificables y pueden medirse con relativa facilidad, pero es el comportamiento de los ocupantes, es decir, la operación del edificio, lo que presenta mayor incertidumbre, ya que puede presentar un alto grado de variación, que si no es convenientemente registrado y representado, dada su participación en el proceso de obtención de los indicadores energéticos, podrían aparecer resultados inesperados. Por ejemplo, un edificio puede presentar un bajo consumo energético a expensas de una falta de confort térmico en las zonas. Esto podría ocurrir en aquellos casos en los que la temperatura de consigna no se ha fijado adecuadamente.

Existen esquemas en los que el indicador escogido es la demanda energética del edificio. En este caso la evaluación queda restringida a la calidad de la envuelta del edificio, quedando excluidos de la calificación todos los aspectos relacionados con el rendimiento de los sistemas de climatización. Esta alternativa puede ser interesante para calificar edificios nuevos que se entreguen sin sistemas de climatización, aportando información al usuario acerca de la calidad térmica del edificio.

Existen algunos esquemas de certificación que puntúan al edificio en función de otros aspectos además de los relacionados con las variables anteriormente indicadas. Se trata de métodos que desarrollan múltiples criterios para evaluar no sólo los niveles de consumo energético del edificio sino también la calidad del ambiente interior, el uso del agua, la relación con el entorno (transportes,

localización,...), el impacto ambiental y sobre la salud pública, el ciclo de vida del edificio y sus materiales, ...

Algunos de los ejemplos mas significativos de estos tipos de sistemas de certificación son el método BREAM (BRE, 1990) y el LEED (US Green Building Council, 2005). En ambos casos la necesidad de justificar la puntuación obtenida en cada una de las categorías requiere una laboriosa labor de recopilación de información, que posteriormente debe ser contrastada y certificada por personal cualificado, sería equivalente a presentar el "currículum" del edificio donde cada uno de los méritos aportados respondiesen a los requisitos necesarios para puntuar, presentando para cada uno de ellos la documentación requerida que lo justifique.

2.2.2 Métodos de cálculo

Dado que los edificios evaluados pueden ser nuevos o existentes, existirán diferencias en cuanto al método empleado para la obtención de los indicadores energéticos. En el caso de que los edificios evaluados sean de nueva construcción, el consumo energético se calculará de forma teórica, estimando para ello las condiciones ocupacionales y funcionales del edificio, así como las características del sistema de climatización e iluminación. En este caso toda la información técnica acerca del edificio, necesaria para llevar a cabo la certificación, se puede obtener con relativa facilidad a partir de los datos del proyecto.

Si por el contrario el edificio ya se encuentra construido y habitado, la certificación deberá tener en cuenta los actuales niveles de consumo, que dependerán no sólo de las características constructivas del edificio, entendiendo como tales el conjunto de propiedades que describen la calidad térmica de la envuelta, la compacidad, la orientación y los elementos de sombra que componen el edificio, sino de las características ocupacionales y funcionales reales del edificio, además de otros aspectos como son la operación y el mantenimiento de los sistemas de climatización e iluminación existentes.

Para el caso de edificios de nueva construcción o edificios existentes con reformas importantes sólo cabe la posibilidad de estimar su comportamiento energético mediante el uso de un método de cálculo, de acuerdo con el marco general que se expone en el anexo de la directiva. Este procedimiento genera una medida del comportamiento energético intrínseco del edificio, evaluando la calidad constructiva, de los servicios y del control para un patrón de uso y un clima estándar.

Cuando se pretende evaluar el comportamiento energético de edificios existentes se abre una nueva vía que habrá que considerar y es el empleo de medidas realizadas en el propio edificio. En este caso el procedimiento genera una medida del comportamiento real y actual del edificio, evaluando la calidad constructiva, de los servicios y del control para el patrón de uso y el clima real, en este caso se estará evaluando tanto la operación como el mantenimiento llevado a cabo en el edificio.

Las predicciones del consumo energético mediante métodos de cálculo arrojan resultados diferentes al consumo real que se pueda medir del edificio, estas diferencias se deben principalmente a lo siguiente:

- La representación del edificio y de los sistemas de calefacción y refrigeración en el modelo de cálculo se encuentra simplificada
- Existen discrepancias entre el proyecto del edificio y de las instalaciones y su construcción
- El edificio no opera en la forma más eficiente

A continuación se detallarán las ventajas e inconvenientes, tanto de las medidas como de la simulación, como procedimientos alternativos para la obtención del indicador del comportamiento energético.

1. Ventajas e inconvenientes frente a datos de entrada

En cuanto a la recopilación de la información técnica necesaria para llevar a cabo la certificación, supondrá un coste mayor en el caso del empleo de la simulación, ya que deberá realizarse una tarea de inspección en campo para obtenerla, pues generalmente los propietarios de los edificios no disponen de esta información. La cantidad de información necesaria dependerá del grado de detalle con el que se defina el modelo de cálculo. Además, en este caso existirá una incertidumbre respecto a los datos de entrada, tanto constructivos como operacionales, que se podría salvar mediante el empleo de reglas de inferencia.

Si se opta por la vía de medidas se requerirán encuestas que complementen la información acerca del edificio, ya que en este caso el patrón de uso empleado es el real y es necesario conocerlo para corregir el consumo medido y pasarlo a condiciones estándar. Estas encuestas presentan un riesgo en cuanto a la certificación de viviendas, ya que se pueden falsear fácilmente exagerando el uso para conseguir un mejor resultado en la certificación.

También es necesario el conocimiento de los datos climáticos correspondiente al periodo medido, para corregir en función de los mismos y poder comparar las viviendas de una misma localidad dentro de un escenario común.

2. Ventajas e inconvenientes frente a resultados

Así como la simulación permite la estimación de potenciales de ahorro a través de variaciones de los parámetros de entrada al modelo de cálculo, las medidas no presentan esta posibilidad, si bien informan acerca del consumo real del edificio y, con un tratamiento adecuado, de las posibles mejoras alcanzadas entre periodos evaluados.

En cuanto a la riqueza de la información proporcionada con cada uno de los métodos, es la simulación la que proporciona un desglose del consumo por usos, mientras que las medidas sólo arrojan resultados totales, requiriendo una desagregación posterior en base a la información que se disponga acerca de las características del edificio y su régimen de funcionamiento. A pesar de ello también es cierto que el desglose por usos proporcionado por la simulación puede ser poco realista, ya que usa patrones de uso estándar, que pueden estar muy alejados del real.

2.2.3 Escenario de comparación

Una vez escogida la variable que califica es necesario establecer el conjunto de valores o de edificios que permitan obtener el marco de referencia necesario durante el proceso de evaluación. La constitución de un escenario de comparación, o referencia, adecuado es muy importante, ya que este establece la base para el desarrollo del baremo en todo proceso de evaluación.

En general se podrían diferenciar dos tipos de referencia, la interna y la externa. La referencia interna se basa en el comportamiento del propio edificio y la referencia externa se basa en factores externos.

El escenario de comparación basado en referencias internas se emplea para comparar el edificio consigo mismo en otras circunstancias. Un ejemplo podría ser el consumo de un mismo edificio bajo unas características ocupacionales y funcionales diferentes, o sujeto a distintos años meteorológicos. El empleo de referencias internas tiene mucha utilidad a la hora de evaluar el alcance de medidas de ahorro implantadas en el edificio, comparando su comportamiento antes y después de la medida.

Un escenario de comparación basado en referencias externas servirá para evaluar el comportamiento energético de un edificio en relación a la población de edificios de similares características. Un ejemplo de referencia externa sería el consumo medio de los edificios de similares características al evaluado y en el mismo país o localidad. Otro ejemplo de referencia externa es el que propone la norma europea prEN 15217 (CEN prEN 15217, 2005). En su apartado número siete, propone que la evaluación del comportamiento energético de los edificios, necesaria para la certificación, se realice teniendo en cuenta las siguientes referencias:

- Referencia relativa a la normativa: se corresponde con el valor límite de consumo que cabe esperar de edificios nuevos similares al edificio objeto, conformes a la reglamentación vigente en 2006.
- Referencia relativa al stock: se corresponde con el valor de consumo que cabe esperar sea alcanzado por el 50% del parque de edificios existentes similares al edificio objeto.
- Referencia cero: se corresponde con edificios que producen más energía de la que usan.

Ambos tipos de referencia tienen su utilidad, pero para la certificación energética de edificios que ha de llevarse a cabo es la referencia externa la más adecuada, tal y como propone la norma europea prEN 15217, y será la que se detalle en este apartado.

1. Escenario construido a partir de datos estadísticos

En este caso se compara el consumo de un edificio existente con una distribución de consumos característica de ese edificio, obteniendo una determinada puntuación en función del porcentaje de edificios que consuman por encima de él. Para poner en práctica este procedimiento será necesario implantar en el país campañas de monitorización de datos durante unos años para poder elaborar la estadística correspondiente.

Un ejemplo de ello son las bases de datos disponibles sobre consumos energéticos de edificios de EE.UU. (CBECS⁸ y RECS⁹). Estas se han tomado de las encuestas realizadas por la Agencia de Información Energética (EIA) para el Departamento de Energía (DOE) de Estados Unidos desde el año 1987. Estas encuestas reúnen información acerca de las características físicas de los edificios,

⁸ Commercial Buildings Energy Consumption Survey. <http://www.eia.doe.gov/emeu/cbecs/contents.html>

⁹ Residencial Energy Consumption Survey. <http://www.eia.doe.gov/emeu/recs/contents.html>

de sus patrones de uso y ocupación, de los principales equipos empleados y de los tipos de energía utilizados para cada uso posible. Como ejemplo se muestran en la figura siguiente las distribuciones de consumos para cada uno de los usos energéticos obtenida a partir de la base de datos RECS, correspondiente a edificios residenciales.

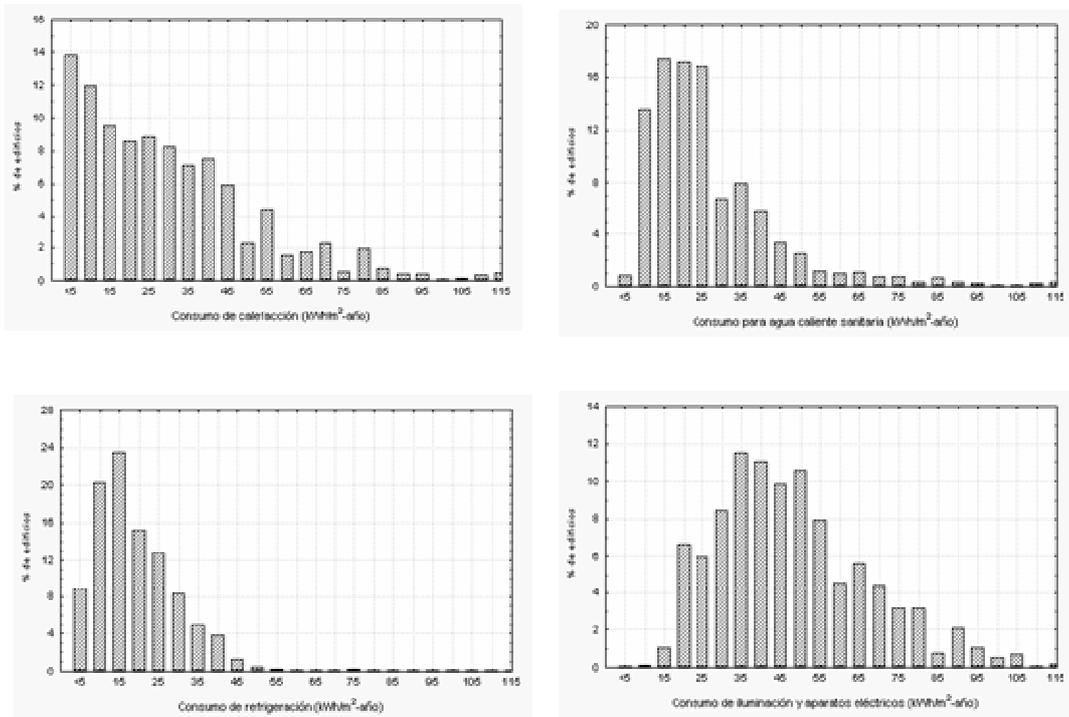


Figura 2.1. Ejemplo de distribuciones de consumos anuales en kWh/m² para los distintos usos procedentes de la base de datos RECS.

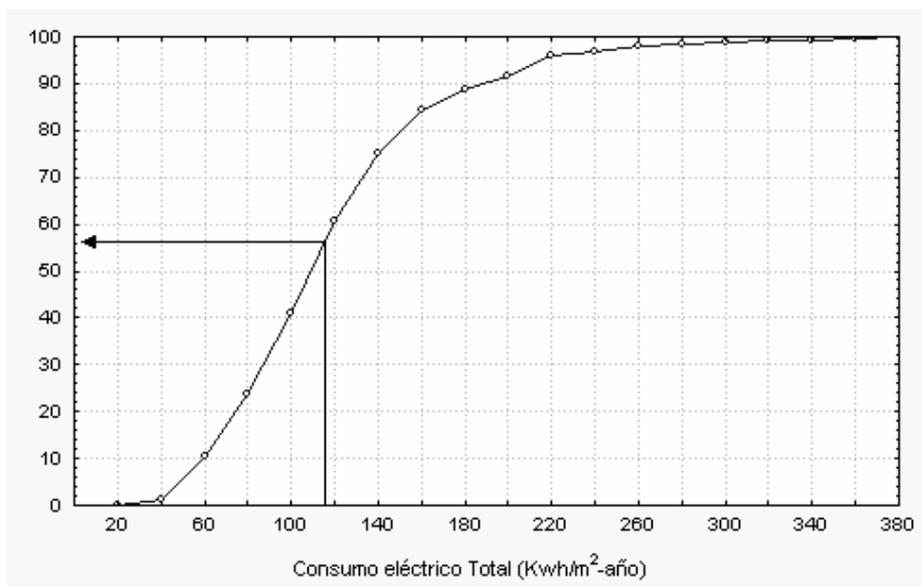


Figura 2.2. Distribución de frecuencias acumuladas del consumo eléctrico total. Viviendas unifamiliares. EE.UU.

La distribución de frecuencias acumuladas podría establecer un buen escenario de comparación debido a que representaría a la población real de edificios, que, como se observa en la figura 14, aparece como una curva que presenta un cambio de pendiente, en lugar de una distribución lineal que se mueva entre dos niveles de consumo. De esta forma la posible mejora de la calificación por parte de un edificio no requerirá la misma disminución del consumo en todos los puntos, es decir, la mejora conseguida, según este marco de comparación, no es proporcional a la disminución del consumo que conseguir el edificio objeto.

Además este método asegura una independencia de la calificación de los valores extremos, es decir, de los posibles consumos máximos y mínimos. Si la referencia se construyera a partir de estos dos valores de consumos, una variación de cualquiera de ellos influiría fuertemente en la calificación, ya que se generaría una nueva escala de puntuación totalmente distinta a la original.

En la que se puede ver un ejemplo de cómo al escoger entre dos posibles valores máximos de consumos ($175 \text{ kWh/m}^2\text{-año}$ y $200 \text{ kWh/m}^2\text{-año}$), la calificación de un mismo edificio cambia de 23 a 33, midiendo en una escala de 10 a 100 puntos. Es decir el mismo edificio tendrá mejor o peor calificación en función de los niveles máximos y mínimos escogidos.

En cambio, mediante la obtención de la distribución de consumos, la escala de calificación dependerá de los edificios contenidos en una muestra determinada, sin que la adición de un nuevo registro tenga repercusiones apreciables en la forma de la misma. Sólo cuando la muestra cambie apreciablemente, un número elevado de registros sean incluidos en ella, la forma de la curva comenzará a cambiar.

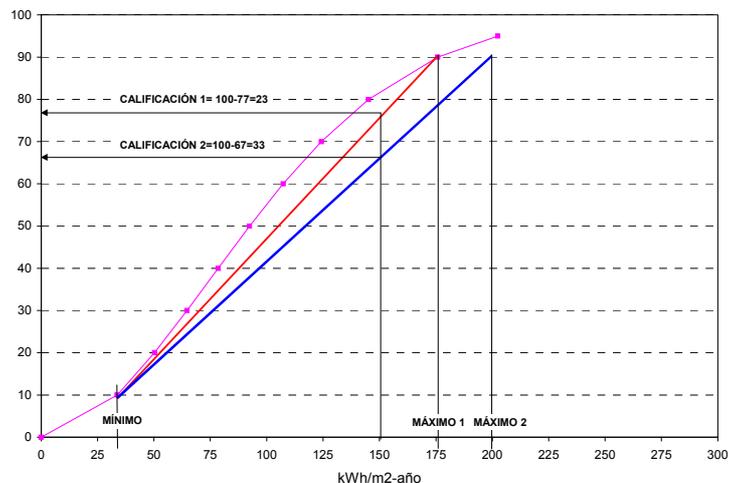


Figura 2.3. Ejemplo de dependencia de la calificación lineal de los extremos.

El inconveniente que presenta este procedimiento es que en algunos países, como España, no existen campañas de monitorización disponibles o no es factible llevarlas a cabo en un futuro, por lo que será necesario en estos casos recurrir a otros procedimientos alternativos.

2. Escenario construido a partir de Edificios de Referencia

Existen muchos métodos que optan por construir el marco de comparación a partir de Edificios de Referencia, un ejemplo claro de este sistema es el llevado a cabo en el Reino Unido para edificios de oficinas, ECONs'19 (CIBSE, 2000). En este método se establece el marco de comparación a partir de cuatro edificios genéricos que responden a las tipologías más extendidas. Los valores que finalmente determinen los niveles de referencia se pueden obtener por ejemplo suponiendo el edificio óptimo o el mínimo aceptable cumpliendo la legislación.

Con respecto a los niveles de referencia hay que distinguir entre aquellos sistemas que califican en función de un umbral, en cuyo caso sólo será necesario definir la referencia mínima, y los que evalúan en función de la posición que ocupe el edificio objeto entre el valor mínimo admisible y el máximo posible, que requerirán la definición de una escala de puntuación adecuada.

El número de edificios de referencia empleados para la determinación del escenario de comparación pueden variar desde un edificio tipo hasta un conjunto de edificios que sirvan como base para generar un conjunto de valores suficientemente representativo.

A modo de ejemplo, la calificación energética española para viviendas de protección oficial (IDAE, 1999) desarrolla un procedimiento de correlación que genera valores de referencia correspondientes al edificio mínimo aceptable desde el punto de vista del consumo energético. Los valores de referencia, en este caso, se obtienen basándose en 13 morfologías de edificios residenciales, 7 correspondientes a viviendas unifamiliares y 6 a bloques de apartamentos. Las características constructivas de cada edificio y sus sistemas se han obtenido mediante un cuestionario sobre las prácticas en 8 localidades, distribuidas entre las diferentes zonas climáticas de España. Cada edificio en cada localidad se ha supuesto orientado en las cuatro orientaciones principales y se han usado diferentes combinaciones resultantes del análisis estadístico, de esta manera se consigue obtener el mayor consumo energético de entre todas las combinaciones posibles, cumpliendo los reglamentos térmicos.

2.2.4 La escala de puntuación

Todos los sistemas de certificación estudiados presentan una caracterización cuantificada del edificio evaluado. Además de esto, algunos esquemas presentan más información acerca del edificio, como por ejemplo una propuesta de medidas de mejoras energéticas en función de su posible impacto sobre la calificación, pero la calificación que finalmente va a recibir el edificio deberá ser fácilmente entendible por los usuarios finales del edificio. Por ello la posición que finalmente ocupe el edificio dentro del marco de comparación o la puntuación que obtenga de acuerdo a un determinado baremo deberá sintetizarse y expresarse en una puntuación.

Una posibilidad consiste en asignar al edificio objeto una puntuación que represente la situación del mismo frente a otros edificios con el mismo grado de similitud. Por ejemplo se podría puntuar en función del percentil correspondiente a la variable calificativa del edificio objeto cuando es comparado con la distribución de frecuencias acumuladas del parque edificatorio existente. Un ejemplo de este sistema de puntuación es el llevado a cabo por el sistema Energy Star (DOE, 2006).

2.3 Revisión de modelos de caracterización y evaluación energética

A continuación se revisaran algunos de los modelos de caracterización y evaluación estudiados para el desarrollo de la tesis. En el anexo A de la tesis se incluye una lista completa de todos los sistemas de certificación energética estudiados. En ella se presenta un resumen de sus características más importantes.

2.3.1 Modelos en la Unión Europea

Desde 1993, a raíz de la puesta en marcha de la Directiva SAVE, todos los países de la Unión Europea deben llevar a cabo acciones específicas destinadas a conseguir un ahorro energético en el sector de la edificación. Entre ellas se destaca las actuaciones dirigidas hacia la certificación de edificios, que al no especificarse el procedimiento con exactitud, cada país ha realizado diferentes interpretaciones del procedimiento de certificación.

Dos países se encuentran muy avanzados con respecto al resto en la implementación de la certificación energética: Dinamarca y Reino Unido, con programas de certificación que vienen operando desde 1981. El resto de países se encuentra desarrollando sus sistemas propios de certificación.

Reino Unido

Standard Assessment Procedure (SAP)

Es un sistema de certificación de obligado cumplimiento para todas las viviendas de nueva construcción desde 1995. Coexiste con el NHER. El método SAP (BRE, 2001) se usa también para evaluar edificios residenciales existentes, en el momento de alquilar o solicitar un préstamo hipotecario, pero en este caso tiene carácter voluntario.

Este método produce una calificación en función del coste energético y otra en función de un índice indicativo de las emisiones de CO₂ ("carbon index"). Estos resultados se obtienen en función del consumo anual de calefacción y de agua caliente sanitaria. Para realizar el cálculo del consumo se toman un patrón estándar de ocupación, que dependerá del área de suelo medida de la vivienda, y un patrón estándar de calefacción. Tanto el coste energético como el índice de emisiones de CO₂ se normalizan en función del área de suelo, por lo que la dimensión del edificio no afectará en principio a la calificación.

La escala de puntuación varía entre 1 y 120, y la calificación obtenida en cada caso se calcula a través de una ecuación logarítmica en función del coste energético por unidad de superficie calculado para el edificio, el proceso completo de cálculo de este factor se explica en la referencia (BRE, 2001). La expresión utilizada en el proceso de puntuación es la siguiente:

$$SAP = 97 - 100 \times \log_{10}(ECF)$$

Donde ECF = factor de coste energético (£/m²)

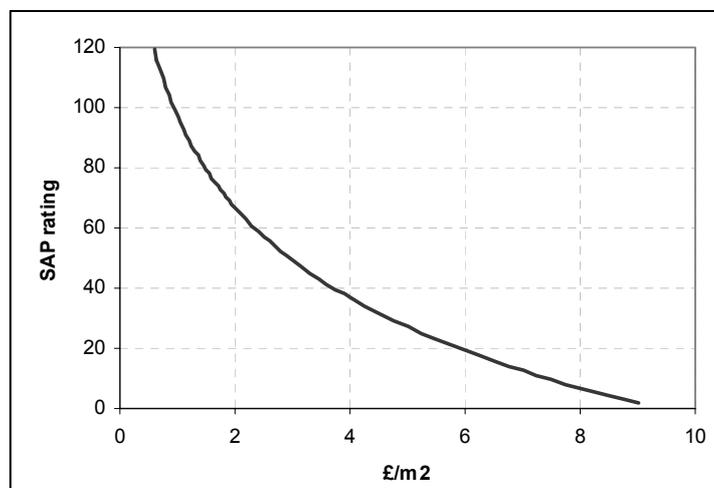


Figura 2.4. Escala de puntuación del método SAP

Obtener una puntuación de "1" en esta escala significa un bajo nivel de eficiencia energética, mientras que una puntuación de "120" representa un nivel muy alto. Concretamente, para el año 2001 la puntuación media obtenida por las viviendas fue de "51", algo más del 9% obtuvieron puntuaciones por debajo o iguales a "30" y más del 9% puntuaron por encima de "70" (ver referencia (ODPM, 2003)).

También se incluye una puntuación entre 0.0 y 10.0 para el índice de emisiones, en este caso la expresión empleada por el método variará en función del factor que indica el nivel de emisiones por unidad de superficie (kg/m^2) de la siguiente forma:

$$\text{CI} = 17.7 - 9.0 \times \log_{10}(\text{CF})$$

Donde CF = factor de carbono ($\text{kg CO}_2/\text{m}^2$)

En las siguientes figuras aparecen representadas gráficamente las escalas de puntuación empleadas en el método SAP.

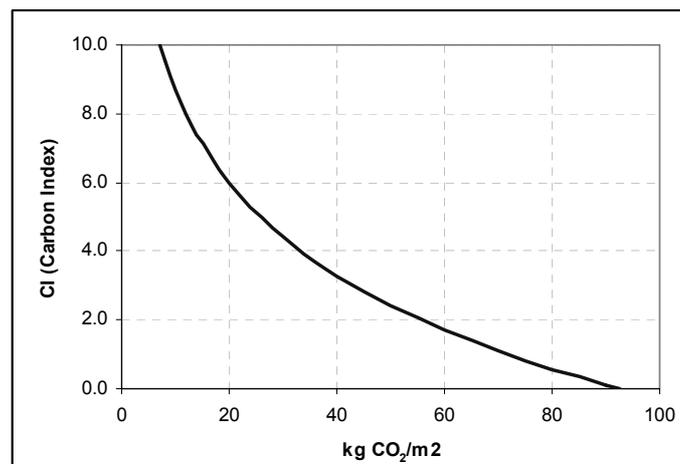


Figura 2.5. Obtención del CI (Carbon Index).

National Home Energy Rating (NHER)

Este método tiene en cuenta las condiciones climáticas locales y su posible impacto sobre la evaluación energética del edificio. Además este sistema calcula el consumo no sólo en calefacción y agua caliente sanitaria, como era el caso del método SAP, sino que tiene en cuenta los consumos de iluminación y electrodomésticos.

Sólo puede ser calculado mediante el uso de un programa informático distribuido a través de Servicio Nacional de Energía (NES). Este método se conoce desde 1983, pero una versión simplificada del mismo fue desarrollada por el Gobierno dando paso al método SAP, descrito en el apartado anterior, que no requiere del uso obligatorio de un programa informático ya que se implementa mediante una hoja de cálculo y una serie de tablas.

En este caso la escala de puntuación empleada varía entre 0 y 10. Además, a diferencia del método SAP, este si incluye recomendaciones acerca de posibles medidas de mejora energéticas aplicables al edificio evaluado.

La Figura 2.6 muestra un ejemplo del formato que presentan los certificados expedidos mediante ambos métodos, HHER y SAP.

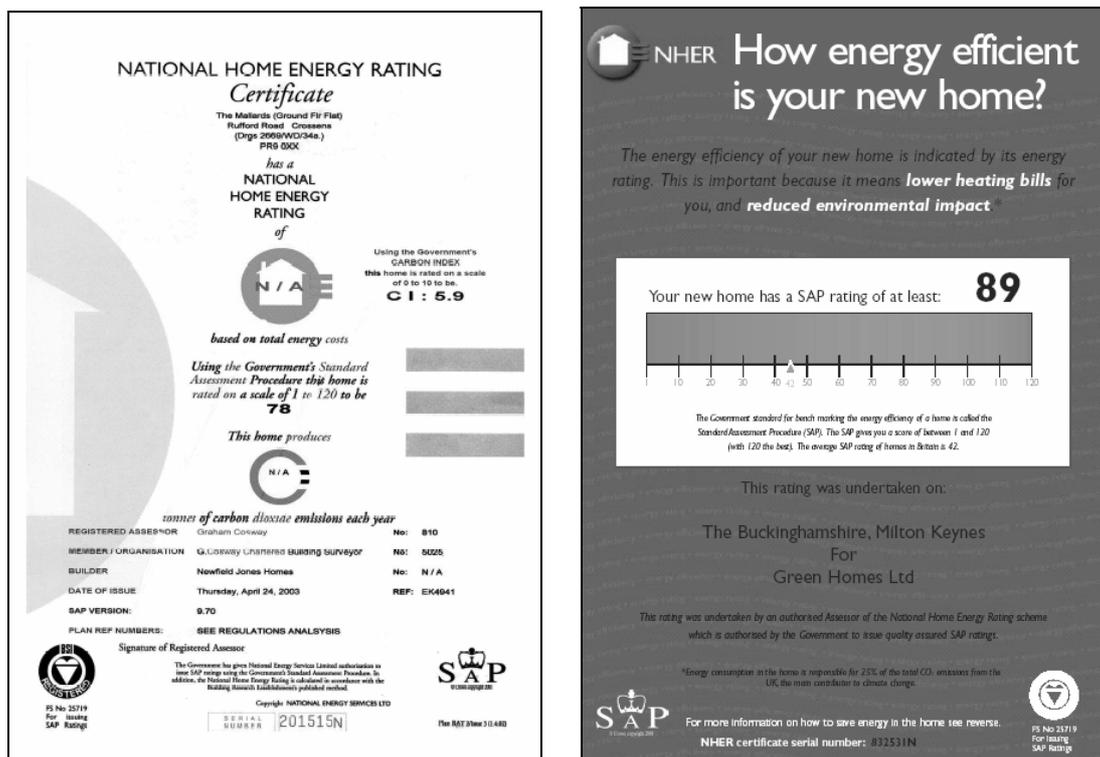


Figura 2.6. Certificados expedidos mediante los métodos NHER y SAP.

EcoHomes

Consiste en una serie de métodos que valoran la calidad medioambiental de las viviendas. Se trata de la versión para viviendas del método BREAM que se explicará en el siguiente apartado.

Building Research Establishment Environmental Assessment (BREAM)

El método BREAM (BRE, 1990) consiste en una serie de baremos que valoran la calidad medioambiental de varios tipos de edificios nuevos y existentes. Este método parte de un cuestionario y una inspección que informa acerca de algunos factores medioambientales. Cada uno de los factores se corresponde con un número de créditos y la puntuación obtenida dependerá del número de créditos en cada categoría y el total.

Para el caso de edificios de oficinas existentes los requisitos exigidos para la obtención de los créditos correspondientes guardan relación en su mayoría con aspectos energéticos, medioambientales (transporte, agua, materiales, emisiones) y de salud pública (calidad de aire, iluminación). Algunos de los requisitos exigidos mediante la asignación de los créditos correspondientes se encuentran directamente relacionados con el comportamiento del edificio, mientras otros tienen que ver con los sistemas de gestión y de operación que se lleven a cabo en el mismo. La Figura 2.7 representa la distribución de la puntuación entre las distintas categorías contempladas en el método, constituyendo en este caso el apartado correspondiente a comportamiento energético del edificio sólo un 22% de la puntuación total.

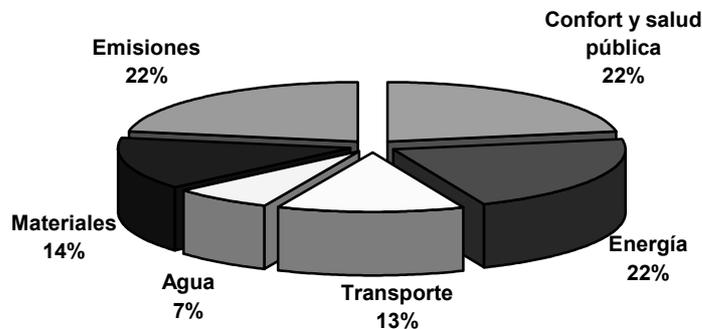


Figura 2.7. Reparto de puntos entre categorías del método BREAM.

Tras recorrer la lista de requisitos se suman los créditos totales obteniendo una puntuación final que servirá para establecer los dos niveles de calificación: el EPI ("Environmental Performance Index"), que tiene en cuenta únicamente la puntuación obtenida para el comportamiento del edificio, y el "BREAM rating", que contabiliza tanto la puntuación del comportamiento como la de la gestión y la operación (BRE, 2006).

Tabla 2.3. Escala de puntuación del método BREAM.

CHECKLIST SCORE	EPI	CHECKLIST SCORE	BREEM RATING
0 • 110	1	50 • 220	PASS
90 • 140	2	200 • 370	GOOD
120 • 170	3	350 • 520	VERY GOOD
150 • 200	4	500 +	EXCELLENT
180 • 230	5		
210 • 260	6		
240 • 290	7		
270 • 325	8		
305 • 360	9		
340 +	10		

Energy Consumption Guide (ECONs 19)

Este método permite evaluar el comportamiento energético de un edificio de oficinas, para ello ofrece valores representativos de consumos para cuatro edificios genéricos con los que se puede comparar el consumo actual del edificio objeto del estudio (CIBSE, 2000). La comparación en términos de consumo energético anual por área de suelo permite conocer la situación del edificio en cuanto al comportamiento energético y la distinción entre los diversos usos de energía aporta información acerca de aquellos aspectos del edificio que pueden ser mejorados desde el punto de vista energético. Las características generales que describen a cada uno de los edificios empleados como patrón de comparación en este método son las siguientes:



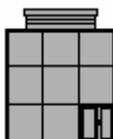
Edificio genérico 1: "naturally ventilated cellular"

- Entre 100 m² y 3000 m² de superficie
- Tipo modular, reconvertido de un uso residencial



Edificio genérico 2: "naturally ventilated open-plan"

- Entre 500 m² y 4000 m² de superficie
- Grandes zonas abiertas



Edificio genérico 3: "air-conditioned, standard"

- Entre 2000 m² y 8000 m² de superficie
- Uso intensivo, falta de iluminación natural



Edificio genérico 4: "air-conditioned, prestige"

- Entre 4000 m² y 20000 m² de superficie
- Grandes edificios de oficinas. Zonas de usos específicos: centros de cálculo, aparcamientos...

Para llevar a cabo el procedimiento será necesario determinar cuál de entre los cuatro edificios genéricos está más próximo al edificio objeto, tomando en cada caso los niveles de referencia asociados al edificio seleccionado.

Los valores de referencia que se establecen en este método proceden de una extensa base de datos existente sobre edificios existentes donde se incluyen todos los usos. Existen valores de referencia "típicos", con patrones de consumos consistentes con los valores medios recogidos a mediados de 1990, y valores de referencia correspondientes a una "buena práctica", donde se recogen valores de consumos significativamente bajos debido al uso de medidas de eficiencia energética y a una buena gestión energética, estos casos ocupan el cuartil menor dentro de la base de datos.

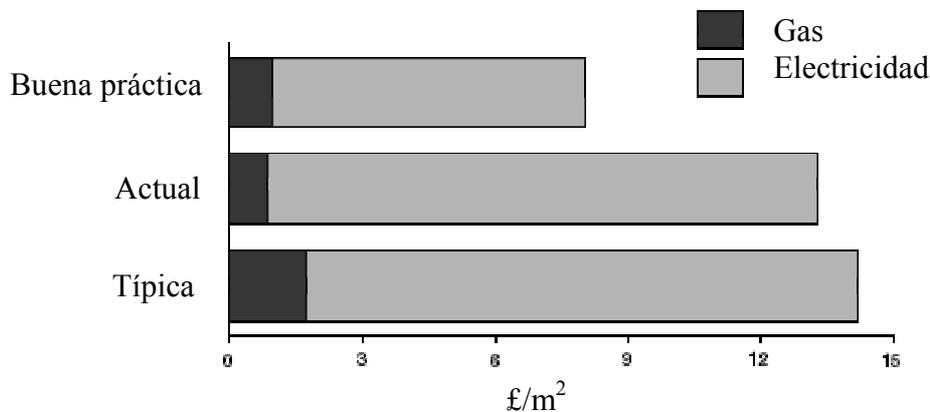


Figura 2.8. Comparación del coste energético del E.O. (£/m²) con los de referencia.

La comparación de edificio objeto frente a los valores de referencia se puede aplicar distintas variables relacionadas con la eficiencia energética del edificio como son: el consumo por unidad de superficie acondicionada, el nivel de emisiones de CO₂ y el coste energético. Cada una de ellas se mostrará repartida entre los distintos usos (ver Figura 2.9 y Figura 2.10), lo que permitirá una comparación más exhaustiva del edificio objeto.

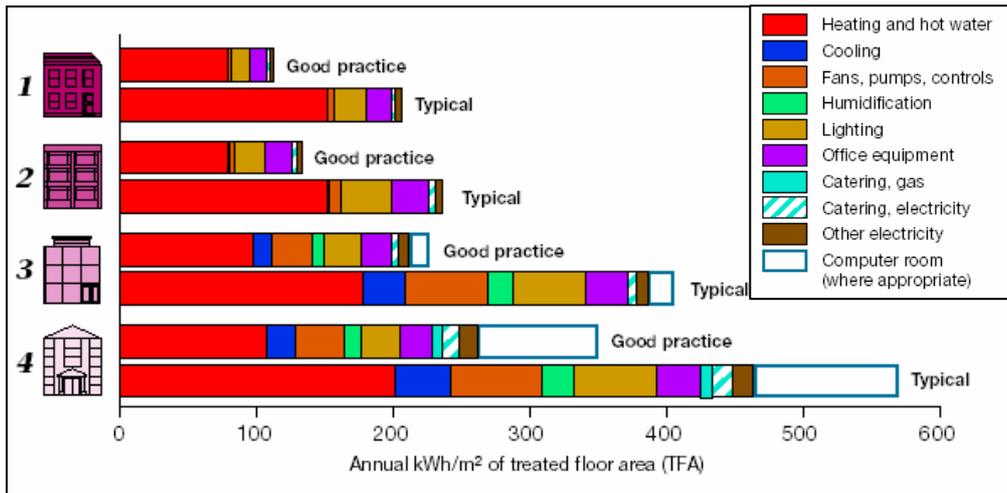


Figura 2.9. Consumos energéticos por usos en kWh/m² para valores de referencia ("típicos" y de "buena práctica") de cuatro edificios tipo de oficinas.

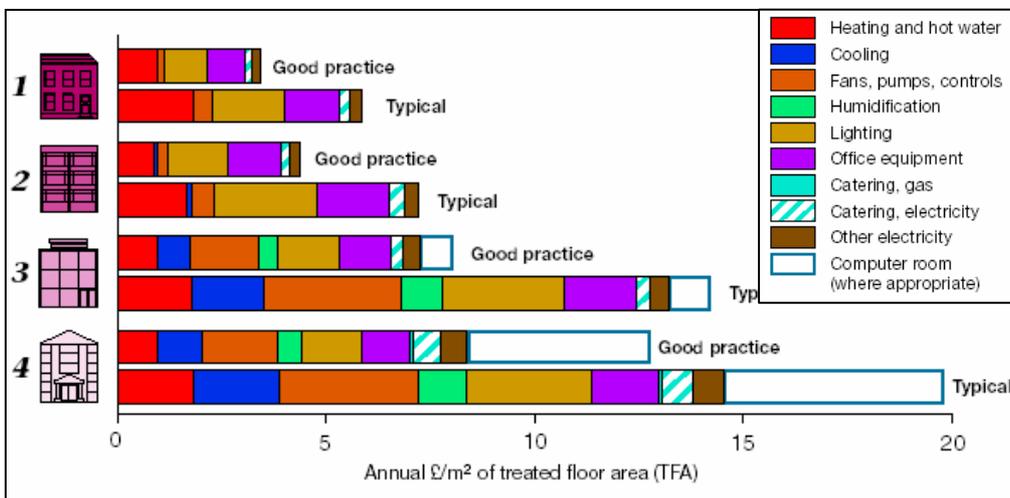


Figura 2.10. Costes energéticos por usos en £/m² para valores de referencia ("típicos" y de "buena práctica") de cuatro edificios tipo de oficinas.

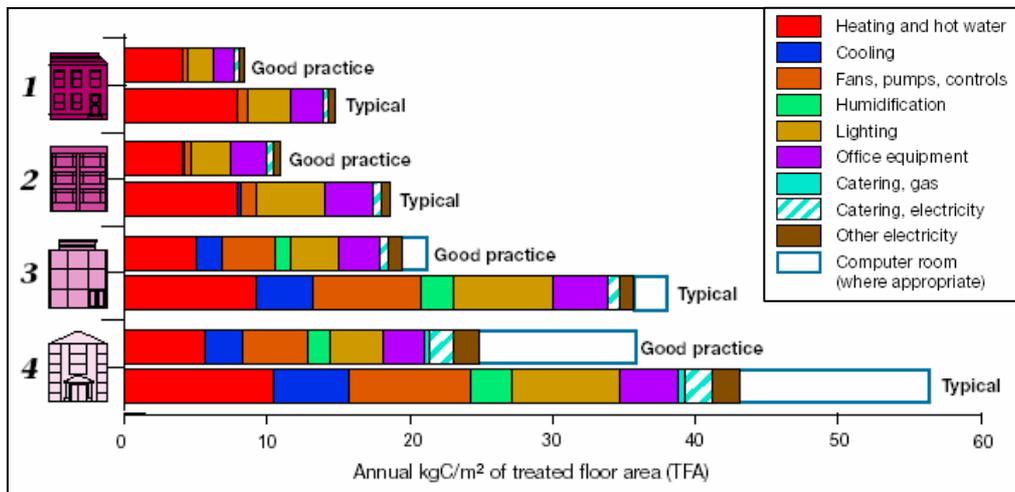


Figura 2.11. Emisiones de CO₂ para valores de referencia ("típicos" y de "buena práctica") de cuatro edificios tipo de oficinas.

Dinamarca

Desde 1997 Dinamarca está implantando dos sistemas de certificación para promover el ahorro de energía y de agua en edificios nuevos y existentes. Uno de ellos, el sistema EM (OPET, 2003), es obligatorio para edificios pequeños, con superficies de suelo menores de 1500 m², y el otro, el sistema ELO (OPET, 2003), es aplicable a edificios con superficies mayores de 1500 m². La certificación energética mediante uno de estos dos métodos, EM o ELO, es obligatoria para casi todo tipo de edificios nuevos y existentes, ya sean de uso público o privado, excluyéndose aquellos edificios destinados a uso industrial o edificios con un consumo energético muy bajo.

EM

El sistema EM es aplicable a edificios pequeños, por ello el sector más importante que se evalúa mediante este método es el correspondiente a viviendas unifamiliares. Este sistema obliga a que todas las viviendas en venta o alquiler pasen el proceso de certificación, facilitando de esta forma al futuro comprador información acerca del estado de las instalaciones y el aislamiento térmico del edificio. Toda la información acerca de la eficiencia energética del edificio queda recogida en la siguiente documentación:

Calificación Energética (Energy Label): En este documento se presenta la evaluación del edificio en función del consumo de calefacción, eléctrico y de agua, además de una estimación del impacto medioambiental debido a las emisiones de CO₂. La calificación se estima mediante la comparación de los consumos del edificio evaluado con los de otros edificios de uso similar y por número de habitante. De esta forma el consumo calculado se podrá situar dentro de una escala que va desde A1 hasta C5 (A: bajo; B: medio; C: alto). Este documento también contiene información acerca del consumo esperado en un año de referencia (media de 25 años) y del coste energético de la vivienda.

Plan Energético (Energy Plan): En este documento se incluyen propuestas de mejora del edificio para la obtención de ahorros tanto en el consumo energético como de agua. Incluyéndose estimaciones de las inversiones requeridas en cada medida y del ahorro anual obtenido en cada caso.

Energimærke til små ejendomme

Energimærke nr.: _____ Energimærket er gyldigt i 3 år fra: _____
 Ejendommens BBR nr.: _____ Byggår: _____ Aarsværdi: _____
 Ejendommens adresse: _____

Forudsætninger for beregning af Energimærket
 Samlet opvarmet areal: m², heraf m² opvarmet kældere og m² udlyst tagetage.
 Husstandens størrelse: personer

Pris baseret beregning af forureningerne. Kan det beregnede forbrug overføres ved hjælp af beregningsprogrammet i Energipasset til dokumentation.

Samlet vurdering af ejendommens energimæssige tilstand

Varme	El
Isolering og ventilation - herunder skorstøbe, radiator, tag, loft, gulv, værmåtte, indtræk, varmerør og ventilation.	Elektriske apparater
Værdierang	Værdierang
A: Lavt varmedforbrug	A: Lavt elforbrug
B: Middel varmedforbrug	B: Middel elforbrug
C: Højt varmedforbrug	C: Højt elforbrug
Opvarmingsforbrug: Beregnet forbrug pr. år: _____ kWh Beregnet udgift pr. år: _____ kr.	Beregnet forbrug pr. år: _____ kWh Beregnet udgift pr. år: _____ kr.

Vand
 Værdierangede apparater og sødte
 Værdierang

A: Lavt vandforbrug	Beregnet forbrug pr. år: _____ m ³
B: Middel vandforbrug	Beregnet udgift pr. år: _____ kr.
C: Højt vandforbrug	Beregnet udgift pr. år: _____ kr.

Miljøbelastning
 Ejendommens beregnede forbrug af varme og el giver en årlig miljøbelastning på _____ ton CO₂.
 Denne miljøbelastning er: A: Lav B: Middel C: Høj

Konklusion

Udarbejdet af energikonsulent nr.: _____ Navn: _____
 Firma: _____
 Tlf. nr.: _____ Fax nr.: _____
 Dato/Underskrift: _____

Energiplan & dokumentation

Ejendommens energimæssige tilstand

Varme Energimærke nr.: _____

Vindveje og vægge med opvarmet rum	Isoleringstype og tykkelse	Bør forbedres

Døre, vinduer, ovenlys og glødepåler	Årsal, sort og glødep	Bør forbedres

Ejngre	Årt og tilstand	Bør forbedres

Side 2

Figura 2.12. Informe de Calificación Energética (Energy Label) y del Plan Energético (Energy Plan)

ELO

Este sistema de certificación es de obligado cumplimiento en grandes edificios, con superficies superiores a 1500 m². Los tipos de edificios que se encuentran dentro de este esquema son bloques de viviendas, edificios de oficinas y edificios dedicados al sector servicios, tanto público como privado.

Bajo este sistema es obligatorio para los propietarios de los edificios evaluarlos anualmente, ya que el método se encuentra en continua actualización, registrando cada nuevo consumo en una base de datos que se actualiza diariamente y situándolo respecto de otros edificios de similares características. Esta metodología proporciona una monitorización del estado energético de los edificios y de su evolución.

El sistema de certificación consta de dos partes, la calificación energética y el plan energético, ambas deben ser llevadas a cabo mediante un experto.

Calificación Energética (Energy Label): En este documento se presenta la evaluación del edificio en función del consumo de calefacción por unidad de área acondicionada, del consumo eléctrico por unidad de área total, del consumo de agua por unidad de área total y de emisiones de CO₂ por unidad de área total. La calificación se estima mediante la comparación anual de estos consumos

normalizados con los datos procedentes de análisis estadísticos de edificios con similares características. La calificación consiste en un total de cuatro evaluaciones: el consumo de calefacción, el consumo eléctrico, el consumo de agua y las emisiones de CO₂, usando una escala de valoración que va de la A a la M. Para evaluar el consumo de calefacción se lleva a cabo una corrección climática, normalizando en función de los grados días.

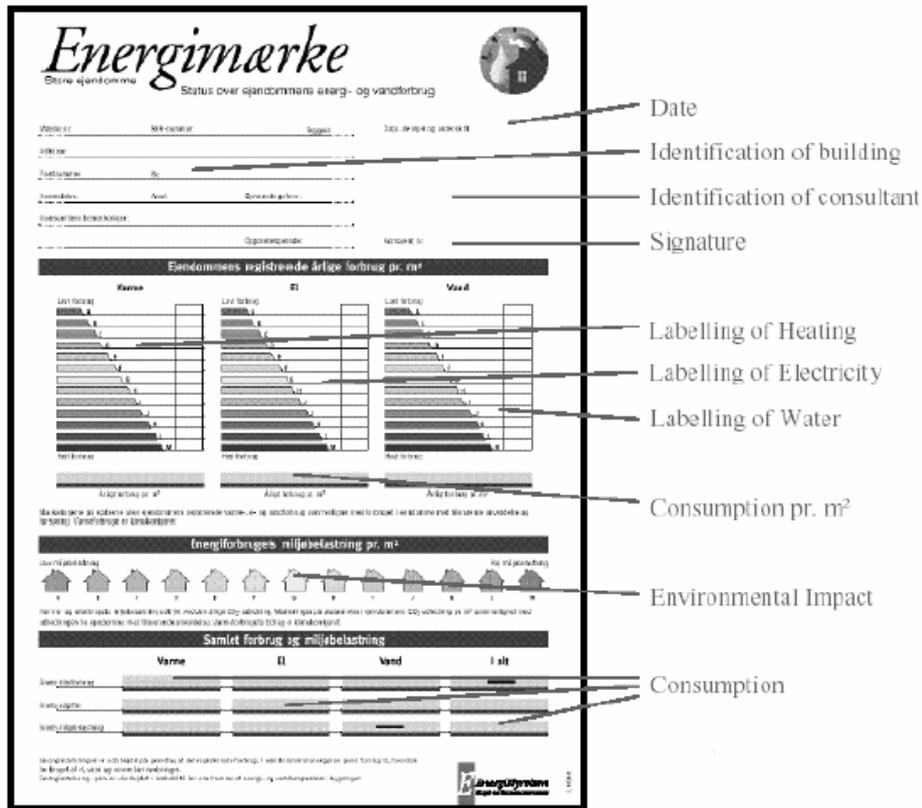


Figura 2.13: Informe de Calificación Energética (Energy Label)

Plan Energético (Energy Plan): Además de la calificación energética, la propuesta de un plan energético, forma parte de la inspección anual que debe realizarse al edificio. En esta aparece información acerca de la evolución del consumo durante los tres años anteriores, además de una valoración de las posibles iniciativas de ahorro que puedan llevarse a cabo. También se incluye una lista de recomendaciones de mejoras con una estimación tanto de los costes de inversión como de los ahorros obtenidos por las mismas.

Alemania

Passiv Haus

Este sistema de calificación se viene implantando en Alemania desde 1996. Es aplicable únicamente a viviendas de nueva construcción y utiliza herramientas de simulación de sistemas para la obtención del consumo de energía primaria del edificio, que posteriormente se compara con unos niveles máximos fijados en 15 kWh/m²-año para calefacción y en 30 kWh/m²-año para la suma de los consumos de calefacción, de ACS, de iluminación y en ventilación. Estos umbrales máximos se mantienen fijos para todo tipo de viviendas.

Holanda

Energy Performance Assessment (EPA)

Se trata de un sistema voluntario de certificación que se introdujo en 1999 y que se aplica a edificios existentes. El método consiste en un modelo de evaluación que calcula la eficiencia energética de la vivienda. Como resultados este sistema también aporta información sobre posibles medidas de ahorro energético que puedan mejorar la eficiencia energética del edificio. Existen subvenciones para la adopción de aquellas medidas que obtengan mayores ahorros energéticos. A la vista de la nueva Directiva sobre eficiencia energética el método EPA se está desarrollando para hacerlo obligatorio, por lo que será necesaria una nueva legislación al respecto. Además se está estudiando una ampliación del método EPA a otros sectores distintos del residencial.

El sistema dispone de un total de 15 edificios genéricos entre los cuales el usuario deberá elegir aquel que más se asemeje a su vivienda para usarlo como referencia. Cada uno de estos edificios posee una serie de características típicas y un consumo de energía asociado que se comparará con el consumo que se estime para el edificio objeto, una vez que se hayan especificados los parámetros relativos a la envuelta y a las instalaciones que lo caractericen y lo distingan del edificio de referencia. Los 15 edificios genéricos empleados como referencia varía fundamentalmente en función de la compacidad (viviendas adosadas, pareadas, en bloque,...), de la superficie y del año de construcción. En la siguiente figura se muestra un esquema de cada una de las 15 viviendas tipo empleadas (EPA, 2003).



Figura 2.14. Edificios de referencia utilizados para las distintas tipologías de viviendas en el método EPA.

Irlanda

Energy Rating Bench Mark (ERBM)

El NICER (National Irish Centre for Energy Rating Bench Mark) creó este método en 1992 para su aplicación a edificios nuevos y existentes. Este sistema es usado por los constructores y los suministradores de energía para promover viviendas de bajo consumo energético y sistemas de calefacción eficientes. Este método evalúa los consumos de calefacción y de agua caliente sanitaria. La

evaluación se lleva a cabo en términos de energía primaria anual por unidad de área y en términos de emisiones de CO₂ en toneladas al año. En el caso de evaluar edificios existentes este sistema incluye recomendaciones acerca de mejoras del aislamiento, de los sistemas de calefacción y del tipo de combustible empleado, añadiendo en cada caso los costes asociados y los ahorros estimados.



Figura 2.15. Ejemplo del certificado expedido mediante al método ERBM.

Heat Energy Rating (HER)

Este método se implementó en 1997 y sirve para comprobar el cumplimiento de la normativa referente a la energética edificatoria existente en el país. El resultado del consumo de calefacción y agua caliente sanitaria se presenta en kWh por área de suelo y por año, y es comparado con un "máximo permitido" establecido por la normativa función de la compacidad del edificio. Se trata por tanto de un modelo de regulación más que de certificación.

2.3.2 Modelos en otros Países

Estados Unidos

Home Energy Rating System (HERS)

En 1993 el Departamento de Energía de Estados Unidos puso en marcha un proyecto con el objetivo de unificar todos sistemas de certificación energética de viviendas existentes hasta el momento. Es un método aplicable edificios del sector residencial, diferenciando entre los siguientes usos energéticos: sistemas de climatización, agua caliente sanitaria, iluminación y electrodomésticos principales.

Para proceder a la certificación de la vivienda será necesario recopilar toda la información acerca del edificio que permita estimar los consumos tanto del edificio objeto como del edificio de referencia, usándose este último como patrón para la evaluación del edificio. El edificio de referencia deberá tener la misma forma y tamaño que el edificio objeto, y la misma superficie acondicionada. Además, las características térmicas de la envuelta del edificio de referencia deberán cumplir los requisitos mínimos establecidos por la norma MEC'93¹⁰.

En primer lugar se procede a calcular la demanda energética de ambos edificios en función de las características de la envuelta, el clima local, y el número de habitantes de la vivienda (este dato es para el cálculo de la demanda de agua caliente). Posteriormente se calculará para cada uno de los usos energéticos evaluados el ratio entre la eficiencia energética mínima establecida por la norma NAECA¹¹ y la eficiencia energética correspondiente a los equipos instalados en el edificio objeto, considerando el mismo tipo de energía para ambos. Este ratio multiplicará a la demanda energética del edificio objeto proporcionando la "demanda modificada". Esta se comparará con la demanda correspondiente al edificio de referencia obteniendo la calificación en función de la siguiente expresión:

$$\text{Puntuación} = 100 - 20 \times DM_{EO}/D_{ER}$$

Donde:

DM_{EO} = Demanda total modificada del edificio objeto

D_{ER} = Demanda total del edificio de Referencia

¹⁰ Model Energy Code (MEC) ed. 1993. Falls Church, VA: The Council of American Building Officials

¹¹ National Appliance Energy Conservation Act.

En el método se lleva cabo un procedimiento de normalización del consumo del edificio objeto en función del potencial de mejora de los equipos, asociado a cada tipo de energía. De esta forma no se introducen ventajas en el uso de determinado tipo de energía frente a otro, ya que el posible aumento de la calificación obtenida mediante el empleo de sistemas con mejores eficiencias podría llegar a ser más fácilmente alcanzable en el caso de optar por ejemplo por la energía eléctrica en lugar del gas natural para la calefacción, ya que en este caso se pueden obtener mejoras de hasta el 32% frente al 18.7% alcanzable para el gas natural. A continuación se muestra una tabla donde se resumen estos valores de eficiencia energética empleados para establecer los potenciales de mejora que servirán para corregir la demanda modificada del edificio objeto, que será la que finalmente sea puntuada mediante el procedimiento:

Tabla 2.4. Valores de eficiencia energética de equipos para la obtención de los niveles de referencia en el método HERS.

Uso final y tipo de energía de la vivienda evaluada	Valores Standard de eficiencia energética (EE)		Valores mejores del mercado de eficiencia energética (EE)	
	MEPR _r	EE _r	MEPR _b	EE _b
Calefacción eléctrica	HSPF = 6.8	0.5019	HSPF = 9.85	0.3465
Calefacción con Gas Natural	AFUE = 0.78	1.2821	AFUE = 0.966	1.0352
Calefacción con Fuel Oil	AFUE = 0.78	1.2821	AFUE = 0.866	1.1547
Refrigeración	SEER = 10.0	0.3413	SEER = 17.0	0.2008
A.C.S eléctrica	EF = 0.88	1.1364	EF = 2.50	0.4000
A.C.S por Gas Natural	EF = 0.54	1.8519	EF = 0.86	1.2628
A.C.S po Fuel Oil	EF = 0.53	1.8868	EF = 0.68	1.4706

Finalmente la expresión para la determinación de la puntuación quedará corregida de la siguiente forma:

$$\text{Puntuación} = 100 - 20 \times \text{DM}_{\text{EO}}/\text{D}_{\text{ER}}$$

Donde: DM_{EO} = Demanda total modificada y normalizada del edificio objeto

D_{ER} = Demanda total del edificio de Referencia

Los puntos se corresponden con una escala de estrellas (por ejemplo, 80 puntos = 4 estrellas; más de 86 puntos = 5 estrellas). Las viviendas cuya puntuación supere las 5 estrellas serán calificadas como las viviendas más eficientes. Mediante esta escala de puntuación se establece en 80 puntos la

calificación correspondiente a viviendas que cumplan normativa MEC'93, y en 100 puntos la valoración de un consumo nulo por parte del edificio.

Tabla 2.5. Escala de puntuación en estrellas del HERS.

Score Range	Stars	Relative Efficiency Change (with respect to Reference Home)
=>0 and <20	•	=>-400% and < -300%
=>20 and <40	• +	=>-300% and < -200%
=>40 and <50	• •	=>-200% and < -150%
=>50 and <60	• • +	=>-150% and < -100%
=>60 and <70	• • •	=>-100% and < -50%
=>70 and <80	• • • +	=>-50% and < 0%
=>80 and <83	• • • •	=>0% and < 15%
=>83 and <86	• • • • +	=>15% and < 30%
=>86 and <90	• • • • •	=>30% and <= 50%
=>90 and <=100	• • • • • +	=>50%

Existen diversas propuestas para la mejora de este método, entre las que se destaca la llevada a cabo por el comité RESNET (2004-13) en la que se propone corregir los valores de eficiencia energética en función de las condiciones climáticas y del grado de carga parcial al que trabajen los equipos. Esto es importante, ya que la eficiencia del equipo, sobre todo en el caso de bombas de calor condensadas por aire y equipos de aire acondicionado, puede presentar variaciones importantes en función del clima y del dimensionado, y los valores suministrados por los fabricantes (HSPF, SEER, AFUE) tienen en cuenta estas variaciones para unos patrones de funcionamiento fijos, que no tienen por qué coincidir con los reales del edificio.

Un estudio desarrollado por J.R. Stein [J.R. Stein y otros, 2000] demuestra una clara divergencia entre los consumos estimados mediante el método de cálculo empleado en el HERS y los consumos reales procedentes de las facturas de los edificios. Según las conclusiones del estudio, la falta de preparación del personal técnico encargado de la certificación y la necesidad de revisión de los valores estándar de operación y consigna, que pueden no ser lo suficientemente representativos, constituyen unas de las causas de la existencia de estas diferencias. Además, se observa que las viviendas con una alta eficiencia energética estimada, suelen pertenecer a clases acomodadas, por lo que tienden en la realidad a consumir por encima de lo esperado, ya que disponen de un mayor número de electrodomésticos, fijan consignas más confortables y establecen periodos de funcionamiento mayores que el resto de viviendas.

Leadership in Energy and Environmental Design (LEED)

Este certificado, de amplia extensión y aceptación, forma parte de los denominados certificados "verdes", que pretenden abarcar mas allá de aspectos energéticos del edificio, certificando en función de otras consideraciones relacionadas con el impacto ambiental desde una óptica mas global que la meramente energética y las condiciones de confort. Este sistema fue desarrollado por el U.S. Green Building Council.

Bajo el mismo esquema que el método BREAM, este procedimiento consta de una puntuación basada en el cumplimiento de una serie de requisitos, ordenados dentro de un total de seis categorías. Dentro de cada categoría puede exigirse el cumplimiento de requisitos de obligado cumplimiento para poder obtener alguno de los créditos correspondientes a esa categoría (prerrequisitos). El esquema de categorías y los descriptores generales de cada una de ellas queda de la siguiente forma:

- Emplazamiento sostenible: transporte, iluminación exterior, relación con el medio exterior...
- Uso del agua: tecnologías y uso eficiente del agua
- Energía y atmósfera: emisiones, uso de fuentes renovables de energía
- Materiales y recursos: reciclaje, residuos, origen de materiales...
- Calidad del ambiente interior: calidad de aire interior, materiales con baja emisividad, confort térmico, iluminación interior.
- Innovación y proceso de diseño

Al repartir los puntos totales entre las distintas categorías se observa en la 0 como el porcentaje mayor corresponde a la categoría de energía que es del 25%, siendo esta además la que presenta un mayor número de prerrequisitos, un total de tres.

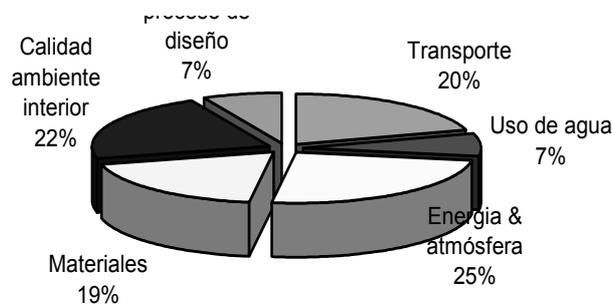


Figura 2.16: Reparto de los puntos entre categorías del método LEED.

La escala de puntuación en este caso es la siguiente:

- Certificado LEED: 26-32 puntos
- LEED plata: 33-38 puntos
- LEED oro: 39-51 puntos
- LEED platino: 52-69 puntos

ENERGY STAR Label for Buildings Method

El ENERGY STAR (DOE, 2006) es una herramienta desarrollada por la "Environmental Protection Agency" (EPA). Se usa para evaluar el uso de energía en edificios y obtener una calificación o puntuación dentro de una escala de 0 a 100. La puntuación será equivalente al porcentaje de edificios del mismo tipo que tienen un consumo energético mayor, es decir, si un edificio tiene una puntuación de 37 significará que un 37% de los edificios con sus mismas características consumen por encima de él.

Sólo los edificios con una puntuación mayor o igual a 75 y que mantienen unas condiciones del aire interior conformes a la norma están capacitados para ser designados "ENERGY STAR Building".

Es aplicable únicamente a edificios de oficinas. Para asegurar una buena comparación entre los edificios a evaluar y otros de semejantes características deben cumplir los siguientes parámetros:

- Unas dimensiones mínimas de 5000 ft² (464.51 m²)
- Más de un 50% de la superficie total dedicada a uso primario (oficinas), menos de un 49% dedicado a uso secundario.
- No más del 10% de la superficie total puede ser dedicado a centros de cálculo con un sistema específico para el mismo.
- La superficie de espacio desocupado no puede ser superior a un 20% de la zona de uso primario.
- En espacios de uso primario la ocupación será como mínimo de 30 horas a la semana
- Debe estar abierto al menos 11 meses
- Debe consumir electricidad

El método se basa en los siguientes datos medidos:

- Consumo total del edificio
- Variables climáticas (grados-día de verano y de invierno)
- Dimensiones del edificio
- Horas de operación

- Ocupación
- Equipos
- Otras características del edificio

Este método usará un modelo de regresión que estime los consumos medidos en función de una serie de variables características del edificio e independientes del diseño del mismo. Este modelo servirá para normalizar los consumos medidos.

La "Herramienta de Calificación" aplica un factor de conversión de energía final a energía primaria. La energía primaria será mejor indicador del coste y del impacto ambiental que la energía final.

Los resultados de la "Herramienta de Calificación" se presentan dentro de un informe denominado "Statement of Energy Performance", que presenta la calificación o puntuación recibida por el edificio, el consumo energético del edificio (tanto el real como el normalizado), las características de operación y la concordancia de la calidad del aire interior con los niveles establecidos por la norma. En la figura 3 se puede ver un ejemplo de este informe. El consumo energético y las condiciones del aire interior deben ser verificados por un profesional acreditado para realizar este tipo de inspecciones.

Canadá

EnerGuide

El EnerGuide para viviendas es un sistema de certificación desarrollado por NRCan ("Office of Energy Efficiency of Natural Resource Canada") con el objetivo promover el uso eficiente de la energía en este sector.

El proceso de certificación comienza por una recopilación de información acerca del edificio por parte del inspector correspondiente como las características de la envuelta, sistemas de climatización empleados,...El consumo energético de la vivienda se calcula mediante el uso de un programa informático denominado HOT2® XP12, que servirá para la vivienda con una de referencia de la misma dimensión y bajo el mismo clima.

¹² HOT2XP desarrollado por CANMET Energy Technology Centre (CETC)



STATEMENT OF ENERGY PERFORMANCE

Sample Facility

Building ID: 1013702
For 12-month Period Ending: October 31, 2003¹

Date SEP Generated:
January 09, 2004

Sample Facility
123 Notreal St.
Arlington 22201

Gross Building Area: 15,000 ft²
Year Built: 1980

Owner
Sample Owner
L681561, J686 U66
123 Sample St.
Sampleville VA 22201
888-888-8888

Facility Space Use Summary

Space Type	Area(ft ²)	Occupants	Operating hours/week	Number of PCs
Office (General)	15,000	35	55	32

Site Energy Use Summary

Electricity (kBtu)	484,504
Natural Gas (kBtu)	0
Total Energy (kBtu)	484,504

Professional Verification
John Doe
111 Falso St.
Faketown VA 22201
888-888-8888

Licensed Number: Test-Lic
State: VA

Results

Energy Performance Rating² (1-100) **91**

Energy Intensity³

Site (kBtu/ft ² -yr)	32.4
Source (kBtu/ft ² -yr)	97.3

Emissions

CO ₂ (1000 lbs/yr)	1,016
SO ₂ (1000 lbs/yr)	30
NO _x (1000 lbs/yr)	2

Energy Cost

Cost (\$/yr)	\$0
Intensity (\$/ft ² -yr)	\$0.00

Indoor Environment Criteria⁴

Indoor air pollutants controlled?	Yes
Adequate ventilation provided?	Yes
Thermal conditions met?	Yes
Adequate illumination provided?	Yes



Professional Engineer Stamp

Based on the conditions observed at the time of my visit to this building, I certify that the information contained on this statement is accurate.

Notes:
 1. Application for ENERGY STAR must be submitted to EPA within 4 months of the Period Ending date. Award of ENERGY STAR is not final until approval is received from EPA.
 2. An energy performance rating of 75 is the minimum required rating to be considered eligible for ENERGY STAR.
 3. Values represent energy intensity, annualized to a 360 day calendar.
 4. Based on meeting ASHRAE Standard 62-1999 for indoor air quality, ASHRAE Standard 55-1992 for thermal comfort, and IESNA Lighting Handbook for lighting quality.

Tracking Number: SEP200401090001002252

Figura 2.17: Informe presentado por la herramienta: "Statement of Energy Performance"

Para la simulación se usan unas condiciones operacionales y funcionales fijas que son las siguientes:

- Cuatro ocupantes
- Consigna de 21°C en zonas principales y 19°C en sótano
- Consumo de ACS de 225 litros diarios
- Consumo de iluminación y equipos eléctricos de 24 kWh/día
- Ventilación media de 0.35 renovaciones por hora durante el periodo de calefacción

La puntuación del edificio se lleva a cabo dentro de una escala del 0 al 100, en la Figura 2.18 se puede ver el certificado obtenido en cada caso.

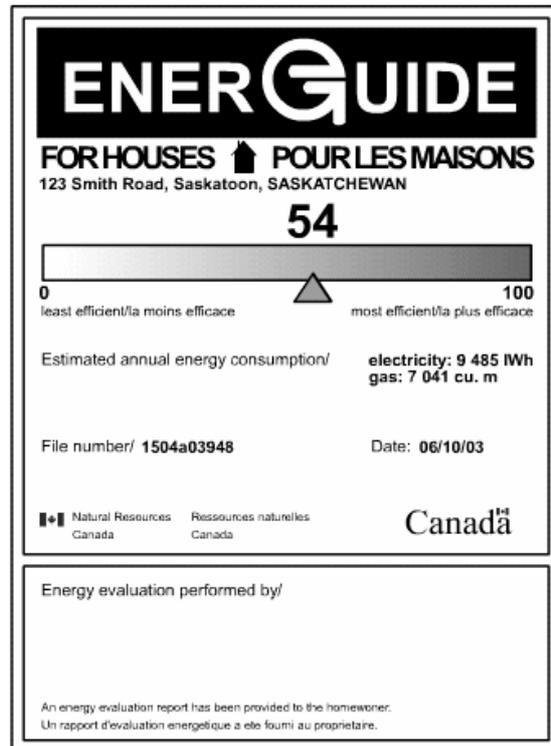


Figura 2.18: Certificado expedido por EnerGuide

Mediante este sistema se procede a informar al propietario de las posibilidades de mejora de la eficiencia energética existentes en el edificio. Para ello incluye en el informe de certificación una serie de recomendaciones y sugerencias para mejorar su puntuación como la mejora del aislamiento térmico, la sustitución de ventanas, la sustitución de equipos antiguos o la instalación de lámparas de bajo consumo. Además se informa acerca del ahorro energético que se obtendría en el caso de llevar a cabo las recomendaciones realizadas por el inspector, estimando también el coste y el periodo de retorno de la inversión.

Las puntuaciones típicas obtenidas por los edificios dependerán de la antigüedad de los mismos y del grado de reforma al que hayan sido sometidos. Los rangos de puntuación característicos son los siguientes:

- 0-50: Vivienda antigua sin reformar
- 51-85: Vivienda antigua reformada
- 66-75: Vivienda antigua muy eficiente o típica vivienda nueva
- 68-82: Vivienda nueva eficiente
- 80-90: Vivienda nueva muy eficiente
- 91-100: Viviendas con consumos próximos a cero

Otros Métodos

Princeton Scorekeeping Method (PRISM)

Este método usa técnicas de normalización climática. Las técnicas de normalización climática se basan en la suposición de que el consumo energético se compone de una componente que varía linealmente con las condiciones climáticas, como son los grados-día o la temperatura exterior, y de otra componente que depende de las cargas internas (ocupación, equipos, iluminación, etc.).

Para aplicar este método son necesarios tres tipos de datos climáticos:

- Temperaturas medias diarias
- Grados-día de calefacción para varias temperaturas de referencia
- Grados-día de refrigeración para varias temperaturas de referencia

Zmeureanu Method

Este modelo es otra técnica de normalización climática que puede aplicarse a edificios de oficinas que usen gas natural o fuel para calefacción y electricidad para refrigeración, iluminación y equipos.

Normalized Performance Indicator Method (NPI)

Desarrollado para edificios de oficinas en UK, mide valores relacionados con:

- El consumo de calefacción
- Las dimensiones del edificio
- Las horas de operación
- La temperatura interior
- La exposición al viento

Los valores de consumo de calefacción medidos se multiplicarán por dos factores correctores que tendrán en cuenta:

- Las variaciones climáticas
- El emplazamiento del edificio

El consumo total anual se corregirá en función del número de horas de funcionamiento.

Finalmente se divide por la superficie, obteniendo el "Normalized Performance Indicator" (NPI). Este valor servirá para calificar el edificio, situándolo dentro de uno de los tres niveles posibles: bueno, suficiente y malo.

Normalised Energy Consumption Method (NECON)

Es un modelo sencillo que se aplica a edificios de oficinas. Este normaliza en función de las horas de funcionamiento.

Office Buildings Rating Methodologies (ORME)

El objetivo de ORME es el de evaluar u ordenar edificios de oficinas o escenarios de mejora en función de una serie de parámetros como son:

- Consumo de calefacción, refrigeración e iluminación
- Impacto ambiental
- Calidad del aire interior
- Coste

Existen dos métodos distintos (Roulet C. y otros, 2002):

- Rating (Principal component analysis)
- ORME Ranking Methodology

El "Rating Method" persigue calificar y ordenar varios escenarios de mejora basándose en el uso energético y en las condiciones de confort térmico del edificio. Este usará cinco criterios aplicados a los siguientes parámetros:

- Consumo de calefacción del edificio
- Consumo de refrigeración del edificio
- Consumo de iluminación del edificio
- Horas de disconfort térmico en invierno
- Horas de disconfort térmico en verano

Building Energy and Environmental Assessment Method (BE₂AM)

En este método la evaluación del comportamiento se obtiene mediante comparación con los comportamientos de dos edificios de referencia que cumplen la normativa local.

Se definen tres factores que servirán para evaluar el edificio:

- El análisis del ciclo de vida del uso energético y de la energía propia
- El impacto ambiental de los materiales
- El impacto ambiental en el diseño

Se definirá una puntuación global como combinación lineal de las tres anteriores.

CAPÍTULO 3. CARACTERIZACIÓN ENERGÉTICA BASADA EN MEDIDAS

3.1 Introducción

La caracterización del comportamiento energético de un edificio existente constituye el paso previo a la realización de un análisis energético de cualquier tipo. Existen diversos objetivos para los que será necesario cuantificar el consumo energético de un determinado edificio, como por ejemplo: comparar el comportamiento energético actual del edificio frente al previsto en fase de diseño; medir el estado actual del consumo de un determinado edificio durante un proceso de auditoría energética; comparar el comportamiento energético del edificio antes y después de la implantación de una medida de ahorro y, como en el caso que ocupa la presente tesis, comparar el comportamiento energético del edificio frente a otros de similares características o frente a unos valores de referencia.

La metodología necesaria para la caracterización energética de edificios en base a medidas consta de tres pasos fundamentales. En primer lugar deberán definirse con claridad los indicadores energéticos, ya que serán los factores empleados para analizar y evaluar el comportamiento energético de los edificios. A continuación será necesario establecer un protocolo para la toma de datos y medida de los parámetros energéticos del edificio. Finalizando con el desarrollo de los procedimientos para la obtención de los indicadores energéticos a partir de los datos disponibles, siendo necesario en la mayoría de los casos realizar un desglose y un ajuste de los datos medidos.

Existen numerosos procedimientos desarrollados para la caracterización y el análisis del comportamiento energético de edificios en base a medidas. Cada uno de ellos abarca distintos grados de detalle, dependiendo del objetivo, y pueden ser aplicables en diferentes periodos de la vida del edificio. Según una revisión sobre los diversos métodos de auditorías energéticas empleados (Stewart y otros, 1984) existen, por un lado, los procedimientos que sólo describen los pasos básicos del proceso y, por otro lado, aquellos más detallados, pero concebidos sin un carácter universal, pues usualmente se encuentran ligados a una tarea específica. Por tanto, la diversidad de métodos existentes hace que los resultados obtenidos sean diferentes, impidiendo la comparación de los resultados obtenidos mediante distintos procedimientos.

Uno de los principales problemas para la caracterización y evaluación energética de los edificios es la inconsistencia tanto de los métodos y como de la terminología. Cada profesional tiene su propio método de definir y calcular el comportamiento energético de los edificios. Durante los últimos años se han realizado algunos esfuerzos para acabar con este problema. La Norma 105 de ASHRAE, *Standard Methods for Measuring, Reporting and Comparing Building Energy Performance* (ASHRAE, 1999), de la que se espera una nueva revisión para el 2007, trata de proponer un método estable de medir y expresar el comportamiento energético de los edificios. Orientado principalmente a edificios del sector terciario, este método pretende fomentar la uniformidad a la hora de representar el comportamiento energético de edificios existentes para facilitar la comparación, las mejoras en el diseño y la operación y el desarrollo de la normativa relacionada con la energética edificatoria. La Agencia de Protección del Medio Ambiente de Estados Unidos, *Environmental Protection Agency's (EPA)*, bajo el programa ENERGY STAR®, ha creado un instrumento denominado *Portfolio Manager*, junto con otras herramientas de evaluación, empleado para determinar el comportamiento energético de los edificios (EPA, 2005). El Laboratorio Nacional de Energía Renovable de Estados Unidos, *National Renewable Energy Laboratory (NREL)*, lleva trabajando desde el año 2001 con el Departamento de Energía (DOE) en un proyecto para estandarizar la medida y la caracterización del comportamiento energético de los edificios.

En el ámbito europeo el Comité Europeo de Normalización ha desarrollado diversas normas como apoyo a la Directiva 2002/91/EC relativa a la eficiencia energética de edificios. Entre ellas se encuentran la norma prEN 15203 (CEN prEN 15203, 2005) y la norma prEn 15217 (CEN prEN 15217, 2005), que definen los indicadores energéticos a considerar para la evaluación del comportamiento

energético en edificios y propone algunas directrices acerca de la metodología para la obtención de los mismos en edificios existentes a partir de diversas medidas, que se detallarán y analizarán a lo largo del capítulo. En el proyecto EUROCLASS (EUROCLASS, Julio de 2001), desarrollado dentro del programa SAVE, se desarrolló una metodología común para la evaluación y clasificación del parque edificatorio residencial existente en Europa en base a su consumo energético.

Dado que la caracterización energética de un edificio existente se llevará a cabo en base a determinadas medidas, es objeto de este capítulo analizar el tipo de medidas que pueden tomarse del edificio, y establecer los procedimientos más adecuados para la obtención de los indicadores energéticos asociados a edificios existentes del sector residencial.

3.2 Metodologías de caracterización

Para proceder a la caracterización energética de un edificio será necesario definir claramente cuál o cuáles son los indicadores necesarios. Además, también habrá que especificar qué datos del edificio y de su actividad energética se necesitan para calcularlos. Hay que considerar que existe una diferencia significativa de resultados en función del origen de estos datos, ya que estos pueden proceder de un programa de simulación, que trabajará con un modelo del edificio, o ser medidas tomadas directamente del edificio real. En este capítulo se detallarán todos los aspectos relacionados con la segunda opción, en la que se parte de datos medidos del edificio para la obtención del indicador o los indicadores del comportamiento energético.

Según se explica en el informe final del proyecto desarrollado por NREL para la medida del comportamiento energético de edificios (NREL, Octubre de 2005), se pueden diferenciar dos metodologías de caracterización energética de un edificio: la metodología basada en facturas y la basada en monitorización.

La caracterización energética basada en facturas genera resultados totales de consumo, diferenciando por tipo de energía y en intervalos de uno o varios meses, dependiendo de la periodicidad de las lecturas de los contadores de energía. Esta metodología no sólo se basa en datos procedentes de las facturas energéticas, también requerirá datos adicionales del edificio como por ejemplo la superficie acondicionada, las calidades constructivas o las condiciones ocupacionales y funcionales. Esta información puede provenir tanto de un examen físico del edificio como de encuestas realizadas a los usuarios del mismo.

Por el contrario, la *caracterización energética basada en monitorización* proporciona información detallada y desagregada del uso energético del edificio, como por ejemplo la evolución horaria del consumo de un equipo en particular o de la temperatura de una determinada zona del edificio. En este caso será necesario recurrir a la implantación de un sistema de adquisición de datos (DAS) para la monitorización adecuada del edificio.

En el proyecto EUROCLASS (EUROCLASS, Julio de 2001) también se distinguen dos tipos de metodologías mediante el desarrollo de dos protocolos alternativos para la caracterización: uno basado en facturas, *Billed Energy Protocol* (BEP), y otro basado en monitorización del edificio, *Monitored Energy Protocol* (MEP). El BEP se basa completamente en el contenido de las facturas energéticas recogidas durante el periodo de un año y en los datos procedentes de la denominada *fase de auditoría*, en la que se lleva a cabo la inspección y la recogida de información relativa las características energéticas del edificio.

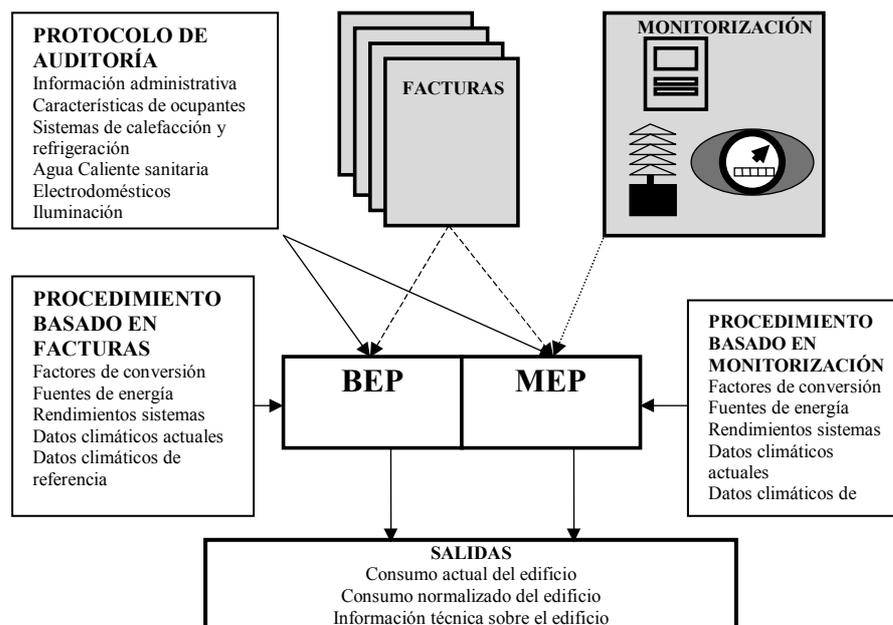


Figura 3.1: Datos requeridos en los protocolos de caracterización desarrollados en el proyecto EUROCLASS (EUROCLASS, Julio de 2001)

El MEP también hace uso de la información procedente de las facturas energéticas y de los datos procedentes de la *fase de auditoría*. Además lleva a cabo durante un mínimo de dos semanas de variables climáticas; de la temperatura en el interior del edificio y de los consumos parciales de energía que permitirán conocer con mayor fiabilidad el uso energético del edificio. Esta se considera una metodología alternativa al BEP en el caso de que no se cumplan una serie de requisitos que no garanticen la fiabilidad de los resultados obtenidos. Algunos

ejemplos de estos requisitos son: que el edificio no haya sufrido ninguna reforma, ampliación o cambios en sus sistemas durante el periodo cubierto por las facturas energéticas; que el número de ocupantes y sus patrones de ocupación y uso del edificio tampoco hayan cambiado durante este periodo o que se disponga de todas las facturas o lecturas de los contadores de consumo de energía pertenecientes a un año completo.

La monitorización de edificios constituye un sistema de caracterización costoso, dado que requiere gran cantidad de recursos y de tiempo. De hecho, según los resultados del proyecto EUROCLASS, se estiman necesarias entre dos y diez semanas de monitorización para el caso del Protocolo basado en monitorización (MEP) frente a las cuatro horas de inspección del edificio que requiere el Protocolo basado en facturas (BEP). Por ello, a lo largo de la tesis, se va a profundizar más en el estudio de los procedimientos de caracterización en base a facturas energéticas. Aunque, considerando la importancia que está cobrando en el ámbito europeo la auditoría energética como mecanismo para la mejora de la eficiencia del uso final de la energía (véase párrafo 18 de la Directiva 93/76/CEE sobre la eficiencia del uso final de la energía y los servicios energéticos), cabe destacar que sería importante en futuros desarrollos, estudiar y elaborar procedimientos de caracterización energética orientados a la auditoría de edificios del sector residencial. En este caso se podrían proponer esquemas de caracterización combinando ambas vías, facturas y monitorización, en función de los objetivos marcados en la auditoría.

Para resumir, se puede decir que existen dos metodologías para la caracterización energética de un edificio en base a medidas: una basada en las facturas energéticas y otra basada en la monitorización del edificio. La primera aporta la evolución mensual o anual del consumo de energía por tipo de energía y necesitará datos complementarios del edificio, como la geometría y el patrón de uso, para corregir, ajustar e incluso desglosar los resultados obtenidos. La segunda vía no requiere el desglose de los resultados ya que estos se obtienen desagregados, pero si necesita el desarrollo de protocolos de monitorización, que permita obtener resultados fiables y comparables.

El conjunto de procedimientos a desarrollar para la caracterización energética de edificios en base a medidas depende de la metodología elegida.

La metodología de *caracterización basada en facturas* consta de los siguientes procedimientos:

- Protocolo de Inspección técnica del edificio o auditoría.

- Métodos de ajuste o normalización de medidas.
- Métodos de desglose de medidas.

La metodología de *caracterización basada en monitorización* consta de los siguientes procedimientos:

- Protocolo de Inspección técnica del edificio o auditoria.
- Protocolos de monitorización del edificio.
- Métodos de ajuste o normalización de medidas.
- Métodos de desglose de medidas (si la monitorización es limitada).

3.3 Protocolos de Inspección Técnica del edificio

Se trata de un procedimiento común para ambas metodologías, la basada en facturas y la basada en monitorización. Consistirá en la recopilación de toda aquella información relativa al uso energético del edificio como por ejemplo: las características físicas del mismo; los patrones de uso y operación de la vivienda y las características de los equipos y sistemas de calefacción y refrigeración.

La elaboración de un protocolo único permitiría que los resultados de la inspección técnica del edificio pudieran contribuir a la elaboración de una base de datos, que daría a conocer el estado la situación energética de este sector. Además, conocida una población suficientemente grande, se podría desarrollar una herramienta de inferencia que permitiera la imputación de aquellos datos perdidos o desconocidos en posteriores inspecciones, lo que facilitaría la labor de inspección y posterior análisis de resultados.

La inspección periódica de calderas y equipos de aire acondicionado, impuesta por la directiva, podría emplearse como vía para la recopilación de mas datos acerca del edificio, contribuyendo a todo lo expuesto anteriormente.

3.4 Protocolos de Monitorización

Un sistema de monitorización adecuado debe asegurar que los datos obtenidos mediante las diversas medidas permitan alcanzar los objetivos establecidos, que en el caso que nos ocupa sería la aportación de los parámetros necesarios para la caracterización energética del edificio, a través de una serie de indicadores energéticos. La selección de las medidas debe asegurar un buen análisis del comportamiento energético del edificio, evitando recopilar datos que no se vayan a usar posteriormente. Según NREL (NREL, Octubre de 2005), tanto el

exceso como el defecto de datos, constituyen unos de los problemas más comunes en el diseño de sistemas de monitorización.

Las características fundamentales a fijar en el diseño de un protocolo de monitorización dependerán de los objetivos perseguidos por el mismo, y son las siguientes:

- A. Datos a medir
- B. Periodo de monitorización
- C. Intervalo de medidas
- D. Equipos de medida y emplazamiento

El Protocolo de monitorización (MEP) del proyecto EUROCLASS (EUROCLASS, Julio de 2001), se ha diseñado para la caracterización energética de viviendas. En este caso se diferencian dos grupos de datos a medir. El primero está constituido por variables ambientales interiores y exteriores como son:

- La temperatura interior
- La temperatura exterior
- La radiación solar y la humedad relativa (sólo si se considera que estas variables influyen en el balance energético del edificio durante el periodo de medida)

El segundo grupo de variables está constituido por los consumos energéticos segregados para los diferentes usos como son:

- Consumo energético para calefacción
- Consumo energético para refrigeración
- Consumo energético para agua caliente sanitaria
- Consumo de iluminación y electrodomésticos

Este protocolo establece un periodo mínimo de monitorización de dos semanas, que servirá como base para establecer la distribución de consumos que caracterice al edificio.

El protocolo propuesto por NREL (NREL, Octubre de 2005) está enfocado hacia edificios del sector terciario, con lo que aumenta su complejidad con respecto al anterior.

3.5 Métodos de ajuste de medidas (normalización)

Los consumos energéticos procedentes de una caracterización basada en medidas suelen ser normalizados o corregidos para poder facilitar su comparación

con otros edificios o en otras circunstancias. Se pueden corregir los resultados para tener en cuenta, por ejemplo, cambios climáticos o de las condiciones de operación.

Los parámetros a normalizar no están siempre claramente definidos, lo que conlleva a evaluaciones comparativas inconsistentes e irreales. Los principales parámetros tenidos en cuenta para la normalización, que se discutirán en este apartado, son la superficie del edificio y el clima.

3.5.1 Superficie del edificio

La superficie bruta de los edificios es la medida más común para calcular el consumo por unidad de área, también conocido como "energy use intensity, EUI". Pero existen diferentes formas de definir la "superficie bruta". La ASTM13 (ASTM, 2001) y la ANSI/BOMA14 (BOMA, 1996) proporcionan su definición, pero para el uso en el ámbito de la gestión inmobiliaria.

Si el objetivo es el de evaluar la evolución del consumo energético de un mismo edificio, comparando sus consumos anuales, la definición de la superficie no es significativa, a no ser que haya habido cambios importantes en el edificio. Pero para comparaciones frente a otros edificios, si que constituye un parámetro importante a definir. Por ejemplo, la inclusión o no de los muros exteriores puede suponer diferencias de hasta del 5%, y la inclusión o no de los espacios no acondicionados puede llegar a tener un impacto mucho mayor.

Otro aspecto importante a tener en cuenta sobre la superficie del edificio es que esta suele ser evaluada una sola vez, y no suele ser modificada cuando se producen ampliaciones o redistribuciones en el edificio, ya que es muy común la inexistencia de planos o documentación al respecto.

Se requiere, por tanto, establecer una normativa ampliamente aceptada, para definir aquellos aspectos esenciales en el cálculo de la superficie del edificio que permitan realizar comparaciones consistentes y útiles.

El NREL¹⁵ lleva trabajando desde hace algunos años en esta dirección, y ha desarrollado un documento para estandarizar las definiciones y medidas de la geometría del edificio, destinado al análisis del comportamiento energético de edificios (NREL, 2005).

¹³ American Society for Testing and Materials

¹⁴ American National Standards Institute/Building Owners and Managers Association standards

¹⁵ National Renewable Energy Laboratory

3.5.2 Clima

El ajuste de los consumos en función de las condiciones climáticas no suele llevarse a cabo. En muchos casos por no disponer de datos meteorológicos fiables que permitan la corrección para distintos periodos de tiempo.

La problemática se encuentra ligada a la posibilidad de que el año o el periodo en el que es evaluado el edificio, se encuentren muy alejados, en cuanto a condiciones meteorológicas, del año o periodo de referencia. En estos casos es recomendable llevar a cabo algún tipo de corrección de las magnitudes evaluadas, en función de la relación que exista entre el año o periodo evaluado y el año o periodo de regencia, para poder obtener valores comparables entre sí.

En cuanto a cómo establecer esta relación entre años meteorológicos diferentes y cómo evaluar el factor que corrija las posibles desviaciones producidas, existen varias técnicas.

La más simple, pero menos rigurosa, sería la que corrige mediante una relación lineal entre los grados días de calefacción o de refrigeración, dependiendo de la estación. Otros métodos más sofisticados emplean datos horarios para generar correlaciones que corrigen en función de un mayor número de parámetros climáticos.

3.6 Métodos de desglose del consumo energético

El objetivo de los métodos de desglose es la obtención, a partir de valores globales de consumo, de los consumos correspondientes a cada uno de los usos que serán objeto de evaluación durante la certificación energética del edificio existente. El nivel de segregación alcanzado es importante para garantizar una buena calidad en el posterior análisis del comportamiento energético del edificio. La posibilidad de un análisis detallado del reparto de consumos en el edificio, permitirá conocer los usos energéticos más relevantes del edificio, lo que servirá como base para orientar acerca de las medidas de mejora más adecuadas al edificio, es decir, aquellas medidas con mayores potenciales de ahorro.

El consumo energético en edificios del sector residencial se podría dividir en cinco usos diferentes, como son: calefacción, refrigeración, agua caliente sanitaria, iluminación y electrodomésticos. Los electrodomésticos, a su vez, se pueden subdividir en frigoríficos, lavadoras, etc.

Los procedimientos propuestos para el desglose de consumos para cada uno de los usos anteriores podrán llevarse a cabo de diversas formas, dependiendo del tipo de caracterización, si se encuentra basada en monitorización o en facturas.

El primer procedimiento es el basado en la monitorización detallada del edificio, similar a las realizadas por los países que colaboraron en la realización del proyecto europeo EURECO (EURECO, Enero de 2002), desarrollado dentro del programa SAVE. Este método arroja resultados muy precisos acerca del reparto energético por usos que se da lugar en los edificios estudiados, el inconveniente principal se encuentra en la dificultad de llevar a cabo campañas masivas de monitorización en el sector residencial, por el alto costo que conlleva. Por este motivo la amplitud de la muestra de viviendas a monitorizar se encuentra limitado, por lo que la representatividad de la misma puede no llegar a ser demasiado elevada. A pesar de ello, los resultados de una campaña de monitorización detallada pueden resultar muy útiles para predecir aquellos consumos que muestren poca variabilidad, como el consumo en electrodomésticos por ejemplo. También puede resultar de gran utilidad a la hora de validar los otros métodos existentes, que, con carácter general, se encuentran basados en estimaciones.

En segundo lugar se puede recurrir a los métodos que parten de bases de datos más extensas, representativas de la población real de edificios residenciales. Estas bases de datos deben contener datos acerca de los edificios y de sus facturas energéticas. Para desglosar el dato global del consumo procedente de la factura energética se procede al modelado de los consumos por usos mediante ecuaciones no lineales. En función del grado de detalle de los datos disponibles se podrán emplear dos métodos diferentes para proceder a la segregación por usos, el método basado en modelos de simulación y el método basado en técnicas de regresión.

3.6.1 Desglose de facturas energéticas basado modelos de simulación

Este primer método se basa en la utilización de herramientas de simulación energética de edificios para la estimación del consumo energético por usos. En este caso se requiere una base de datos muy detallada de los edificios, con un número de variables muy extenso, que permita introducirlos en la herramienta de simulación con el grado de detalle requerido por la misma.

En este caso, los datos relativos a las facturas energéticas de los edificios en los periodos evaluados se usarán para la verificación de los consumos estimados

mediante la herramienta. Este proceso de verificación debe servir para depurar los datos de entrada y refinar el modelo de simulación. A través de la diferencia entre los datos de consumos obtenidos de la herramienta de simulación y los datos procedentes de la factura energética se deberá evaluar la bondad de los resultados, modificando aquellos datos con mayor grado de incertidumbre, como los relacionados con las condiciones de operación y funcionamiento. Una vez que el modelo se ha calibrado se puede ajustar el desglose de consumos por usos en la misma proporción que el resultado de la simulación.

Algunas de las dificultades asociadas a este método es que los modelos de simulación energética requieren del conocimiento de las características ocupacionales y funcionales del edificio, difíciles de conocer y estimar en el sector residencial, que pueden depender de variables socioeconómicas y tener un importante efecto sobre el consumo energético del edificio (M. Aydinalp y otros, 2003). La mayor ventaja de este tipo de métodos se encuentra relacionada con la riqueza de los resultados obtenidos a partir de las herramientas de simulación y con la posibilidad de establecer diversos escenarios que mejoren la eficiencia energética y evaluar el impacto de los mismos. Es por ello que este tipo de métodos se presenta como una buena alternativa a para el desarrollo de herramientas enfocadas a la propuesta de mejoras energéticas, además de la caracterización.

3.6.2 Desglose de facturas energéticas basado en técnicas de regresión

El segundo método utiliza técnicas estadísticas para la estimación de los consumos por usos. Un ejemplo de este tipo de métodos es el denominado "conditional demand analysis" (CDA). En este caso se llevan a cabo estimaciones acerca de los consumos energéticos asociados a los distintos usos y fuentes de energía en base a diversas variables relacionadas con las características y uso del edificio (Hsiao y otros, 1995). Para ello requiere un estudio previo acerca de la relación funcional entre las variables dependientes, que serán los consumos por usos, y el resto de variables disponibles de la base de datos, estableciendo unos modelos cuyos parámetros se ajustarán mediante técnicas de regresión.

En este caso no es preciso disponer de una base de datos tan detallada, ya que no se lleva a cabo ningún modelado del edificio, como en el método anterior, pero si es necesaria una base de datos muy extensa, dado el gran número de variables independientes necesarias en las ecuaciones de regresión. Estos modelos, basados en técnicas estadísticas, tienen el inconveniente de que no ofrecen la misma riqueza de resultados que los anteriores. Además, el resultado puede ser

irreal, debido al problema de colinealidad que puede presentarse entre las variables del modelo de regresión. Por el contrario, su facilidad de desarrollo es mayor, siempre que se disponga de unas bases de datos suficientemente amplias. Otra ventaja importante es que en este caso el desglose se lleva a cabo directamente, sin necesidad de hacer hipótesis acerca de la ocupación y el funcionamiento del edificio.

A continuación se resumirá, a modo de ejemplo, el procedimiento empleado por el DOE¹⁶ para desglosar por usos los datos de consumos procedentes de sus bases de datos sobre consumos en viviendas, conocida como RECS, que ha servido como base de muchos de los temas desarrollados en la presente tesis.

Ejemplo de desglose basado en técnicas de regresión: base de datos RECS

Un ejemplo de este método es el empleado en las bases de datos sobre consumos energéticos correspondientes al sector residencial en Estados Unidos (EIA, 1996), que se llevan a cabo desde el año 1978. En el Anexo b de la tesis se describe con detalle el contenido de estas bases de datos.

En ellas aparece el consumo energético de las viviendas por fuente de energía, total y dividido en los siguientes usos finales:

- Calefacción
- Agua caliente sanitaria
- Aire acondicionado
- Frigoríficos
- Electrodomésticos

Los datos sobre consumos energéticos de las viviendas encuestadas parten del contenido de las facturas energéticas, y estas muestran el consumo total, no segregado por usos. Por ello se lleva a cabo un procedimiento basado en técnicas de regresión múltiple y no lineal para la estimación de los consumos referidos a cada fuente energética y para cada uso final. Esta misma técnica es utilizada para estimar los consumos totales para cada fuente de energía para aquellas viviendas encuestadas de las que no se hayan podido obtener los datos de las facturas.

Este procedimiento parte de la premisa de que el consumo energético de cada fuente de energía puede ser expresado como la suma de los consumos

¹⁶ US Department of Energy. <http://www.eia.doe.gov/>

correspondientes a cada uno de los usos energéticos (EIA, 1993; M. Aydinalp y otros, 2003). Por tanto, para cada fuente de energía, la variable dependiente será el consumo energético total y las variables independientes variarán en función del tipo de energía, ya que cada fuente energética no servirá para dar los mismos servicios energéticos (ver Tabla 3.1).

Tabla 3.1: 1993 RECS. Usos finales de energía para las distintas fuentes energéticas¹⁷

	Space Heat	Water Heat	Air Conditioners	Refrigerators	Appliances
Natural Gas	X	X	X		X
Electricity	X	X	X	X	X
Fuel Oil	X	X			X
LPG	X	X			X
Kerosene	X	X			X

El modelo general que representa el desglose del consumo para cada fuente de energía se puede representar mediante la siguiente expresión:

$$Y_{CON} = CALER_{CON} + ACS_{CON} + AIRC_{CON} + RFRG_{CON} + ELECT_{CON} \quad [3.1]$$

Donde:

Y_{CON} es el consumo anual estimado

$CALER_{CON}$ es el consumo de calefacción anual estimado

ACS_{CON} es el consumo de agua caliente sanitaria anual estimado

$AIRC_{CON}$ es el consumo de aire acondicionado anual estimado

$RFRG_{CON}$ es el consumo de dispositivos de refrigeración (frigoríficos y congeladores) anual estimado

$ELECT_{CON}$ es el consumo de electrodomésticos anual estimado

Para ajustar el modelo mediante las técnicas de regresión no lineales se buscará minimizar la suma de los cuadrados del error cometido, que representa la diferencia entre la estimación del consumo anual y el consumo real procedente de facturas, y que se calcula mediante la siguiente expresión:

¹⁷ Fuente: Energy Information Administration, Office of Energy Markets and End Use, the 1993 Residential Energy Consumption Survey.

$$error = (Y)^{3/4} - (Y_{CON})^{3/4}$$

[3.2]

Donde:

Y es el consumo anual real, de la factura.

Y_{CON} es el consumo anual estimado

El desarrollo de cada uno de los términos de la ecuación [3.1] muestra una dependencia funcional de un determinado número de variables procedentes de la base de datos. Estos modelos consisten, con carácter general, en un término global multiplicado por varios términos de ajustes. Este formato permite ajustar o corregir cada componente por múltiples factores.

El inconveniente es que se generan ecuaciones con un marcado carácter no lineal, por lo que las técnicas habituales para el ajuste de regresiones lineales multivariantes no se pueden emplear para la estimación de los parámetros de los modelos empleados. Para ello se deben emplear técnicas de regresión no lineal específicas, concretamente en este caso usan los procedimientos de regresión no lineal contenidos en el paquete informático SAS¹⁸.

3.7 Estimación del rendimiento medio estacional

El rendimiento global de una instalación podría representarse mediante la siguiente expresión:

$$\eta_{Global} = \phi(\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n)$$

[3.3]

Donde $\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n$ representan los rendimientos parciales de los equipos que componen el sistema de climatización.

Pero no sólo los equipos influyen sobre el rendimiento global del sistema sino también al acoplamiento existente entre ellos. De hecho es la función ϕ la que caracteriza la disposición y el enlace de los distintos equipos representando de esta forma el tipo de sistema empleado y las estrategias de operación escogidas para su funcionamiento.

¹⁸ Statistical Analysis System (SAS) Institute (Cary, North Carolina).

En el caso de los equipos, el rendimiento nominal, ya sea de una caldera, de una bomba de calor o de un equipo de frío, es el principal parámetro utilizado por los fabricantes para definir el comportamiento de los mismos. Se trata de un rendimiento instantáneo que expresa la relación entre la potencia instantánea aprovechada del equipo y la potencia eléctrica, o térmica, absorbida en ese mismo instante, y es obtenido en un banco de pruebas, bajo unas condiciones puntuales de operación.

Un ejemplo de ello es la determinación del EER de los acondicionadores de aire según el programa de certificación de Eurovent¹⁹, que establece unas condiciones del ensayo de acuerdo con la norma europea prEN 14511, tal y como se muestra en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2: Condiciones de ensayo para fijar valores Standard de los acondicionadores de aires según la norma prEN 14511.

	UNIDAD INTERIOR		UNIDAD EXTERIOR			
	Entrada de aire		Entrada de aire		Agua**	
	Bulbo seco (°C)	Bulbo húmedo (°C)	Bulbo seco(°C)	Bulbo húmedo* (°C)	Entrada (°C)	Salida *** (°C)
Acondicionadores de aire refrigeración	27	19	35	24	30	35
Acondicionadores de aire calefacción	20	15 max.	7	6	5****	

Por lo tanto, dado que la coincidencia simultánea de todas las condiciones para las que el equipo fue ensayado es poco probable, el rendimiento nominal será diferente al rendimiento que pueda medirse en un equipo ya instalado. De hecho, pueden existir diferencias importantes entre el rendimiento de un equipo para distintas condiciones de funcionamiento.

Por ejemplo, la mayoría de los equipos de climatización empleados en el sector residencial y el pequeño terciario regulan su funcionamiento a carga parcial mediante ciclos de encendido y apagado. Esto lleva consigo una degradación del rendimiento del equipo, que según algunos estudios (Hugo Henderson y otros, 1999) dependerá del tiempo de respuesta del sistema en el encendido y la duración de cada ciclo. En la Tabla 3.3 se observan los rendimientos medios de equipos autónomos calculados para distintos grados de carga parcial, suponiendo una regulación mediante ciclos de encendido y apagado.

¹⁹ <http://www.eurovent-certification.com/es/Programas>

Tabla 3.3. Ejemplo de variación de rendimientos a carga parcial de equipos autónomos.

Factor de carga parcial	25%	50%	75%	100%
EER	2.56	2.84	3.04	3.2
COP	3.01	3.20	3.36	3.5

Como el rendimiento instantáneo de los equipos varía durante su operación, es posible que el rendimiento nominal no represente fehacientemente su comportamiento energético. Por ello sería recomendable la obtención de un rendimiento medio, teniendo en cuenta las posibles variaciones del rendimiento a lo largo de un determinado periodo de funcionamiento. Este se denomina rendimiento medio estacional, y representa la relación entre la energía aprovechada en el equipo durante un periodo determinado de funcionamiento, normalmente una estación completa, y la energía total consumida por el equipo durante el mismo periodo.

Pero la obtención del rendimiento medio estacional, ya sea de un único equipo o de una instalación completa, es una tarea difícil, ya que se necesita conocer la evolución del rendimiento instantáneo durante ese periodo, que depende de las condiciones de operación y de carga parcial en cada instante. Dado que estas condiciones son variables, el único modo de evaluar con exactitud el rendimiento medio estacional sería mediante la simulación del equipo o mediante la medida directa de su consumo y de la demanda energética cubierta durante un periodo de tiempo, normalmente una estación completa.

En otras palabras, el rendimiento medio estacional de un equipo no depende únicamente del equipo y de su comportamiento frente a las condiciones de operación, sino que dependerá también de la variación de las condiciones a las que se exponga durante el periodo de operación. Por ejemplo, un equipo con una capacidad sobreestimada estará expuesto a un grado de carga parcial excesivo (ver Figura 3.2), con lo que su rendimiento medio se verá afectado y será menor que el del mismo equipo dimensionado correctamente.

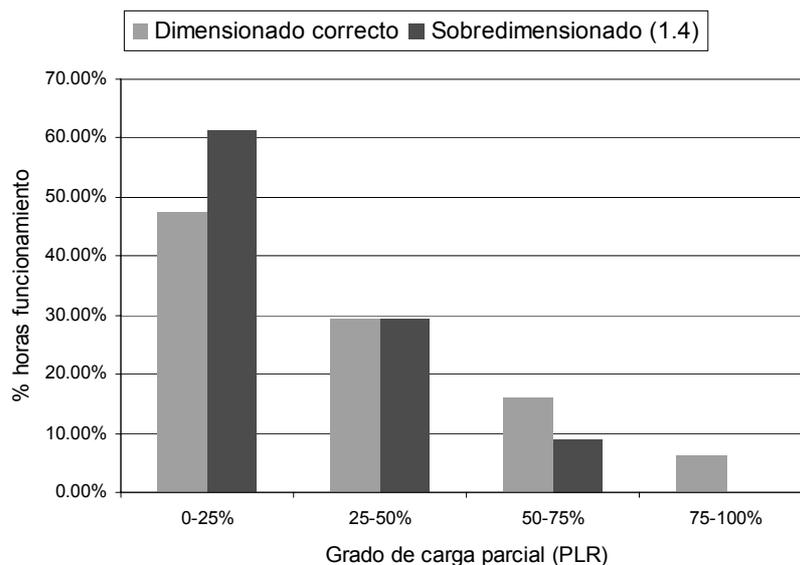


Figura 3.2: Ejemplo de diferencias entre el grado de carga parcial sobre un equipo autónomo en régimen de calefacción dimensionado correctamente y otro dimensionado en exceso.

El IDAE²⁰, con el fin de incrementar la eficiencia energética de las instalaciones térmicas de los edificios ha promovido la redacción de una serie de Guías Técnicas dirigidas a proyectistas, instaladores, mantenedores, inspectores y usuarios de las mismas. Concretamente, la “Guía Técnica sobre Procedimientos de Inspección Periódica de Eficiencia Energética para la Determinación del Rendimiento de Plantas Enfriadoras de Agua y Equipos Autónomos de Tratamiento de Aire”, pretende responder al requerimiento de la Directiva anteriormente expuesto, proponiendo unos procedimientos para la evaluación de los rendimientos energéticos de las plantas enfriadoras de agua y los equipos autónomos de tratamiento de aire. La guía análoga a la anterior pero para calderas, denominada “Guía Técnica sobre Procedimientos de Inspección Periódica de Eficiencia Energética para Generadores de Calor”, se encuentra aún en desarrollo.

En esta guía se desarrollan unos métodos prácticos para la determinación de los rendimientos instantáneos de los equipos, indicando las medidas necesarias a tomar en cada caso. Pero establece como único procedimiento válido para la determinación del rendimiento medio estacional el basado en la medición directa, el registro y el cómputo total de consumos durante el periodo correspondiente y en la identificación de la curva de carga real de potencia sobre los equipos durante el mismo periodo. De la integración de esta curva se obtendría la demanda energética sobre el equipo que, dividida por el consumo registrado, daría como resultado su rendimiento medio estacional (ver ecuación [3.2]).

²⁰ Instituto para la Diversificación y el ahorro de la Energía. <http://www.idae.es/revision-rite/documentos.asp>

$$\bar{\eta}_i = \frac{\int_{t_0}^{t_n} P_i(t) \cdot dt}{C_i} \quad [3.4]$$

Donde:

$P_i(t)$: Representa la curva de variación de la carga sobre el equipo o la curva de variación de la potencia aportada por el equipo.

C_i : Representa el consumo total del equipo asociado al periodo de tiempo comprendido entre t_0 y t_n .

En el caso de optar por una metodología de caracterización basada en monitorización, se podrían computar los consumos de los equipos durante un periodo de tiempo. Si además se logra evaluar la demanda energética durante este mismo periodo, se podría obtener el rendimiento medio estacional de cada equipo o del conjunto de la instalación.

Pero si se opta por la caracterización basada en facturas sería necesario recurrir a una simulación del edificio durante una estación completa para evaluar las variaciones de las condiciones de funcionamiento a las que quedan expuestos los equipos. En su defecto se puede optar por un método simplificado, que estime las variaciones de las condiciones de funcionamiento sobre los equipos a partir de una información básica sobre el edificio y las condiciones climáticas en las que se encuentra. Este último método será el que se desarrolle en los siguientes apartados.

3.7.1 Método simplificado para el cálculo del rendimiento medio estacional

La estimación del rendimiento medio estacional como parte del proceso de caracterización energética va a permitir distinguir entre demanda y consumo.

Esto implica el conocimiento de tres indicadores energéticos como son la demanda, el consumo y el propio rendimiento medio del sistema. Estos indicadores podrán ser empleados durante el proceso de evaluación facilitando una mayor información acerca del comportamiento energético del edificio, y podrá servir como base de partida que oriente acerca de las posibles medidas de mejora a aplicar.

El método que se describirá a continuación consiste en la corrección del rendimiento nominal de un equipo de climatización en función de la variación de las

condiciones de operación y de carga parcial ocurrida durante un periodo determinado. Para ello se va a requerir la siguiente información:

1. La caracterización del comportamiento de los equipos implicados fuera de las condiciones nominales de operación y a carga parcial.
2. La estimación de la variación de las condiciones de operación y de carga parcial que sufrirá el equipo durante el periodo de tiempo a considerar.

1. Curvas de comportamiento de los equipos

Para caracterizar correctamente el comportamiento energético de un equipo, teniendo en cuenta las posibles variaciones de su consumo y de su capacidad durante un determinado periodo de operación, será necesario realizar ensayos para distintas condiciones de operación y para distintos regímenes de carga parcial.

Algunos programas de simulación de sistemas, como el DOE-2 (LBL, 1990), calculan el consumo de los equipos para cada instante como un producto entre su valor nominal y unas funciones que tengan en cuenta las variaciones respecto a las condiciones de operación y respecto al factor de carga parcial. Estos procedimientos se basan en el "principio de separación de variables", considerando independiente la variación debida a las condiciones de operación de la debida a la carga parcial (Juan F. Coronel y otros, 2006).

Con carácter general se puede representar la capacidad disponible de un equipo, CAP_{actual} , como un producto de su capacidad nominal y una función que la corrige en función de las condiciones de operación, como se representa en la ecuación [3.5]

$$CAP_{actual} = CAP_{nom} \cdot Q_1(T_1, T_2) \quad [3.5]$$

Donde:

CAP_{nom} es la capacidad del equipo en condiciones nominales

$Q_1(T_1, T_2)$ es la curva que corrige la capacidad disponible del equipo en función de las temperaturas de operación. Por ejemplo, para un equipo autónomo de frío estas pueden ser la temperatura húmeda del aire del local (T_1) y la temperatura seca del aire exterior (T_2).

De la misma forma, se puede representar el consumo de un equipo en un determinado instante, C_{actual} , como el producto del consumo en condiciones

nominales, C_{nom} , por una serie de funciones que corrigen en función de las condiciones de operación y de carga parcial actuales. Ver ecuación [3.6]

$$C_{actual} = C_{nom} \cdot Q_1(T_1, T_2) \cdot C_1(T_1, T_2) \cdot C_2(fcp) \quad [3.6]$$

Donde:

C_{nom} es el consumo del equipo en condiciones nominales.

$C_1(T_1, T_2)$ es la curva que caracteriza la variación del consumo del equipo en función de las condiciones de operación.

$C_2(fcp)$ es la curva que caracteriza la variación del consumo a carga parcial del equipo.

fcp es el factor de carga parcial del equipo y representa la relación entre la carga actual sobre el equipo frente a la capacidad del equipo en las condiciones actuales de funcionamiento. Tal y como se representa en la ecuación siguiente:

$$fcp = \frac{Q_{actual}}{CAP_{actual}} \quad [3.7]$$

A pesar de que se requiere el ensayo de los equipos para diferentes condiciones de operación y de carga parcial, los fabricantes suelen facilitar el consumo medido a plena carga y para unas condiciones de trabajo determinadas

2. Estimación de la variación de las condiciones de operación y de carga parcial

Se requiere la estimación de la variación de las condiciones de operación y de carga parcial sobre un equipo determinado durante un periodo de tiempo.

Para caracterizar la variación de las condiciones de carga parcial se propone representar, mediante un histograma de frecuencias, el porcentaje de horas del equipo trabajando dentro de cada rango de carga parcial. Tal y como se representa en la Figura 3.3. Se definen un total de once clases, y en cada clase el factor de carga parcial varía entre los siguientes límites: 0-10%; 10-20%; 20-30%; 30-40%; 40-50%; 50-60%; 60-70%; 70-80%; 80-90% y 90-100%.

Esta distribución de frecuencias es difícil de obtener ya que depende de muchos factores a la vez como son: el tipo de sistema al que pertenece el equipo,

el tipo de edificio (epidermis, cargas internas, geometría,...), el clima y las condiciones de operación. La obtención de este histograma de frecuencias requiere la simulación del conjunto formado por el edificio y el sistema.

Para la obtención de la distribución de frecuencias representada en la Figura 3.3. y de otras empleadas en los ejemplos posteriores, se han simulado mediante el programa DOE-2.2 dos edificios: una vivienda unifamiliar adosada y un bloque de viviendas. En el anexo D se describen detalladamente las características de estos edificios.

Para evaluar el efecto de la variación de las condiciones de operación sobre el rendimiento del equipo se realizarán las siguientes hipótesis:

1. Se tomará constante el valor de la temperatura relativa al aire del local climatizado, por lo que no se tiene en cuenta el efecto sobre el rendimiento de un cambio en las condiciones interiores.
2. Se estimará la variación de la temperatura exterior mediante la obtención, para cada rango de carga parcial establecido anteriormente, de una temperatura media. Se puede ver evolución del T_i estimado para cada rango de carga parcial en la Figura 3.3.

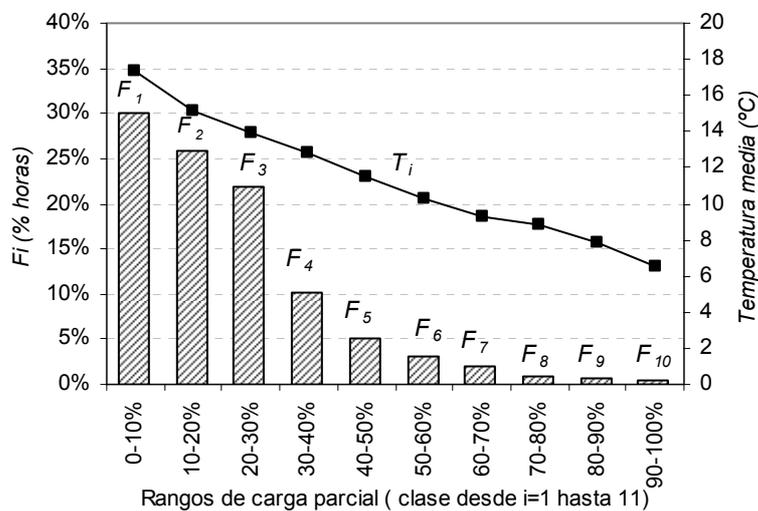


Figura 3.3 Ejemplo de frecuencias de operación de un equipo para diferentes rangos de carga parcial.

Este método es más exacto para edificios con clara dependencia de la temperatura exterior. Los edificios con una alta carga interna, como ocurre en el sector comercial, pueden no presentar una relación clara entre la temperatura exterior y el rango de carga parcial, por lo que este método no sería recomendable.

Se propone la simulación de distintas tipologías de edificios, situados en distintos climas, y con varias condiciones de operación para obtener una muestra representativa de las distribuciones de frecuencias asociadas los diversos equipos empleados en el sector residencial.

3. Corrección del rendimiento nominal del equipo

Tal y como se muestra en la ecuación [3.8], dado que el rendimiento medio estacional se define como la demanda sobre el equipo durante un período de tiempo determinado dividida por el consumo total correspondiente al mismo periodo, según las ecuaciones [3.6] y [3.7], este se podría determinar mediante la integral de la capacidad requerida al equipo en las condiciones actuales, o la carga instantánea sobre el equipo, dividida por la integral para el mismo periodo del consumo del equipo en un determinado instante.

$$\bar{\eta} = \frac{D}{C} = \frac{\int_{\text{periodo}} Q_{\text{actual}}}{\int_{\text{periodo}} C_{\text{actual}}} = \frac{\int_{\text{periodo}} CAP_{\text{actual}} \cdot f_{cp}}{\int_{\text{periodo}} C_{\text{nom}} \cdot Q_1(T_1, T_2) \cdot C_1(T_1, T_2) \cdot C_2(f_{cp})} \quad [3.8]$$

Teniendo en cuenta que el consumo del equipo en condiciones nominales se puede expresar como la capacidad nominal dividida por el rendimiento nominal (ver ecuación [3.9]), y que la capacidad del equipo en las condiciones actuales se puede representar según la ecuación [3.5]. El rendimiento medio estacional se podrá representar a través de la ecuación [3.10], como el producto del rendimiento nominal por un factor F_{η} , que lo corregirá en función del comportamiento del equipo fuera de las condiciones nominales y de carga parcial.

$$C_{\text{nom}} = \frac{CAP_{\text{nom}}}{\eta_{\text{nom}}} \quad [3.9]$$

$$\bar{\eta} = \eta_{\text{nom}} \cdot \frac{\int_{\text{periodo}} Q_1(T_1, T_2) \cdot f_{cp}}{\int_{\text{periodo}} Q_1(T_1, T_2) \cdot C_1(T_1, T_2) \cdot C_2(f_{cp})} = \eta_{\text{nom}} \cdot F_{\eta} \quad [3.10]$$

Conocida la distribución de frecuencias a carga parcial, se podrían aproximar las integrales anteriores a la suma ponderada en función de la frecuencia del equipo

dentro de cada rango de carga parcial F_i . De esta forma se el cálculo del factor corrector del rendimiento nominal F_η se simplifica mediante la ecuación [3.11].

$$F_\eta = \frac{\sum_{i=1}^{10} Q_1(T_1, T_i) \cdot fcp_i \cdot F_i}{\sum_{i=1}^{10} Q_1(T_1, T_i) \cdot C_1(T_1, T_i) \cdot C_2(fcp_i) \cdot F_i} \quad [3.11]$$

Donde:

F_i : Frecuencia del equipo dentro del rango de carga parcial "i".

fcp_i : Factor de carga parcial medio correspondiente al rango de carga parcial "i".

$Q_1(T_1, T_i)$: Valor de la curva que corrige la capacidad disponible del equipo en función de las temperaturas de operación para una temperatura T_1 fija y una temperatura T_2 igual a la temperatura media exterior correspondiente al rango de carga parcial "i".

$C_1(T_1, T_i)$: Valor de la curva que caracteriza la variación del consumo del equipo en función de las temperaturas de operación para una temperatura T_1 fija y una temperatura T_2 igual a la temperatura media exterior correspondiente al rango de carga parcial "i".

$C_2(fcp_i)$: Valor medio de la curva que caracteriza la variación del consumo a carga parcial del equipo para un rango de carga parcial "i".

Ejemplo 3.1. Corrección del rendimiento nominal en equipo autónomo de refrigeración

El ejemplo que se mostrará para ilustrar el procedimiento parte de la simulación de una vivienda unifamiliar y en bloque situada en Sevilla, descrita en el anexo D. Se obtiene, para cada caso, el porcentaje de horas del equipo trabajando dentro de cada rango de carga parcial y la temperatura media exterior correspondiente a cada rango de carga parcial.

Analizando las figuras siguientes, resultado de la simulación en DOE-2 de los casos descritos en el anexo D, se aprecia como la variación de la temperatura media exterior en función del rango de carga parcial es semejante en ambos casos. Se podría, por tanto caracterizar la evolución de estas temperaturas medias para distintos climas y tipos de edificios, de manera que no fuese necesario proceder a la

simulación del edificio para poder obtener una aproximación del rendimiento medio estacional mediante el método propuesto.

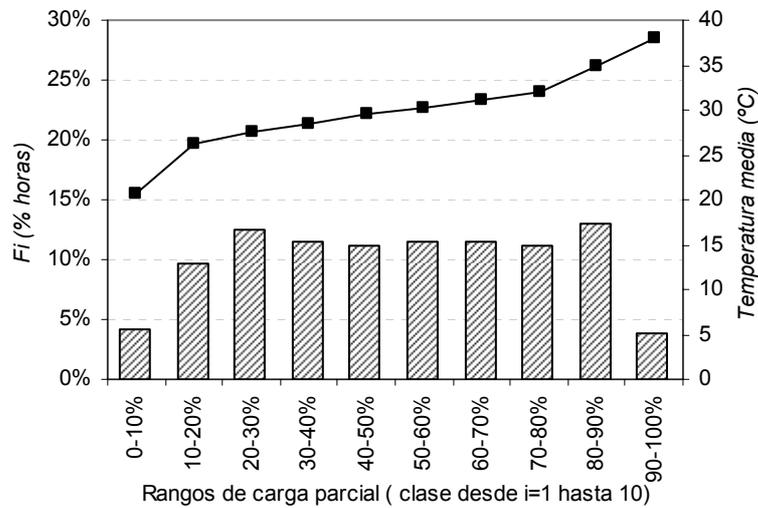


Figura 3.4 Frecuencias de operación a carga parcial y temperatura media exterior para un equipo autónomo en régimen de refrigeración. Vivienda adosada. Sevilla

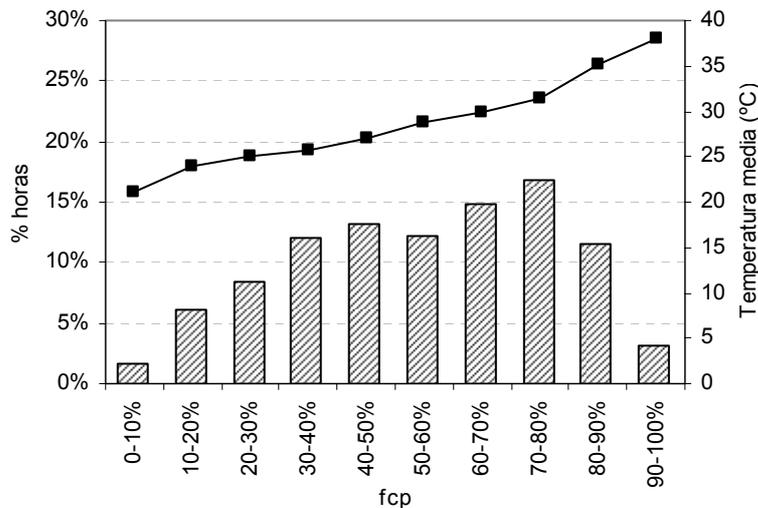


Figura 3.5 Frecuencias de operación a carga parcial y temperatura media exterior para un equipo autónomo en régimen de refrigeración. Bloque de viviendas. Sevilla

Para la aplicación del método se dispone de las curvas de comportamiento de equipos autónomos en régimen de refrigeración empleadas por el programa DOE-2. Todas ellas siguen el patrón expuesto en las ecuaciones [3.5] y [3.6] y se encuentran descritas en el anexo C de la tesis. Algunas de estas curvas dependen tanto de la temperatura seca exterior, como de la temperatura húmeda del local. Se ha despreciado el efecto de la variación de la temperatura húmeda interior, tomando un valor constante de la misma igual a 19°C.

En las tablas siguientes se representa el valor de las curvas correspondiente a cada rango de carga parcial.

Tabla 3.4. Cálculo de parámetros para la estimación del factor corrector del rendimiento nominal de equipo autónomo en vivienda unifamiliar adosada. Simulado para Sevilla.

Clase	Rango de carga parcial	f_{cp_i}	$Q_1(T_i)$	$C_1(T_i)$	$C_2(f_{cp_i})$
1	0-10%	0,05	1,12	0,76	0,20
2	10-20%	0,15	1,07	0,84	0,24
3	20-30%	0,25	1,06	0,87	0,30
4	30-40%	0,35	1,05	0,88	0,38
5	40-50%	0,45	1,04	0,90	0,48
6	50-60%	0,55	1,03	0,91	0,59
7	60-70%	0,65	1,02	0,93	0,70
8	70-80%	0,75	1,01	0,95	0,80
9	80-90%	0,85	0,99	1,00	0,90
10	90-100%	0,95	0,96	1,07	0,97

Tabla 3.5. Cálculo de parámetros para la estimación del factor corrector del rendimiento nominal de equipo autónomo en vivienda en bloque. Simulado para Sevilla.

Clase	Rango de carga parcial	f_{cp_i}	$Q_1(T_i)$	$C_1(T_i)$	$C_2(f_{cp_i})$
1	0-10%	0,05	1,12	0,76	0,20
2	10-20%	0,15	1,09	0,81	0,24
3	20-30%	0,25	1,08	0,82	0,30
4	30-40%	0,35	1,07	0,84	0,38
5	40-50%	0,45	1,06	0,86	0,48
6	50-60%	0,55	1,04	0,89	0,59
7	60-70%	0,65	1,03	0,91	0,70
8	70-80%	0,75	1,02	0,94	0,80
9	80-90%	0,85	0,99	1,01	0,90
10	90-100%	0,95	0,96	1,06	0,97

Tabla 3.6. Corrección de rendimientos nominales en función de las condiciones de operación y carga parcial

Tipo de vivienda	η_{nom} (EER_{nom})	F_η	$\bar{\eta}$
Unifamiliar adosada	2.5	0.97	2.42
Bloque	2.5	0.99	2.5

El ejemplo de la vivienda en bloque presenta un grado de carga parcial menor que el de la vivienda adosada, tal y como se aprecia en la Figura 3.4 y en la Figura 3.5. Por ello la penalización que sufre el rendimiento nominal durante la operación del equipo es menor en el caso del bloque. Este caso presenta un factor corrector del rendimiento nominal $F_{\eta} = 0.99$ frente al de 0.97 correspondiente a la vivienda adosada.

Ejemplo 3.2. Corrección del rendimiento nominal en caldera convencional y en caldera de condensación

El ejemplo que se mostrará para ilustrar el procedimiento parte de la simulación de una vivienda en bloque situada en Sevilla, descrita en el anexo D.

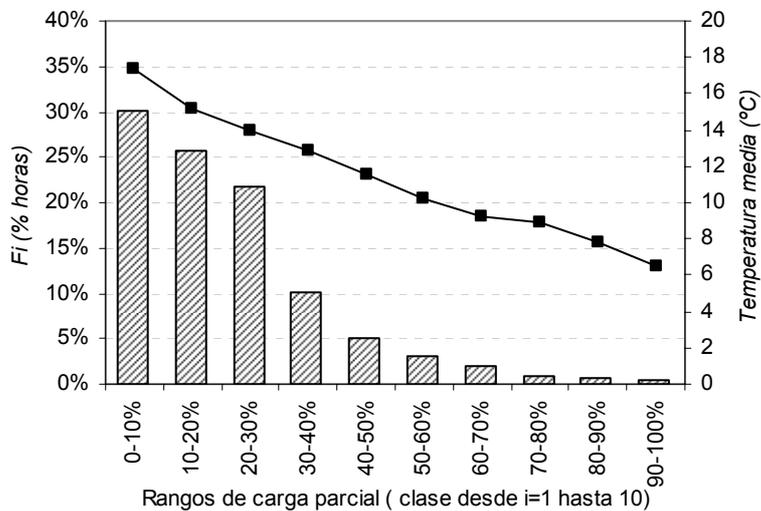


Figura 3.6 Frecuencias de operación a carga parcial y temperatura media exterior una caldera. Bloque de viviendas. Sevilla

Para la aplicación del método se dispone de las curvas de comportamiento de caldera estándar y de condensación que siguen el patrón expuesto en las ecuaciones [3.5] y [3.6] y se encuentran descritas en el anexo C de la tesis. Se ha despreciado el efecto de la variación de las temperaturas sobre el comportamiento de las calderas.

Tabla 3.7. Cálculo de parámetros para la estimación del factor corrector del rendimiento nominal de calderas estándar y de condensación en vivienda en bloque. Simulado para Sevilla.

Clase	Rango de carga parcial	f_{cp_i}	Estándar $C_2(f_{cp_i})$	Condensación $C_2(f_{cp_i})$
1	0-10%	0,05	0,06	0,04
2	10-20%	0,15	0,16	0,14
3	20-30%	0,25	0,26	0,23

4	30-40%	0,35	0,36	0,33
5	40-50%	0,45	0,45	0,43
6	50-60%	0,55	0,55	0,54
7	60-70%	0,65	0,65	0,64
8	70-80%	0,75	0,75	0,74
9	80-90%	0,85	0,85	0,85
10	90-100%	0,95	0,95	0,95

Tabla 3.8. Corrección de rendimientos nominales en función de las condiciones de operación y carga parcial

Tipo de caldera	η_{nom}	F_{η}	$\bar{\eta}$
Estándar	87%	0.97	84.4%
Condensación	92%	1.06	97.5%

El ejemplo la caldera estándar presenta un mal comportamiento a carga parcial, por ello su rendimiento nominal se encuentra penalizado, con un factor corrector $F_{\eta}=0.97$. Sin embargo la caldera de condensación mejora su comportamiento en condiciones de carga parcial, por lo que su rendimiento medio estacional es superior al nominal, con un factor corrector superior a la unidad e igual a 1.06.

3.8 Caracterización energética según la normativa europea

3.8.1 Definición de Indicadores de la Eficiencia Energética

El indicador global del comportamiento energético (Energy Performance Indicator) se define, según el último borrador de la norma del Comité Europeo de Normalización que trata sobre los métodos de expresión del comportamiento energético y sobre la certificación energética de los edificios (CEN prEN 15217, 2005), como la suma ponderada de los consumos energéticos por tipo de energía. Los factores de ponderación dependerán del modo en que se exprese en consumo energético, que, según la norma, puede ser como energía final, energía primaria, emisiones de CO2 y coste energético.

En este documento también queda abierta la posibilidad de complementar este indicador global con otros indicadores parciales, como la eficiencia energética de la envuelta edificatoria. En este caso se remite al lector a un anexo informativo donde se proponen algunos parámetros relacionados tanto con la epidermis como con los sistemas de calefacción y agua caliente sanitaria, susceptibles de ser obligados a cumplir unos requisitos mínimos.

No queda por tanto definido en su totalidad el conjunto de indicadores que han de caracterizar el comportamiento energético de un edificio. Dejando la posibilidad a los países miembros de complementar la información acerca del mismo a través de indicadores parciales.

3.8.2 Procedimientos de toma de medidas

La normativa europea (prEN 15203, 2005) desarrolla algunos aspectos relacionados con la medida de los parámetros necesarios para la obtención de los indicadores energéticos exigidos. También muestra un procedimiento para el ajuste de resultados en función de su dependencia climática o con respecto a variaciones en el periodo de medida (normalización climática y ajuste del periodo de medida). No se desarrolla un protocolo específico para la toma de medidas, ni un procedimiento de normalización y ajuste que contemple todas las posibilidades. Además no propone ningún procedimiento de desglose para emplear en el caso de recurrir a la obtención del consumo a partir de facturas.

El artículo 13 de la Directiva sobre la eficiencia del uso final de la energía y los servicios energéticos publicada en abril de 2006 (Directiva 93/76/CEE) trata sobre la medición y facturación informativa del consumo energético, y contiene los requisitos generales acerca de la información que los distribuidores de energía deben recoger de los contadores y suministrar a sus clientes. En ella se establece la necesidad de velar por la instalación de contadores en los puntos de consumo, lo que facilitaría la labor de desglose de consumos, que actualmente requiere un tratamiento específico dado que los consumos vienen dados a través de facturación global.

CAPÍTULO 4. EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO ENERGÉTICO

4.1 Introducción

La evaluación energética de un edificio se basa en la comparación de su consumo energético, o del indicador energético correspondiente, con un valor o conjunto de valores que denominaremos escenario de referencia o de comparación.

Cualquier método de certificación energética de edificios que implique una evaluación de su comportamiento a través de cualquiera de los indicadores energéticos posibles, requiere una delimitación previa del escenario de comparación. Este dependerá de muchos aspectos, algunos de ellos a fijar por los organismos públicos, y deberá adaptarse, en la medida de lo posible, a las exigencias y los objetivos fijados para el sistema de certificación.

La norma europea prEN 15217 (CEN prEN 15217, 2005), desarrollada por el Comité Europeo de Normalización (CEN), fija los métodos de expresión de la eficiencia energética y la certificación energética para los edificios. En su apartado número siete, propone que la evaluación del comportamiento energético de los edificios, necesaria para la certificación, se realice teniendo en cuenta las siguientes referencias:

- Referencia relativa a la normativa: se corresponde con el valor límite de consumo que cabe esperar de edificios nuevos similares al edificio objeto, conformes a la reglamentación vigente en 2006.

- Referencia relativa al stock: se corresponde con el valor de consumo que cabe esperar sea alcanzado por el 50% del parque de edificios existentes similares al edificio objeto.
- Referencia cero: se corresponde con edificios que producen más energía de la que usan.

En el propio documento se menciona la dificultad para obtener la referencia relativa al stock de edificios, dada la insuficiencia de datos estadísticos sobre consumos de edificios existente en la mayoría de países. De todas formas el empleo de la mediana en lugar de la media como referencia relativa al stock es muy interesante, ya que esta es mucho más robusta que la media frente a la presencia de anomalías en la muestra.

Se pone de manifiesto la importancia de disponer de una muestra significativa de datos reales de consumos para generar un escenario de comparación adecuado, sobre todo en el caso de evaluar edificios existentes, como se propone en la presente tesis. Según datos del proyecto ENPER-exist (K. Engelund y otros, 2006) gran parte de los países europeos, entre los que se encuentra España, no poseen suficiente información relativa al consumo energético del parque edificatorio, ver Figura 4.1.

		Austria	Belgium	Czech rep.	Cyprus	Germany	Denmark	Spain	Estonia	Finland	France	Greece	Hungary	Ireland	Italy	Lithuania	Luxembourg	Latvia	Malta	Netherlands	Poland	Portugal	Sweden	Slovakia	Slovenia	United Kingdoms	European Union	
		at	be	cs	cy	de	dk	es	et	fi	fr	gr	hu	ie	it	lt	lu	lv	mt	nl	pl	pt	se	sk	sl	uk	eu	
Characterisation of existing building stock																												
# buildings	Total, Res	⊙	⊙			⊙	⊙				⊙	⊙				⊙				⊙						⊙	⊙	
	Total, non Res	⊙	⊙																								⊙	⊙
area / type	Total, Res					⊙	⊙				⊙	⊙				⊙				⊙						⊙	⊙	
	Total, non Res	⊙	⊙																								⊙	⊙
typical const period	Total, Res	⊙	⊙			⊙	⊙				⊙	⊙				⊙				⊙						⊙	⊙	
	Total, non Res	⊙	⊙																								⊙	⊙
statistical	Total, Res	⊙	⊙			⊙	⊙				⊙	⊙				⊙				⊙						⊙	⊙	
	Total, non Res	⊙	⊙								⊙	⊙															⊙	⊙
estimate	Total, Res																											
	Total, non Res																											

Figura 4.1: Información disponible relativa al stock de edificios en los distintos países europeos.

4.2 Variaciones del escenario de comparación

Para obtener el escenario de comparación será necesario decidir con anterioridad el grado de similitud entre este y el edificio objeto, es decir, contra quién se va a comparar el edificio. En función de esta decisión el baremo variará en mayor o menor medida, dependiendo de la cantidad de aspectos característicos del edificio que permanezcan invariables e iguales a los del edificio objeto dentro del marco de comparación, eliminando de esta forma su efecto sobre la calificación

final obtenida por el edificio. Por ejemplo se podría decidir establecer un baremo distinto para cada tipo de edificio (residencial, no residencial), en este caso el grado de similitud existente entre el edificio objeto y el escenario de comparación empleado sería el tipo de uso del edificio. Este factor, tipo de uso, que contribuye a caracterizar al edificio, se mantendría invariante dentro del marco de comparación, es decir, el edificio objeto se compararían sólo con otros de su mismo tipo.

La elección del grado de similitud afecta de forma directa al escenario de comparación, ya que este deberá representar a aquellos edificios contra los que quiero comparar el edificio objeto, es decir, a la distribución de edificios que compartan con el edificio objeto las características fijadas según el grado de similitud. Los posibles grados de similitud que pueden darse, de menor a mayor nivel, son:

- A. Mismo sector o subsector (con condiciones de operación similares)
- B. A + mismo clima
- C. B + misma compacidad
- D. B + misma forma y dimensión
- E. B + misma forma, dimensión, orientación de las fachadas y relación vidrio/muro por fachada
- F. E + mismos sistemas de climatización y de agua caliente sanitaria

Estos seis grupos se han descrito de forma genérica, ya que sería necesario concretar con mayor precisión las variables a fijar en cada uno de ellos. En el nivel B habría que especificar, por ejemplo, qué se entiende al considerar el mismo clima entre el edificio objeto y los edificios que van a formar parte del escenario de comparación, debe escogerse una variable, o un conjunto de ellas, que representen el clima, podrían escogerse los grados-día de invierno y de verano como variables representativas del clima. En el resto de niveles habría que especificar también qué variables se mantendrían constantes para mantener la similitud entre el edificio de referencia y el escenario de comparación.

Esta decisión va a tener implicaciones importantes, ya que un mayor grado de similitud, mayor número de características del edificio iguales a las del edificio objeto dentro del marco de comparación. Esto daría lugar a una mayor variabilidad del baremo o del escenario de comparación, necesitando ser adaptado a cada caso concreto. Para el caso en el que el grado de similitud sea de nivel A (mismo sector), sería necesario establecer tantos escenarios de comparación como sectores se establezcan.

En definitiva lo que se pretende mediante la decisión de establecer el grado de similitud en cualquiera de los niveles anteriores es evitar posiciones de desigualdad frente a las exigencias del baremo, debido a factores que no puedan cambiarse o que sean difíciles de cambiar pero que afecten de manera directa al consumo energético, como por ejemplo las características ocupacionales del edificio, el clima, la forma y dimensión, etc.

Considerar la discriminación climática en el proceso de certificación es muy común en todos los sistemas, si bien hay muchos de ellos que no la consideran como es el caso del modelo danés (OPET, Septiembre 2003) o el método SAP (BRE, Julio 2001), de Reino Unido. Para el caso de España será indispensable llevarla a cabo debido a que posee una gran diversidad de climas, lo que obliga a variar el marco de comparación en función de la zona climática para mantener el mismo grado de exigencia en todas las regiones de país.

Es preciso indicar también que existe una diferencia fundamental entre evaluar un edificio en fase de diseño y un edificio existente, debido a que existen diversos aspectos como son forma, orientación, compacidad, relación vidrio/muro,... que serán difíciles, cuando no imposible, de cambiar una vez que el edificio está construido. Es importante recordar que estas características tendrán efecto sobre el comportamiento energético del mismo y en el caso de optar por niveles de similitud bajos, por ejemplo discriminando por clima y por sector, también influirán significativamente sobre la puntuación alcanzada por el edificio. Un ejemplo de ello lo constituiría un edificio con una mala orientación, o un edificio con muy baja compacidad. En estos casos, el optar por grados de similitud bajos situaría a estos edificios en una situación de inferioridad con respecto a otros de mejor orientación o de mayor compacidad del mismo tipo y de la misma localidad, ya que todos ellos serían evaluados según el mismo escenario de comparación.

En el caso extremo de ir a los mayores grados de similitud posibles, niveles E y F, sería necesario establecer un nuevo marco de comparación para cada edificio objeto, por lo que sería necesario desarrollar un procedimiento que generase un edificio de referencia similar en forma, dimensión, orientación, orientación, relación vidrio/muro y tipos de sistemas al edificio objeto. De esta forma se compara el edificio con él mismo, modificando el aislamiento térmico y los rendimientos de los sistemas. Este método, en el que el edificio se compara consigo mismo, con mayor o menor grado de similitud entre edificio objeto y edificio de referencia, se emplea en algunos esquemas de certificación energética existentes, véase, por ejemplo, en el capítulo dos de la tesis los métodos SAP (CAPÍTULO 2,

página 31), de Reino Unido, y HERS (capítulo 2, página 44), de Estados Unidos. También es una metodología muy usada como vía alternativa para el cumplimiento de la normativa energética. En el caso de España, el nuevo Código Técnico de la Edificación ofrece una nueva vía para el cumplimiento de las exigencias en cuanto a la demanda energética. También existe en Estados Unidos una aplicación de esta metodología con carácter normativo denominada "Title 24".

La norma europea prEN_15217 propone un grado de similitud del tipo B (mismo sector y mismo clima), dejando como alternativa posible la corrección en función de variaciones en las condiciones de uso del edificio. La adaptación del escenario de comparación a un uso específico, tal y como propone la normativa europea prEN_15217 en su apartado 7.2, exigiría una corrección en función del período de uso del edificio. Para su cumplimiento se necesitaría una metodología para la corrección del consumo debido a cambios en la operación.

A continuación se describirán tres procedimientos para la obtención del escenario de comparación, en función de los datos disponibles en el país sobre consumos energéticos.

4.3 Existencia de estadística amplia sobre consumos de edificios

En este caso se supone que se dispone de una estadística amplia sobre consumos de edificios con similares características que el edificio objeto. Para ello se han debido poner en práctica en el país campañas de recogida de datos, durante varios años, para poder elaborar la estadística correspondiente.

Un ejemplo de información amplia sobre consumos energéticos en edificios son las bases de datos que elabora cada cuatro años el Departamento de Energía de los Estados Unidos (CBECS²¹ y RECS²²). Estas se basan en las encuestas que viene realizando la Agencia de Información Energética (EIA) desde el año 1987. Estas encuestas reúnen información acerca de las características físicas de los edificios, de sus patrones de uso y ocupación, de los principales equipos empleados y de los tipos de energía utilizados para cada uso posible. Como ejemplo se muestran en la figura siguiente las distribuciones de consumos para cada uno de los usos energéticos obtenida a partir de la base de datos RECS 2001, correspondiente a edificios residenciales.

²¹ Commercial Building Energy Consumption Survey. <http://www.eia.doe.gov/emeu/cbecs/contents.html>

²² Residential Energy Consumption Survey. <http://www.eia.doe.gov/emeu/recs/contents.html>

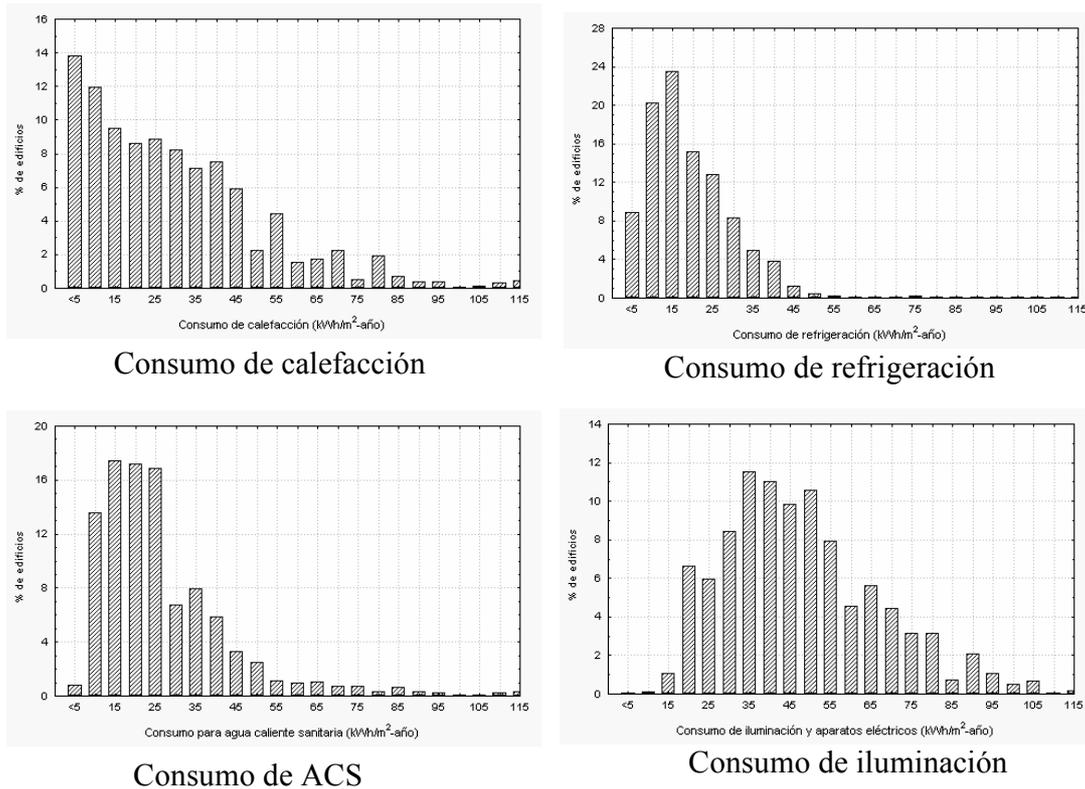


Figura 4.2: Distribuciones de consumos (kWh/m^2 -año) para los distintos usos energéticos. RECS 2001

En el caso de que exista una estadística suficientemente amplia sobre consumos energéticos en edificios, el procedimiento propuesto se basa en la metodología empleada en el programa de certificación "Energy Star" implantado en Estados Unidos. Este sistema se fundamenta en la determinación de un modelo de regresión múltiple, que represente la variación del consumo frente a una serie de variables. Estas variables se determinarán en función del grado de similitud escogido para el sistema de evaluación, de forma que a medida que aumenta el grado de similitud, aumentará el número de variables a considerar en el modelo de regresión. La selección de las variables podría llevarse a cabo entre aquellas que tuvieran una significación estadística y que, además, no pudieran ser controladas de manera directa por el usuario, como por ejemplo el clima (D. A. Hoffmeyer, 2002).

Para obtener el escenario de comparación en cualquier circunstancia será necesario decidir con anterioridad el grado de similitud a considerar, es decir, qué características se van a mantener iguales entre el edificio objeto y los edificios que van a constituir el escenario de comparación. A partir de ahora, en todos los procedimientos que se van a detallar en adelante, se va a considerar el grado de similitud propuesto por el la normativa europea prEN_15217, que como se

adelantó en el apartado anterior se basa en la comparación del edificio objeto con edificios del mismo sector y clima.

A continuación se procederá a explicar los pasos correspondientes a la metodología general para la obtención del escenario de comparación, conocida la estadística sobre consumos energéticos de viviendas unifamiliares del país.

Para ilustrar la explicación, se acompañará cada paso con un ejemplo de aplicación. Este ejemplo se ha basado en los datos de consumo de calefacción de viviendas unifamiliares y de los grados-día de invierno, en base 65°F, disponibles en la base de datos RECS del año 2001. Para los tratamientos estadísticos se ha empleado el programa estadístico STATISTICA 7.0. Si se desea conocer una descripción más detallada del contenido de la base de datos empleada, ver el Anexo B de la tesis.

A partir de estos valores procedentes de la base de datos RECS del año 2001 se representa en la Figura 4.3 la variación de los consumos de calefacción frente a los grados-día de calefacción. Se puede observar como no existe la misma densidad de datos en todos los climas, por lo que no se podrá generar un escenario de comparación fiable si se parte únicamente de la información disponible en cada clima. Esto obliga a desarrollar la metodología que se detalla a continuación.

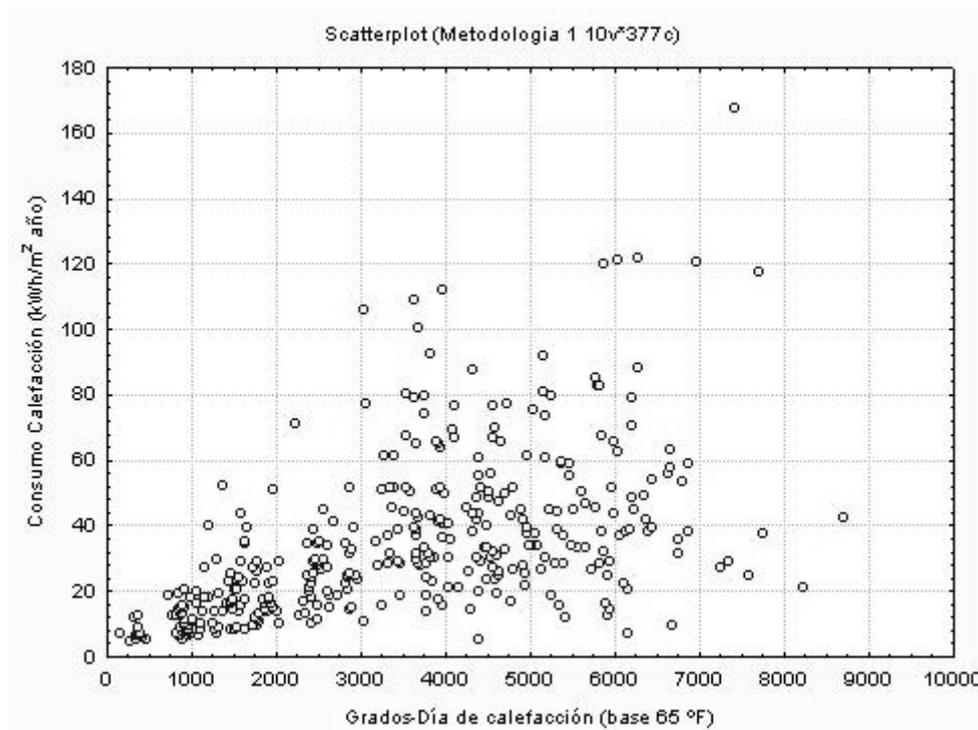


Figura 4.3: Representación de los consumos de calefacción frente a los grados-día de calefacción. Viviendas unifamiliares. EEUU.

4.3.1 Estimación de la variación del consumo frente al clima

Inicialmente se procederá a estudiar la dependencia entre el consumo energético en edificios del sector residencial y el clima. En este caso el clima se entiende como un conjunto de variables representativas de las condiciones meteorológicas, medidas durante un periodo de tiempo. Para lo cual habrá que distinguir entre los distintos usos de energía: calefacción, refrigeración, iluminación y agua caliente sanitaria, y estudiar la posible dependencia climática de cada una de estas variables.

Partiendo de los valores disponibles en la base de datos RECS del año 2001 (ver Anexo B), se va a evaluar el grado de dependencia estadística entre los consumos por usos y las únicas variables climáticas existentes en la fuente de información, los grados-día de calefacción y de refrigeración en base 65°F. Para ello se obtendrá el coeficiente de correlación de Pearson entre las variables de consumo, variables dependientes, y las variables climáticas disponibles, variables independientes. El resultado se muestra en la Tabla 4.2. Para su valoración se ha empleado la escala propuesta por Salkind (Salkind, N. 1999) que estima el grado de correlación entre las variables (Tabla 4.1).

Tabla 4.1: Resumen del análisis de la dependencia estadística entre variables de consumo y variables climáticas

<i>Variable dependiente Consumo (kWh/m²)</i>	<i>Variable independiente Grados-día (base 65°F)</i>	<i>Coefficiente de correlación</i>
Calefacción	GD calefacción	0.6182
Refrigeración	GD refrigeración	0.6874
ACS	GD calefacción	0.0963
ACS	GD refrigeración	-0.1130
Iluminación y electrodomésticos	GD calefacción	-0.0511
Iluminación y electrodomésticos	GD refrigeración	0.0061

Tabla 4.2: Escala propuesta para la interpretación del grado de dependencia estadística entre variables.

<i>Límites del coeficiente de correlación</i>	<i>Grado de dependencia estadística entre variables</i>
Entre 0.0 y 0.2	Muy débil
Entre 0.2 y 0.4	Débil
Entre 0.4 y 0.6	Moderado
Entre 0.6 y 0.8	Fuerte
Entre 0.8 y 1.0	Muy fuerte

En primer lugar, se observa una dependencia fuerte entre los consumos de calefacción y de refrigeración y los grados-día de calefacción y de refrigeración respectivamente. Esto era de esperar, dada la causalidad existente entre ambas variables. Se podría estudiar la dependencia de otras variables climáticas, como por ejemplo la radiación solar con el consumo de refrigeración. Siempre que se disponga de los datos climáticos correspondientes al periodo de consumo evaluado.

En segundo lugar se demuestra que el resto de usos energéticos, agua caliente sanitaria e iluminación, se pueden considerar independientes de las variables climáticas propuestas.

Una vez evaluado el grado de dependencia climática que poseen los diversos usos energéticos: calefacción, refrigeración, agua caliente sanitaria e iluminación, se realizará un análisis de regresión a partir de los datos disponibles. La correlación que resulte de este análisis deberá representar la variación del consumo frente a las variables climáticas adecuadas. Al valor del consumo obtenido a través de la correlación se le llamará de ahora en adelante *consumo de referencia*.

Hay que advertir que el análisis de regresión no pretende buscar un modelo predictivo del consumo, en cuyo caso habría que considerar las múltiples variables que afectan al consumo y que pueden influir significativamente en el modelo final. El objetivo de este análisis es emplear el *consumo de referencia* para corregir el consumo real, y generar una nueva variable, *consumo normalizado*, que sea independiente del clima.

En el caso del consumo energético para agua caliente sanitaria e iluminación, no existe una dependencia climática, por lo que no será necesario obtener la correlación. En estos casos el *consumo de referencia* tendrá un valor único, invariante frente al clima, que se corresponderá con el valor medio.

Se comprobará posteriormente, que el *consumo de referencia* jugará un doble papel durante el proceso de obtención del escenario de comparación. En primer lugar se usará para la normalización de los consumos procedentes de la base de datos y en segundo lugar servirá como valor de referencia para la obtención del escenario de comparación en cada clima.

Ejemplo 1.1. Estimación del consumo de calefacción

Mediante un análisis de regresión se obtiene la correlación que genera el *consumo de referencia* a partir de la siguiente ecuación:

$$C_{CALEF}^{Estimado} = 9.3227 + 0.0072 \cdot GD \quad [4.1]$$

Donde:

$C_{CALEF}^{Estimado}$ es el *consumo de referencia* de calefacción

GD son los grados-día de calefacción en base 65 °F

En la siguiente figura se ha representado el consumo de calefacción frente a los grados-día de calefacción y la correlación generada a partir de estos datos.

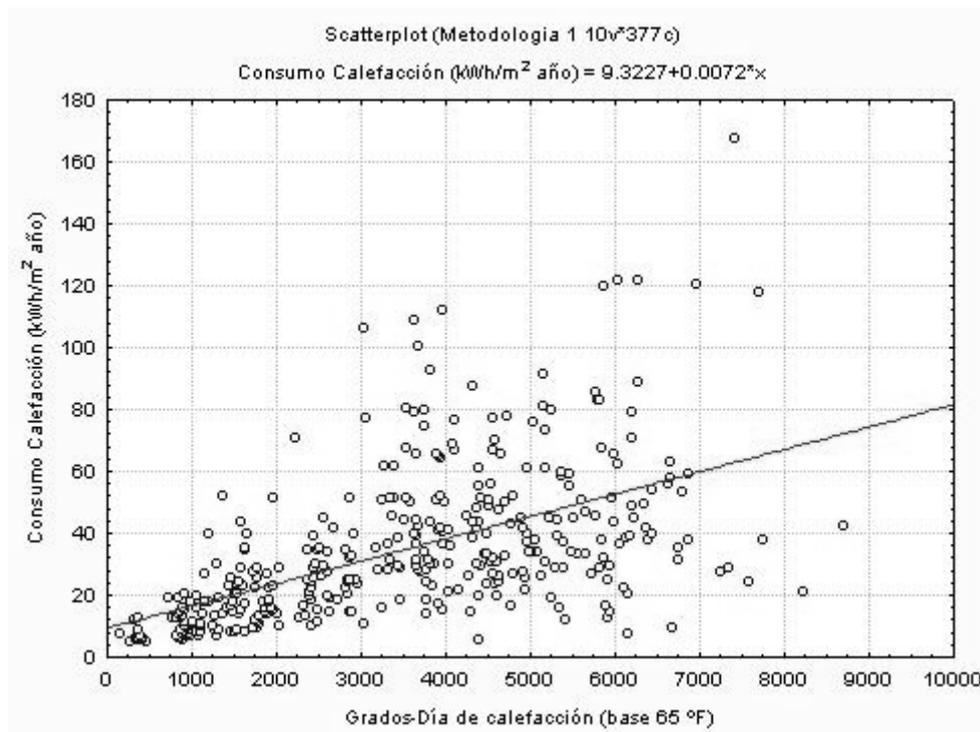


Figura 4.4: Consumo de calefacción frente a grados-día de invierno. Viviendas unifamiliares. EEUU.

4.3.2 Obtención de la distribución de consumos normalizados

A continuación se procederá a corregir el *consumo actual* de cada caso dividiéndolo por el *consumo de referencia* correspondiente a su clima. Con este paso se obtienen los *consumos normalizados* de todos los casos procedentes de la base de datos.

Mediante el proceso de normalización se genera una nueva muestra, con los valores correspondientes a los *consumos normalizados*. Esta nueva variable se muestra independiente del clima, y no presenta una variación significativa de su dispersión frente al clima, como se puede observar en el ejemplo de la Figura 4.5.

En esta figura aparecen representados los percentiles 90% y 10% junto con la mediana de la distribución, para diferentes rangos de grados-día.

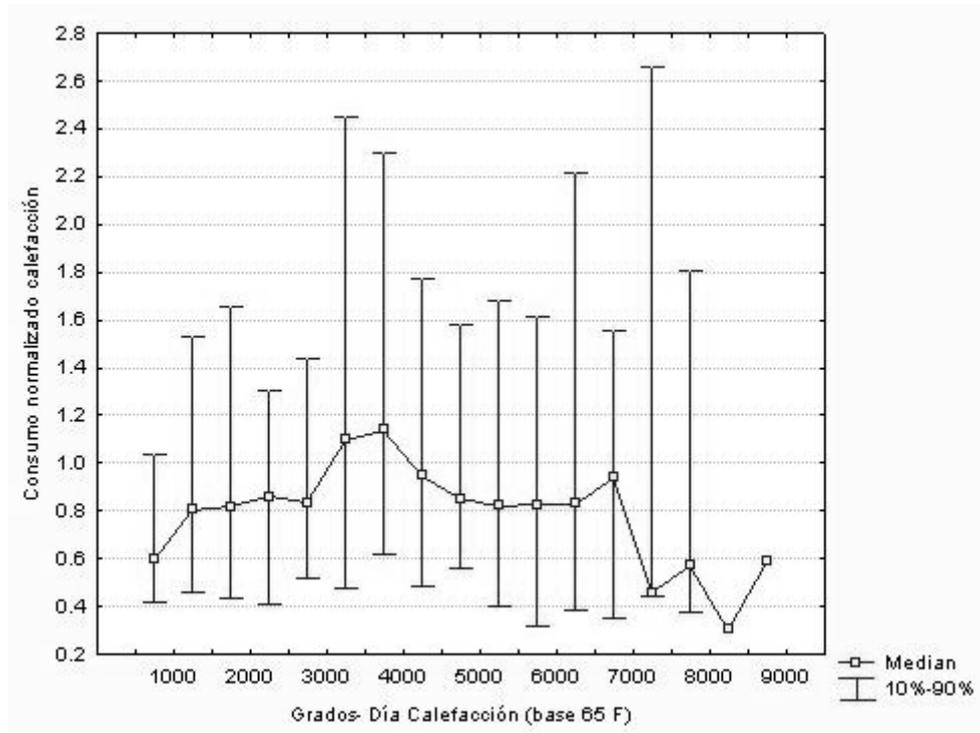


Figura 4.5: Variación de la dispersión de la muestra de consumos de calefacción normalizados frente al clima

Por todo ello, el conjunto de *consumos normalizados* obtenido se podrá tratar como una población única e independiente del clima. A partir de esta nueva muestra se podrá generar su distribución de frecuencias, tal y como se muestra en la Figura 4.7 (página 94) del ejemplo.

Bajo la hipótesis de que la distribución en frecuencias del *consumo normalizado* es invariante con el clima, se podría generar igualmente la distribución de frecuencias acumuladas del *consumo normalizado*, como se muestra en la Figura 4.8 (página 94) del ejemplo, que se considerará también invariante con el clima.

Asumir la hipótesis anterior equivale a decir que todos los edificios se distribuyen de igual forma alrededor del valor medio, independientemente del clima.

El cumplimiento de esta hipótesis se ha comprobado con valores procedentes tanto de la base de datos del Departamento de Energía de Estados Unidos, como de resultados obtenidos del estudio de impacto del CTE²³ (AICIA, 2003). Esta misma hipótesis es tomada por la herramienta desarrollada por la

²³ Código Técnico de la Edificación.

“Environmental Protection Agency” (EPA), EnergyStar (ver capítulo 2, página 48), para la certificación energética de edificios de oficinas en EE.UU. (Sharp, T., 1996).

Ejemplo 2.1. Distribución de consumos normalizados

En la Figura 4.6 se representan los consumos de calefacción normalizados frente a los grados-día de invierno, obtenidos tras el proceso de normalización climática.

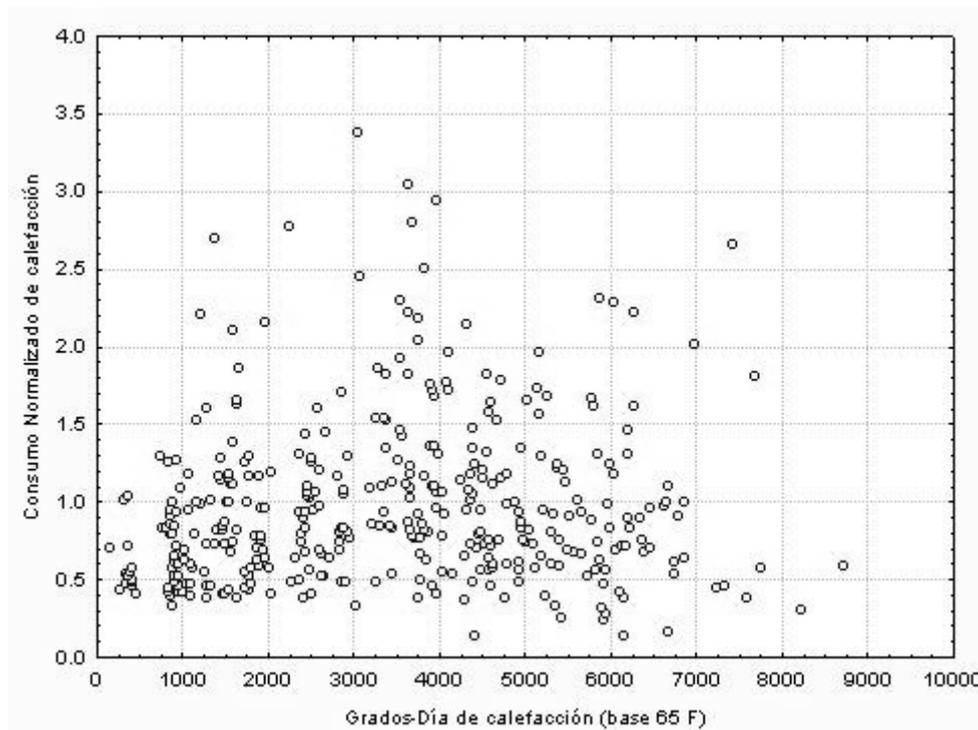


Figura 4.6: Consumos de calefacción de la base de datos normalizados

Dado que el coeficiente de correlación de Pearson entre el consumo normalizado y los grados-día de calefacción es de 0.101 (véanse criterios en la Tabla 4.2 de la página 88) se puede considerar este conjunto de datos como una muestra de valores independientes del clima.

Por ello, tanto la distribución de frecuencias absolutas representada en el histograma de la Figura 4.7, como la distribución de frecuencias acumuladas representada en la Figura 4.8, se pueden considerar invariantes con el clima.

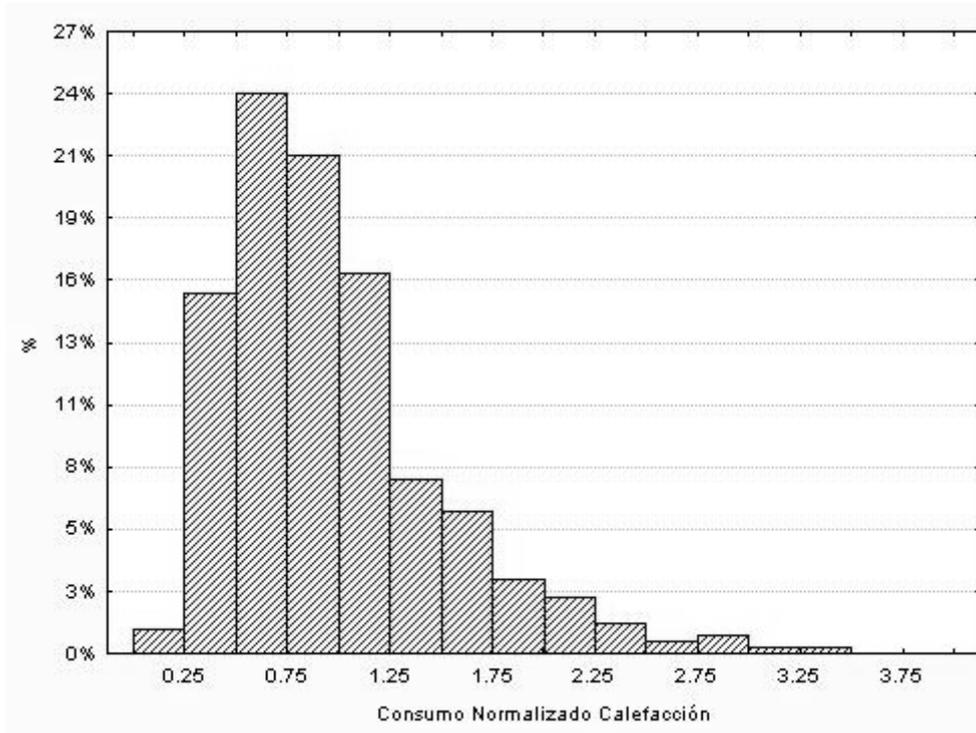


Figura 4.7: Distribución de frecuencias de consumos de calefacción normalizados

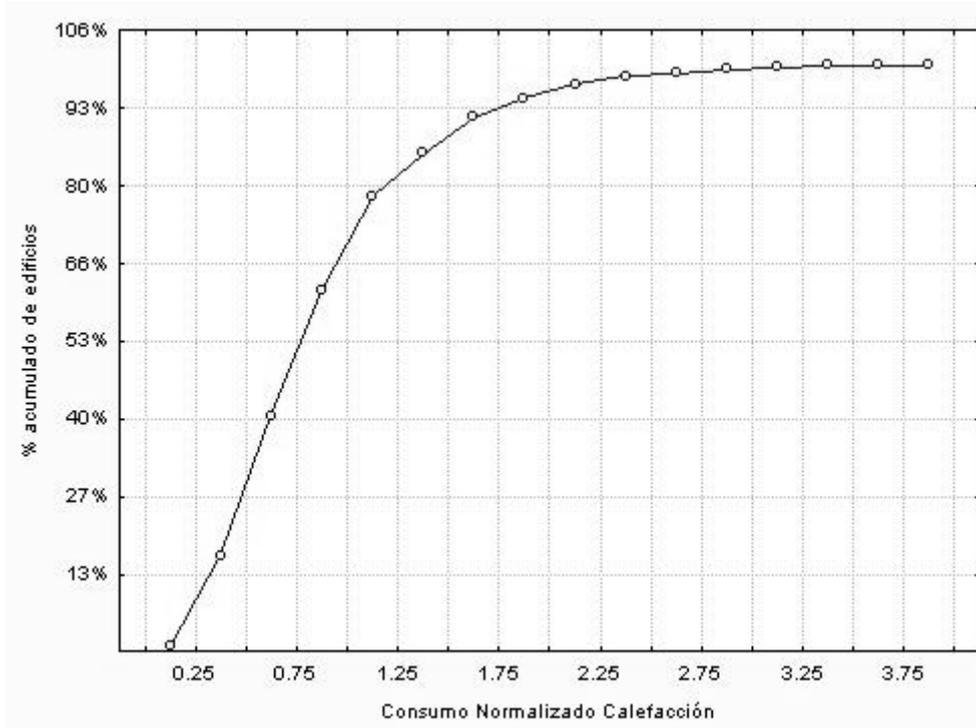


Figura 4.8: Distribución de frecuencias acumuladas del consumo normalizado

Esta distribución de frecuencias acumulada del consumo de calefacción normalizado constituye un primer *escenario de comparación* único e independiente del clima. Este se empleará posteriormente para generar el *escenario de comparación* correspondiente a cada clima, mediante el procedimiento explicado en el apartado siguiente.

4.3.3 Obtención del escenario de comparación para cada clima

El último paso de la metodología descrita consistirá en la obtención del escenario de comparación correspondiente a cada clima. Para ello se recurrirá a los consumos de referencia estimados a través de la correlación de partida.

Para determinar el escenario de comparación en un clima determinado se multiplicará el *consumo de referencia* para ese clima por la curva de consumos normalizados. De esta forma se genera una distribución de consumos en cada clima.

Esta distribución final de consumos constituye el escenario de comparación donde situar el consumo correspondiente al edificio a evaluar, denominado también *edificio objeto*. Su posición dentro de la población va a indicar cual es el porcentaje de edificios, de su mismo sector y clima, que consumen por encima o por debajo de él. Esta información permitirá puntuar o calificar energéticamente el edificio de una manera adecuada, una vez se hayan fijado determinados criterios de calificación o, lo que es lo mismo, una vez se haya establecido la escala de puntuación. En definitiva, se pretende establecer una referencia que permita fijar objetivos de eficiencia energética y evaluar los progresos realizados.

Esta metodología ha permitido obtener un escenario de comparación variable con el año meteorológico, sin necesidad de tener una muestra significativa de datos en cada clima. De hecho, si inicialmente se tenía para cada clima una población escasa, de la que no se podía obtener un escenario de comparación adecuado (ver Figura 4.4 de la página 91), tras aplicar la metodología descrita se logra obtener una distribución de frecuencias de consumos para cada uso y clima, tal y como se representa en la Figura 4.9 (página 96).

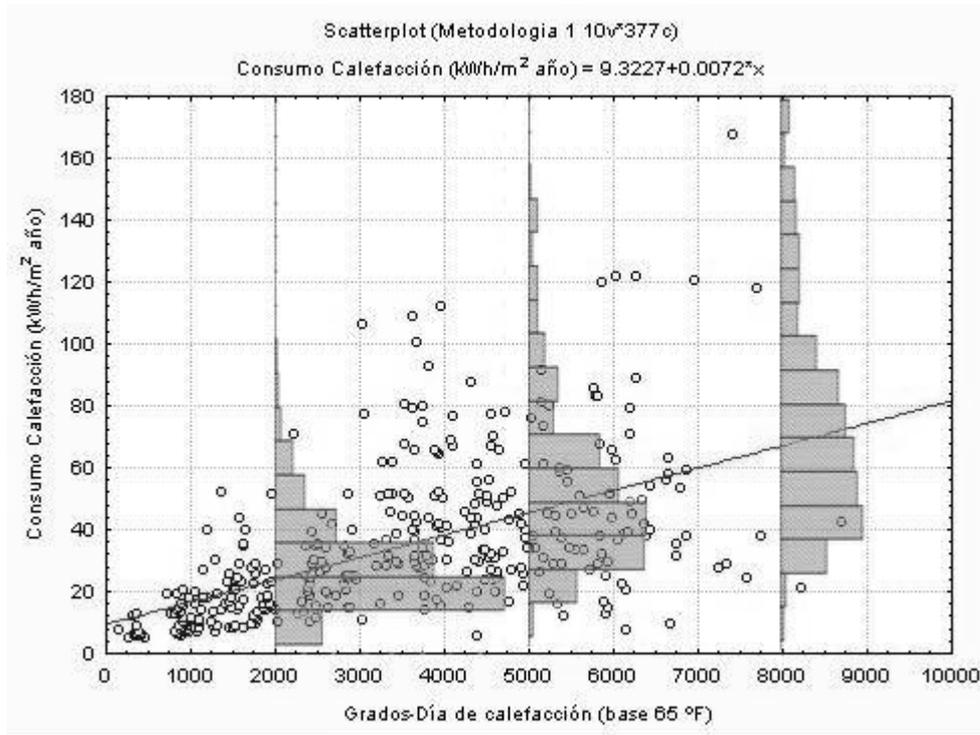


Figura 4.9: Distribución de frecuencias de consumos de calefacción obtenidas para cada clima

En resumen, de los consumos procedentes de la base de datos se han obtenido los siguientes resultados:

1. Una correlación que estima los consumos de referencia para cada uso en función del clima:

$$C_{CALE}^{Ref}; C_{REF}^{Ref}; C_{ACS}^{Ref}; C_{ILUM}^{Ref} \quad [4.2]$$

2. Una distribución de frecuencias del consumo normalizado para cada uso, considerado invariante con el clima:

$$C_{CALE}^*; C_{REF}^*; C_{ACS}^*; C_{ILUM}^* \quad [4.3]$$

3. Una distribución de frecuencias del consumo para cada uso, que se podrá emplear como escenario de comparación:

$$\begin{aligned} C_{CALE} &= C_{CALE}^* \cdot C_{CALE}^{Ref} \\ C_{REF} &= C_{REF}^* \cdot C_{REF}^{Ref} \\ C_{ACS} &= C_{ACS}^* \cdot C_{ACS}^{Ref} \\ C_{ILUM} &= C_{ILUM}^* \cdot C_{ILUM}^{Ref} \end{aligned} \quad [4.4]$$

A continuación será necesario proceder a la agregación de los términos anteriores para obtener un escenario de comparación que permita evaluar el consumo total.

Mediante la suma de los *consumos de referencia* para cada uso se hallará el *consumo total de referencia*:

$$C_{TOTAL}^{Ref} = C_{CALE.}^{Ref} + C_{REF.}^{Ref} + C_{ACS.}^{Ref} + C_{ILUM.}^{Ref} \quad [4.5]$$

Y la distribución de frecuencias del consumo total normalizado se podrá obtener a partir de la siguiente expresión:

$$C_{TOTAL}^* = C_{CALEF.}^* \cdot \frac{C_{CALEF.}^{Ref}}{C_{TOTAL}^{Estimado}} + C_{REF.}^* \cdot \frac{C_{REF.}^{Ref}}{C_{TOTAL}^{Estimado}} + C_{ACS.}^* \cdot \frac{C_{ACS.}^{Ref}}{C_{TOTAL}^{Estimado}} + C_{ILUM.}^* \cdot \frac{C_{ILUM.}^{Ref}}{C_{TOTAL}^{Estimado}} \quad [4.6]$$

Finalmente, la distribución de frecuencias del consumo total para un clima concreto se obtendrá multiplicando el término anterior (distribución de frecuencias del consumo total normalizado) por el *consumo total de referencia* para ese clima:

$$C_{TOTAL} = C_{TOTAL}^* \cdot C_{TOTAL}^{Ref} \quad [4.7]$$

Ejemplo 3.1. Obtención del escenario de comparación para calefacción en un clima determinado

Partiendo de la distribución de frecuencias acumuladas del consumo de calefacción normalizado obtenida en el apartado anterior, ver Figura 4.8 en la página 94. Y calculando el *consumo de referencia* para a un clima, cuyos grados-día de calefacción son aproximadamente 1500, a través de la ecuación [4.8], se obtiene la distribución de frecuencias acumuladas del consumo de calefacción, tal y como se representa en la Figura 4.10.

$$C_{CALEF}^{Estimado} = 9.3227 + 0.0072 \cdot 1500 = 20.12 \quad [4.8]$$

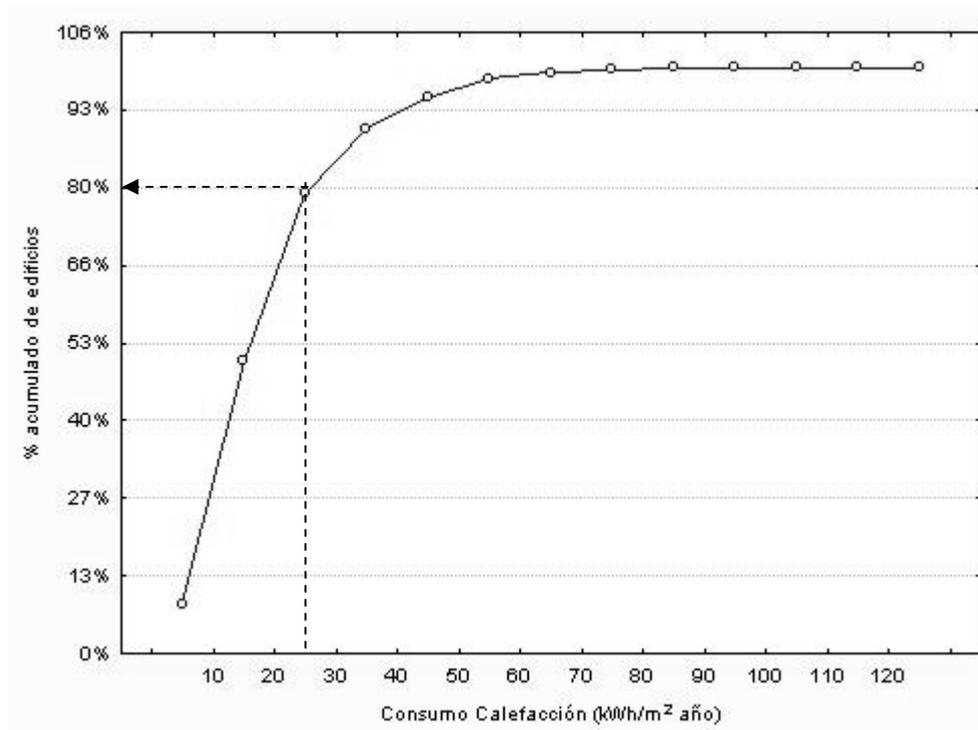


Figura 4.10: Distribución de frecuencias acumuladas de consumos de calefacción para un clima determinado (GD = 1500)

Finalmente, esta distribución constituiría el escenario de comparación para evaluar el consumo de calefacción de las viviendas unifamiliares localizadas en el mismo clima.

Por ejemplo, se podría evaluar una vivienda unifamiliar cuyo consumo de calefacción fuera 26.7 kWh/m² año. Tras localizar este consumo en la curva de frecuencias de la Figura 4.10, se observa que se corresponde con el percentil del 80%. Esto significaría que, comparando el consumo de calefacción de esta vivienda con otras situadas en el mismo clima, el 80% de estas consumen por debajo de ella, o lo que es lo mismo, el 20% de las viviendas son peores, consumen más, que la vivienda evaluada.

4.3.4 Influencia del grado de similitud en el escenario de comparación

A continuación se mostrará un ejemplo en el que se pone de manifiesto la influencia del grado de similitud en el escenario de comparación y, consecuentemente, en la evaluación final del edificio.

En el ejemplo se pretende evaluar el comportamiento energético de una vivienda unifamiliar situada en con un consumo total 116.6 kWh/m².

En primer lugar se representan las distintas distribuciones correspondientes a los consumos energéticos para los distintos usos: calefacción, refrigeración, agua caliente sanitaria e iluminación. Estas distribuciones se encuentran representadas en la Figura 4.11, y han sido obtenidas directamente de la base de datos, filtrando previamente los valores correspondientes a viviendas unifamiliares.

Para un grado de similitud de nivel A (ver página 83), en el que se comparan edificios del mismo tipo, estas distribuciones constituirían el escenario de comparación requerido, dado que no se exige la discriminación climática.

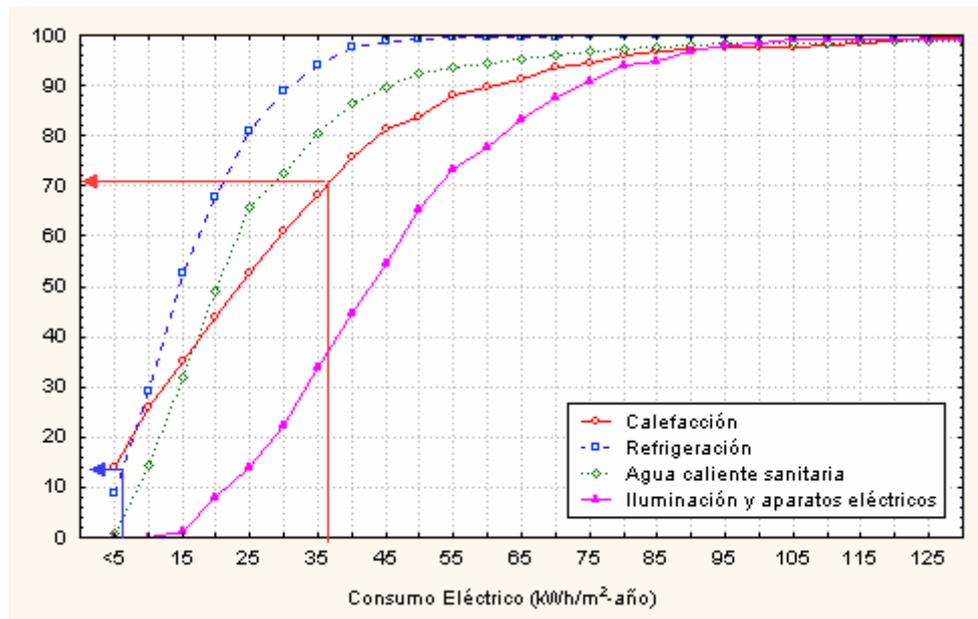


Figura 4.11: Distribución de frecuencias acumuladas de los consumos energéticos por usos. Viviendas unifamiliares. EE.UU.

La inspección de estas curvas puede aportar una información muy útil acerca de la forma, variación y límites de los diferentes usos de energía.

Como ejemplo de las diferencias que pueden apreciarse entre los distintos usos de energía, se representa en la Tabla 4.3 las relaciones entre el percentil 90% y el percentil 10% de cada uso energético representado.

Se puede apreciar como el margen de variación de consumos es mayor en el caso de calefacción, siendo los otros tres del mismo orden de magnitud.

Tabla 4.3: Variación del ratio 90/10% frente al tipo de uso.

Uso final	Calefacción	Refrigeración	Iluminación (y otros)	Agua Caliente Sanitaria	Total
Ratio 90%/10%	13.71	5.81	3.44	5.12	3

En la Figura 4.12 se ha situado el consumo total del edificio a calificar, o edificio objeto, descrito anteriormente (vivienda unifamiliar con consumo de 116.6 kWh/m²). De esta comparación se puede concluir que su consumo se encuentra entre el percentil del 50% y el percentil del 60%, concretamente se corresponde con el percentil 56% de la población de viviendas unifamiliares. Esto significa que un 56% de las viviendas unifamiliares de EE.UU. consumen por debajo del edificio objeto, menos de 116.6 kWh/m².

El sistema de evaluación más intuitivo sería aquel que aumentase a medida que el edificio mejora, disminuyendo su consumo. Por ello se podría proponer que la puntuación de un edificio fuese igual a cien menos el porcentaje de edificios que consumen por debajo de él. De esa forma la calificación del edificio ejemplo sería de $100-56 = 44$ puntos

De esta forma a medida que el porcentaje de edificios que consumen por debajo de él disminuyese, su puntuación aumentaría, sería un edificio con una mejor puntuación.

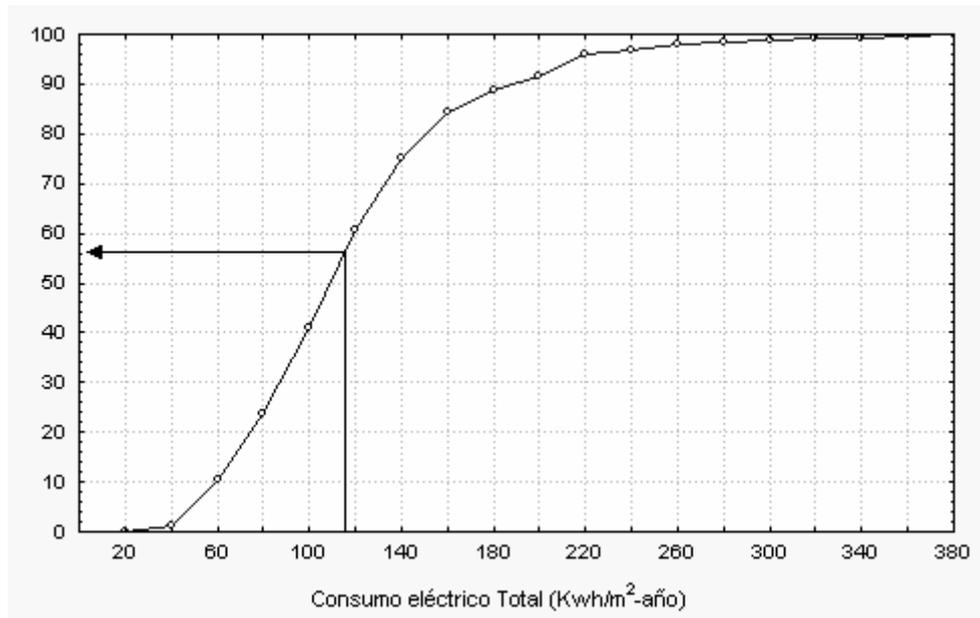


Figura 4.12: Distribución de frecuencias acumuladas del consumo eléctrico total. Viviendas unifamiliares. EE.UU.

Pero la dependencia climática del consumo en edificios residenciales varía en función del uso energético. Tal y como se demostró en el apartado 4.3.1 (página 89), es muy elevada para el caso de calefacción y refrigeración, media para iluminación, muy baja para agua caliente sanitaria y prácticamente nula para aparatos eléctricos.

La propuesta en este sentido será aplicar una normalización específica para cada tipo de uso, en lugar de una única para el consumo total.

La clásica normalización suele basarse en variables climáticas como los grados-día de invierno (para calefacción) y los grados-día de verano (para refrigeración). Es la que se empleará en el ejemplo desarrollado, dado que son las únicas variables climáticas disponibles en las bases de datos. Esta se puede expresar como una correlación lineal, semejante a la empleada en el ejemplo 1.1 de la página 90.

Cada valor medido es normalizado dividiendo por el resultado de aplicar la correlación en el clima que le corresponda.

Como resultado tras aplicar el procedimiento se obtienen cuatro escenarios de comparación, uno para cada uso energético a evaluar: calefacción, refrigeración, iluminación y agua caliente sanitaria. Estos se pueden ver representados en la Figura 4.13, a través de las distribuciones de frecuencias acumuladas. También se puede obtener la distribución de frecuencias acumuladas correspondientes al consumo total, suma de los cuatro anteriores, constituyendo el nuevo escenario de comparación con grado de similitud B (mismo tipo y mismo clima).

A continuación, para proceder a calificar el edificio objeto, sólo habrá que aplicar la correlación en el clima específico correspondiente al edificio, y multiplicar el resultado por la distribución normalizada. De esta forma se obtiene el nuevo escenario de comparación, tanto para consumos por usos (Figura 4.13), como para consumos totales (Figura 4.14), teniendo en cuenta que el edificio objeto del ejemplo se encuentra localizado en un clima cuyas variables climáticas serán 5843 grados-día de calefacción y 806 grados-día de refrigeración.

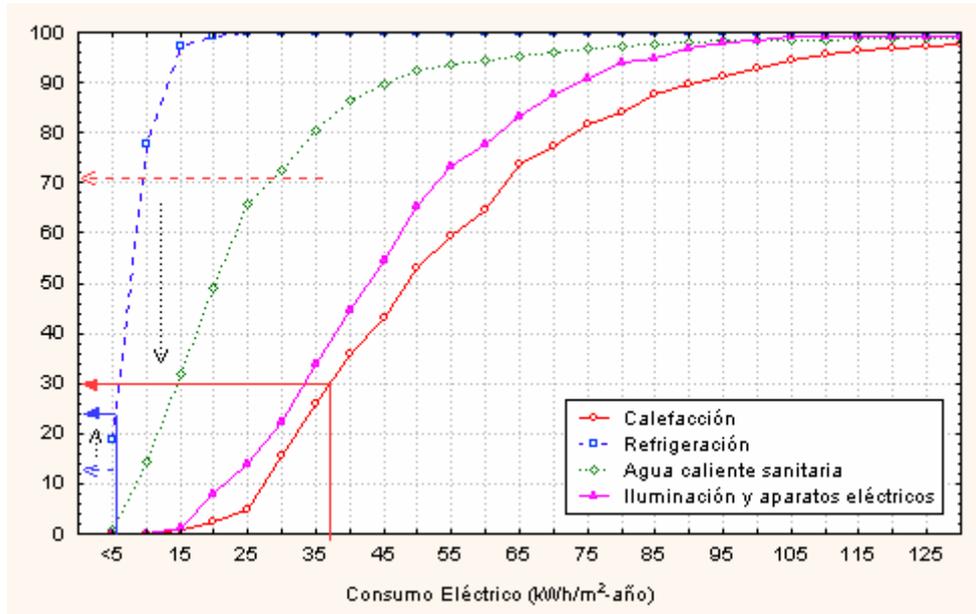


Figura 4.13: Distribución de frecuencias acumuladas de los consumos energéticos por usos con la discriminación climática. Viviendas unifamiliares. EE.UU.

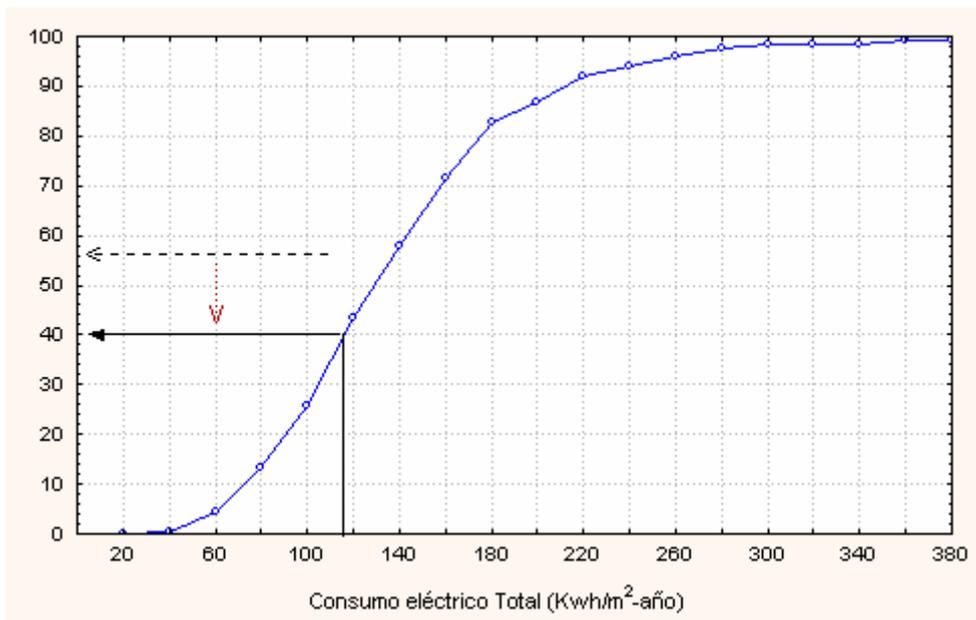


Figura 4.14: Nuevo escenario de comparación. Distribución de frecuencias acumuladas del consumo eléctrico total con la discriminación climática. Viviendas unifamiliares. EE.UU.

En este nuevo escenario el edificio se corresponde con el percentil del 40%, lo que significaría que el 40% de las viviendas unifamiliares situadas en un clima similar consumirían por debajo del edificio ejemplo. La puntuación en este caso sería de 60 puntos (mayor que si se compara con la población total de viviendas unifamiliares).

Los percentiles asociados a los diferentes usos de energía (ver Figura 4.13), salvo en el caso de agua caliente sanitaria, iluminación y aparatos eléctricos,

también han variado al llevar a cabo la discriminación climática. Las diferencias se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 4.4: Variación de la evaluación de vivienda unifamiliar con el grado de similitud

	Consumo (kWh/m ² -año)	Grado de similitud A	Grado de similitud B
Calefacción	37.9	71%	32%
Refrigeración	5.5	10%	24%
Iluminación y aparatos eléctricos	49.7	63%	=
Agua caliente sanitaria	23.4	61%	=
Total	116.6	56%	40%

Se pueden alcanzar mayores grados de similitud entre los edificios y escenario de comparación, bastaría proceder a neutralizar las variables deseadas mediante la obtención de una correlación multivariable. Esta podría incluir la compacidad y variables ligadas a la operación como horas semanales de funcionamiento para cada tipo de espacio.

En resumen, de los análisis anteriores se podría deducir lo siguiente:

- Para grados de similitud A, el escenario de comparación puede obtenerse fácilmente mediante análisis estadísticos de los resultados de campañas de recogida de datos.
- Para llegar al nivel B y C, se puede usar datos de campañas de recogida de datos, pero normalizados con el clima y la compacidad.
- Para mayores niveles, los datos estadísticos podrían no ser factibles, ya que el tamaño de la muestra necesario sería demasiado grande. En estos casos (niveles D, E y F) los métodos descriptivos basados en edificio de referencia son claramente los más apropiados, tal y como se explicará en el apartado 4.3.5, en la página 104.

Ejemplo 4.1. Influencia del grado de similitud sobre el escenario de comparación.

En el ejemplo que se presenta a continuación se demuestra cómo, a medida que se aumenta el grado de similitud, varía la forma de la distribución. Concretamente se ha observado que a medida que el grado de similitud se hace mayor, los extremos de la curva normalizada de aproximan.

Esto puede apreciarse en la Figura 4.15, donde aparecen representadas la curva normalizada de calefacción obtenida de tres formas distintas:

- Para todos los edificios residenciales
- Sólo para los edificios unifamiliares
- Para los edificios unifamiliares en un determinado clima

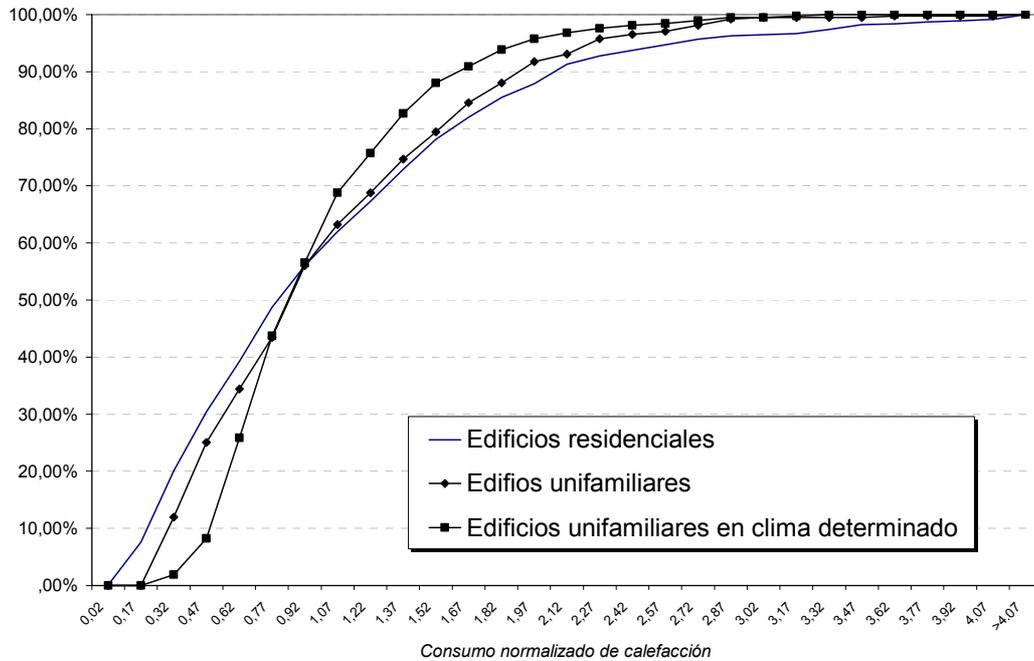


Figura 4.15: Variación de las curvas normalizadas con el grado de similitud

Como ejemplo de las diferencias que pueden apreciarse entre los distintos grados de similitud se representa, en la Tabla 4.5, las relaciones entre el percentil 90% y el percentil 10% de cada uno de los casos estudiados.

Tabla 4.5: Variación de la relación entre el percentil 90% y 10% frente al grado de similitud.

Situación	1	2	3
Ratio	15.34	13.71	3.03

En este caso se puede apreciar como el margen de variación de consumos normalizados es menor a medida que el grado de similitud aumenta. Dicho de otra manera, el rango de variación se estrecha al aumentar el grado de similitud.

4.3.5 Obtención de escenario de comparación con grado de similitud alto

Ha sido demostrado que existe una modificación lógica de las curvas normalizadas a medida que el grado de similitud aumenta. Este hecho puede

usarse para obtener nuevas curvas normalizadas extrapolando las tendencias a partir de aquellas con un menor grado de similitud.

Como consecuencia, es posible conseguir un escenario de comparación para el edificio objeto a partir de las curvas normalizadas y los valores correspondientes a un hipotético edificio de referencia.

La similitud entre el edificio de referencia y el edificio objeto es normalmente muy alta (niveles D, E y F), y ambos están emplazados en el mismo clima y tienen las mismas condiciones de operación. Las diferencias entre ambos suelen referirse a conceptos como la calidad de los elementos constructivos, la orientación, los sistemas de climatización o la eficiencia de los equipos. Por ejemplo, para el "National Home Energy Rating" de EE.UU., ver página 44 del capítulo 2, la vivienda de referencia se obtiene a partir del edificio objeto cambiando las características de 21 conceptos.

En muchos casos los valores asignados a la vivienda de referencia dependen del clima de forma discreta, por ejemplo por rangos de grados-día.

Si el edificio de referencia representa un edificio típico medio, el escenario de comparación para un cierto edificio objeto se obtiene fácilmente mediante una versión modificada (el concepto es equivalente) de la formulación explicada en el apartado 4.3.3 de la metodología.

No obstante, el edificio de referencia podría ser el edificio óptimo o el mínimo aceptable cumpliendo la legislación. En este caso la formulación anterior se adaptaría fácilmente indicando el percentil de la población de edificios previsto para ser representado por este edificio. Por ejemplo el edificio óptimo podría ser aquel que ocupara el percentil del 10% del consumo energético.

4.4 Inexistencia de estadística sobre consumos de edificios

En algunos países, como España, no existen campañas de recogida de datos disponibles y no es factible llevarlas a cabo en un futuro próximo, por lo que se carece de una estadística representativa del consumo energético de los edificios. En estos casos no es posible la aplicación de la metodología descrita en el apartado anterior para establecer el escenario de comparación.

La obtención del escenario de comparación en estas circunstancias requiere el desarrollo de una metodología alternativa. En la presente tesis se propone, por un lado, suponer que la distribución de consumos normalizados procedente de otros

países es aplicable para España y, por otro lado, el empleo de leyes teóricas que representen la variación de los consumos en función del clima.

De esta forma se llevará a cabo un procedimiento para generar el escenario de comparación en cada clima, similar al expuesto en el apartado anterior, empleando una distribución de consumos normalizados, que se muestra invariante con el clima, y sustituyendo las correlaciones que representan la variación del consumo frente al clima, obtenidas a partir de los datos reales de consumos, por leyes teóricas de variación, obtenidas a partir de simulación. Estas leyes, que se denominarán *leyes de variación del consumo*, proporcionarán los valores de referencia necesarios para generar un escenario de comparación para cada clima.

La distribución de consumos normalizados se obtendrá asignando un modelo de probabilidad al conjunto de datos procedentes de otros países, de forma que el modelo elegido pueda interpretarse como la población de la que proceden esos datos. A esta búsqueda de un modelo de probabilidad a partir de una muestra de datos se le denomina *ajuste de una distribución* (ver capítulo 5, página 117).

Pero a pesar de que la divergencia climática se logre eliminar mediante la normalización de los consumos, es posible que se cuestione la idoneidad de esta extrapolación. La causa fundamental es que pueden existir diferencias significativas entre las características constructivas y operacionales empleadas en distintos países. Por ello es importante resaltar que este modelo de distribución deberá ser empleado únicamente en el caso de no disponer de estadística suficiente como para generar un escenario de comparación propio. Este es el caso de España en la actualidad. Pero hay que tener en cuenta que, dado que se trata de una extrapolación, será necesario constatar, en cuanto se disponga de una muestra significativa de datos de consumos, que el modelo de distribución empleado se ajusta de manera satisfactoria a los datos disponibles para España. Esto significa que sólo la experiencia futura determinará la verdadera validez del modelo de distribución seleccionado.

4.4.1 Ajuste de la distribución de consumos normalizados

Este procedimiento persigue asignar un modelo de probabilidad a una muestra de datos de consumos reales de edificios existentes, de forma que el modelo elegido pueda interpretarse como la población de la que proceden esos datos.

En la Figura 4.16 se muestra un ejemplo en el que se ha ajustado un modelo de distribución tipo Weibull, representado por la curva de la figura, a una muestra de datos sobre consumos de calefacción normalizados, representado por el histograma de frecuencias acumuladas de la figura.

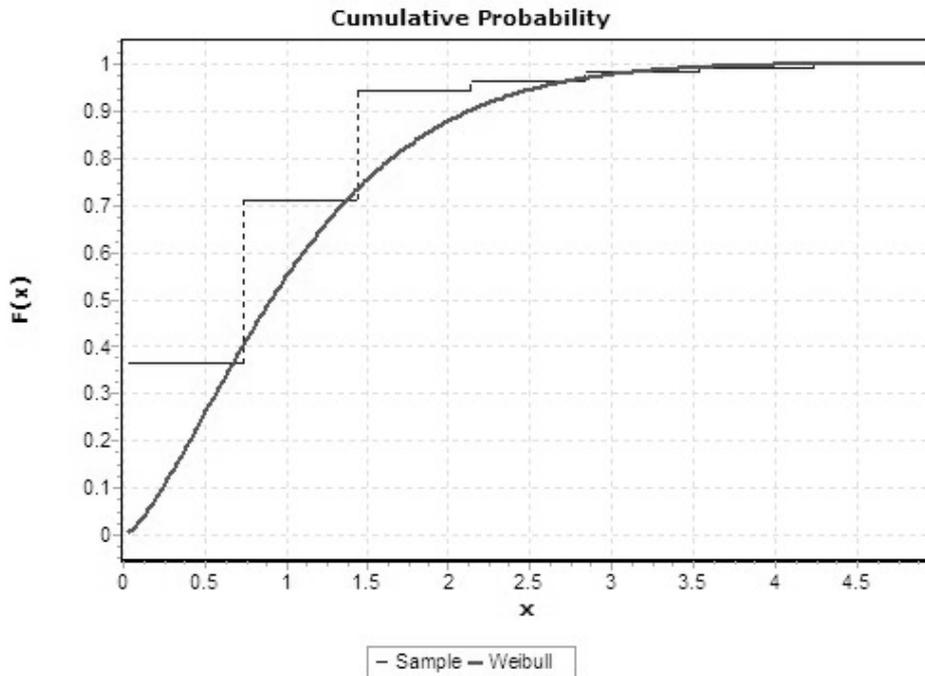


Figura 4.16: Ejemplo del ajuste de una curva de distribución tipo Weibull a la muestra de datos de consumos normalizados de calefacción.

En el capítulo 5 de la tesis (página 117) se explica el procedimiento desarrollado para el ajuste de una distribución a partir de datos de consumos procedentes del Departamento de Energía de Estados Unidos. Concretamente se ha empleado la base de datos RECS, sobre consumos de edificios residenciales del año 2001, descrita en profundidad en el Anexo B.

Además de buscar la distribución que mejor se ajusta a los datos de consumos disponibles, en el apartado 5.4 (página 126) se describe el procedimiento para la obtención de la distribución de consumos a partir de una serie de parámetros característicos.

En primer lugar se utilizarán dos parámetros de forma para establecer la forma definitiva de la distribución de consumos normalizados. Esto permitirá modificar el escenario de comparación a medida que se tengan más datos acerca del consumo de edificios en España, adaptándola a posibles variaciones del comportamiento de los consumos en edificación con respecto a las hipótesis de partida.

En segundo lugar se empleará un valor de referencia, obtenido a partir de las leyes de variación del consumo, que permita la transformación de la distribución de consumos normalizados a la distribución de consumos que se empleará finalmente como escenario de comparación.

4.4.2 Obtención de leyes de variación del consumo

Al no disponer de datos sobre consumos de edificios existentes, los valores para de referencia pueden obtenerse de simulaciones basadas en análisis de sensibilidad, usando morfologías típicas de edificios con elementos constructivos y sistemas de climatización tomados de la práctica del país y de las normas.

Otra opción sería fijar valores de referencia siguiendo criterios de política energética.

En ambos casos estos valores pueden modelarse, por ejemplo, como una función del clima y de la compacidad del edificio, mediante correlaciones o leyes de variación del consumo. Dependiendo del grado de similitud requerido.

En definitiva, el objetivo de estas leyes sería el de obtener los valores de referencia que permitan generar la distribución de consumos a partir de la distribución estadística normalizada.

A modo de ejemplo, para la calificación energética española para viviendas de protección oficial (IDAE, 1999), se desarrolla un procedimiento de correlación que genera valores de referencia. Estos valores se corresponden con el edificio mínimo aceptable desde el punto de vista del consumo energético.

Los valores de referencia se obtienen basándose en 13 morfologías de edificios residenciales, 7 correspondientes a viviendas unifamiliares y 6 a bloques de apartamentos. Las características constructivas de cada edificio y sus sistemas se han obtenido mediante un cuestionario sobre las prácticas en 8 localidades distribuidas entre las diferentes zonas climáticas de España. Cada edificio en cada localidad se ha supuesto orientado en las cuatro orientaciones principales y se han usado diferentes combinaciones resultantes del análisis estadístico, por esto es posible obtener el peor valor de consumo energético que cumpla los reglamentos térmicos.

Para calefacción los valores de referencia presentan la forma que se muestra en la Figura 4.17 y dependen del clima y de la compacidad del edificio objeto.

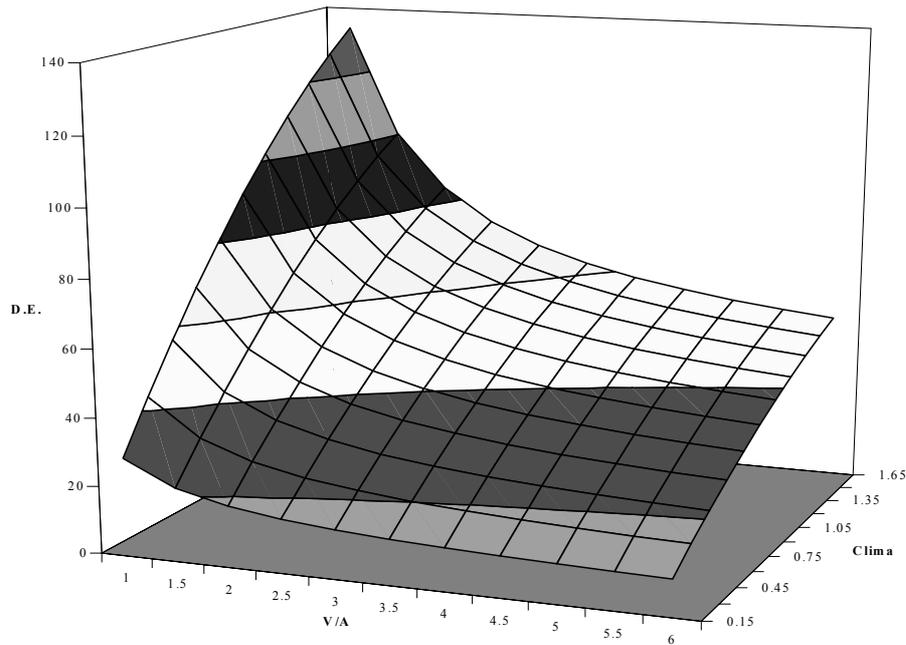


Figura 4.17: Valores de referencia, en términos de demanda (kWh/m^2), para el valor mínimo aceptable en la calificación energética de viviendas de protección oficial en España (CEV).

Estos valores de referencia pueden ser usados de forma equivalente a la correlación que generaba el consumo de referencia obtenida en el apartado anterior, caso en el que se disponía de estadística suficiente sobre consumo de edificios.

Es muy importante, en este sentido, el conocimiento de la evolución de las distintas variables meteorológicas a lo largo de los años, lo que permitirá obtener de una manera adecuada el escenario de comparación para cada edificio, en función del periodo de consumo a evaluar y de las características climáticas que se hayan dado durante el mismo. Hay que tener en cuenta que pueden existir variaciones climáticas entre períodos, y no siempre son las mismas

4.4.3 Obtención del escenario de comparación

El esquema a seguir para la obtención del escenario de comparación, en caso de no disponer de estadística sobre consumos energéticos de edificios, es similar a la expuesta en el apartado 4.3 (página 86) y consta de los siguientes pasos:

1. Obtención de las leyes de variación del consumo, según se explica en el apartado 4.4.2:

$C_{CALE}^{Ref}; C_{REF}^{Ref}; C_{ACS}^{Ref}; C_{ILUM}^{Ref}$	[4.9]
--	-------

2. Ajuste de las distribuciones de consumos normalizados para cada uso a partir del análisis de las distribuciones existentes en otros países, suponiéndolas aplicables para España:

$C_{CALE}^*; C_{REF}^*; C_{ACS}^*; C_{ILUM}^*$	[4.10]
--	--------

3. Una distribución de frecuencias del consumo para cada uso, que se podrá emplear como escenario de comparación:

$C_{CALE} = C_{CALE}^* \cdot C_{CALE}^{Ref}$ $C_{REF} = C_{REF}^* \cdot C_{REF}^{Ref}$ $C_{ACS} = C_{ACS}^* \cdot C_{ACS}^{Ref}$ $C_{ILUM} = C_{ILUM}^* \cdot C_{ILUM}^{Ref}$	[4.11]
---	--------

A continuación será necesario proceder a la agregación de los términos anteriores para obtener un escenario de comparación que permita evaluar el consumo total.

Mediante la suma de los *consumos de referencia* para cada uso se hallará el *consumo total de referencia*:

$C_{TOTAL}^{Ref} = C_{CALE}^{Ref} + C_{REF}^{Ref} + C_{ACS}^{Ref} + C_{ILUM}^{Ref}$	[4.12]
---	--------

Y la distribución de frecuencias del consumo total normalizado se podrá obtener a partir de la siguiente expresión:

$C_{TOTAL}^* = C_{CALEF}^* \cdot \frac{C_{CALE}^{Ref}}{C_{TOTAL}^{Estimado}} + C_{REF}^* \cdot \frac{C_{REF}^{Ref}}{C_{TOTAL}^{Estimado}} + C_{ACS}^* \cdot \frac{C_{ACS}^{Ref}}{C_{TOTAL}^{Estimado}} + C_{ILUM}^* \cdot \frac{C_{ILUM}^{Ref}}{C_{TOTAL}^{Estimado}}$	[4.13]
--	--------

Finalmente, la distribución de frecuencias del consumo total para un clima concreto se obtendrá multiplicando el término anterior (distribución de frecuencias del consumo total normalizado) por el *consumo total de referencia* para ese clima:

$C_{TOTAL} = C_{TOTAL}^* \cdot C_{TOTAL}^{Ref}$	[4.14]
---	--------

4.5 Existencia de estadística reducida sobre consumos de edificios

El procedimiento descrito en el apartado anterior en el que se carece completamente de datos de consumos puede mejorarse significativamente si se dispone de una estadística, aunque sea reducida, sobre consumos de edificios en determinadas localidades. Este podría ser el caso de España en un futuro próximo, si se llevasen a cabo campañas de recogida de datos sobre consumos energéticos en las distintas comunidades autónomas.

Estos datos estadísticos servirían para la obtención de los escenarios de comparación y los consumos de referencia en determinadas localidades, pudiendo ser extrapolados a otras localidades a través de las leyes de variación del consumo. Además, si el procedimiento se repitiera en un número significativo de localidades, se podrían redefinir las leyes de variación a partir de los valores de referencia. De esta forma tanto la distribución de consumos normalizados como las leyes de variación del consumo estarían basadas en consumos reales obtenidos en localidades españolas.

A continuación se proponen los pasos a seguir para llevar a cabo una campaña de recogida de datos en una población.

4.5.1 Análisis del parque edificatorio y muestreo

Se llevará a cabo una caracterización del parque edificatorio existente para el sector residencial con el objetivo de disponer de una estadística previa sobre la estructura de la población de edificios existentes.

Este se podrá realizar mediante un filtrado de datos adecuado en el Censos de Población y Viviendas 2001, cuyos resultados detallados han sido publicados por el Instituto Nacional de Estadística, y se encuentra a disposición de los ciudadanos (INE, Febrero de 2004).

Tabla 4.6: Reparto de edificios de viviendas según el tipo, entre las provincias andaluzas²⁴

Tipo de edificio (desagregado)	TOTAL	Viviendas unifamiliares	Bloques de viviendas	Bloques de viviendas con locales
04-Almería	175279	54.4%	25.8%	19.4%
11-Cádiz	347014	33.8%	44.9%	20.9%
14-Córdoba	253583	41.2%	32.4%	25.9%
18-Granada	280716	48.0%	24.3%	26.9%

²⁴ Censo de Población y Viviendas 2001. INE

21-Huelva	150945	49.6%	32.3%	17.7%
23-Jaén	217407	52.8%	30.7%	16.3%
29-Málaga	434723	32.7%	33.8%	33.0%
41-Sevilla	555476	40.6%	38.6%	20.3%

Dado que se propone una metodología estratificada proporcional, se necesitará dividir la población en estratos o grupos. Se determinará el número de edificios existentes de cada grupo. También se analizarán las características de los mismos, como el tamaño, el número de plantas y el año de construcción; y el tipo de equipamiento que poseen, sistema de calefacción y de refrigeración y sistema de ACS. Un ejemplo de esta información se muestra en la Tabla 4.6, donde se representa el porcentaje de viviendas de tipo unifamiliar y bloques para cada provincia andaluza.

Metodología de muestreo propuesta

A continuación, y conocida la situación del parque edificatorio existente, se realizará un muestreo sobre el consumo energético de los edificios. La muestra deberá cumplir las siguientes condiciones:

- Homogeneidad: debe ser extraída de la misma población.
- Independencia: las observaciones no deben estar mutuamente condicionadas entre sí.
- Representatividad: la muestra debe ser el mejor reflejo posible del conjunto del cual proviene.

Para ello se propone un diseño de muestreo estratificado. Este procedimiento determina los estratos o grupos que conforman la población de estudio para seleccionar y extraer de ellos la muestra. Se entiende por estrato las unidades de análisis que difieren en las características que se van a analizar en una investigación. Una modalidad muy precisa en este tipo de muestreo es el procedimiento de muestreo estratificado proporcional, que permite seleccionar las unidades de análisis que integrarán la muestra en proporción exacta al tamaño que tiene el estrato en la población, es decir, el estrato se encuentra representado en la muestra en proporción exacta a su frecuencia en la población total (Ávila Baray, H.L, 2006). Los pasos a seguir para seleccionar una muestra proporcionalmente estratificada son los siguientes:

1. Definir la población de estudio.
2. Determinar el tamaño de muestra requerido.
3. Dividir la población en estratos o grupos.

4. Determinar la fracción total de muestreo por estrato dividiendo el tamaño del estrato entre el tamaño de la población de estudio.
5. Multiplicar la fracción total de muestreo por estrato por el tamaño de la muestra para obtener la cantidad de unidades de análisis de cada estrato que se integrarán a la unidad muestral.
6. Selección y extracción de la muestra aplicando el procedimiento de muestreo aleatorio simple.

Como ejemplo, las bases de datos RECS²⁵ 2001 y RECS²⁶ 1993 se diseñaron mediante un procedimiento de muestreo estratificado, dividiendo la población total en unidades primarias de muestreo, áreas metropolitanas que contienen una ciudad central con una población superior a los 50,000 habitantes. Cada unidad primaria de muestreo se divide, a su vez, en unidades secundarias de muestreo, consistentes en una o más manzanas de edificios, seleccionadas a partir del Censo de viviendas. Finalmente se escogen al azar de cada unidad secundaria de muestreo las direcciones finales que van a constituir la muestra.

Metodología de imputación de datos

Existen muchos métodos para tratar la reconstrucción de los datos faltantes en una muestra. Se propone combinar el método de fusión de datos "Hot deck" con el método deductivo, dependiendo del caso a tratar.

El método "Hot deck", es una técnica que reconstruye la muestra mediante una estimación estadística de los datos faltantes. Con esta técnica se sustituyen valores individuales extraídos de unidades observadas similares. Se basa en el reemplazo de la información faltante en el conjunto de los registros incompletos, denominados receptores, utilizando la información de los registros completos mas parecidos, denominados donantes. Será necesario determinar las reglas de similitud entre los registros receptores y los donantes.

El método deductivo consistirá en comprobar si la información disponible en el resto de campos del registro incompleto permite deducir el dato faltante del mismo. Por ejemplo, en una encuesta donde se haya respondido que no se posee sistema de aire acondicionado en la vivienda, se podrá deducir que el valor del consumo en refrigeración es cero.

²⁵ Residential Energy Consumption Survey. Energy Information Administration (EIA). DOE. <http://www.eia.doe.gov/emeu/recs/recs1993>

²⁶ Residential Energy Consumption Survey. Energy Information Administration (EIA). DOE. <http://www.eia.doe.gov/emeu/recs/recs2001>

4.5.2 Toma de medidas y tratamiento de los resultados

De cada uno de los edificios seleccionados en el muestreo se toma sus facturas energéticas para un periodo de tiempo determinado, además de realizar una encuesta en la que se determinen las características del mismo, en cuanto a dimensión, orientación, grado de aislamiento y equipamiento, y sus patrones de uso y ocupación.

A un porcentaje de los edificios muestreados se les realizará una monitorización detallada, que proporcionará una información exhaustiva acerca del comportamiento energético del edificio, sirviendo de ayuda al posterior análisis y tratamiento que se deberá hacer de los datos procedentes de las facturas energéticas.

La monitorización detallada ayudará a la interpretación de las facturas, pudiendo desagregar, a partir de los datos procedentes de la encuesta, los consumos para los distintos usos y, posteriormente, separar cada uno de ellos en demanda y rendimiento.

Hay que recordar, tal y como se explicó en el capítulo tres de la tesis, que los consumos obtenidos a través de facturas no responden a un patrón de uso estándar ni a un clima de referencia, por lo que deben ser corregidos a través de un proceso de normalización, para que puedan ser utilizados dentro de un mismo escenario de comparación.

Para terminar se llevará a cabo la simulación de los edificios muestreados, adecuando los parámetros de entrada del modelo hasta conseguir una cierta concordancia con los resultados obtenidos de las facturas. Este procedimiento permitirá mejorar el conocimiento acerca de los patrones de usos reales y de las características de los edificios, lo que ayudará a la elaboración de unas reglas de inferencia que garanticen un mayor acercamiento a la realidad de los resultados procedentes de la simulación.

4.6 Escala de puntuación

Todos los sistemas de certificación estudiados presentan una valoración del edificio evaluado. Además de esto, algunos esquemas presentan más información acerca del edificio, como por ejemplo una propuesta de medidas de mejoras energéticas en función de su posible impacto sobre la calificación. Pero la calificación que finalmente va a recibir el edificio deberá ser fácilmente entendible por los usuarios finales del edificio. Por ello la posición que finalmente ocupe el

edificio dentro del escenario de comparación o la puntuación que obtenga de acuerdo a un determinado baremo deberá sintetizarse y expresarse en una puntuación.

Una posibilidad consiste en asignar al edificio objeto una puntuación que represente la situación del mismo frente a otros edificios con el mismo grado de similitud. Por ejemplo se podría puntuar en función del percentil que ocupe el indicador energético del edificio objeto comparado con la distribución de frecuencias acumuladas del parque edificatorio existente. Un ejemplo de este sistema de puntuación es el llevado a cabo por el sistema Energy Star (ver página 48 del capítulo dos).

Según la normativa europea prEN 15217 (CEN prEN 15217, 2005), desarrollada por el Comité Europeo de Normalización (CEN), la escala de puntuación se construirá a partir de los siguientes valores de referencia:

- Referencia relativa a la normativa (R_r): se corresponde con el valor límite de consumo que cabe esperar de edificios nuevos similares al edificio objeto, conformes a la reglamentación vigente en 2006.
- Referencia relativa al stock (R_s): se corresponde con el valor de consumo que cabe esperar sea alcanzado por el 50% del parque de edificios existentes similares al edificio objeto.

En función de la situación del consumo del edificio a evaluar frente a las referencias anteriores, se definirá el indicador C (ver Tabla 4.7).

Tabla 4.7: Procedimiento de cálculo del indicador C propuesto por prEN 15217.

Condición a cumplir por EP^{27} del edificio a evaluar	Cálculo del indicador C
$\frac{EP}{R_r} \leq 1$	$C = \frac{EP}{R_r}$
$1 \leq \frac{EP}{R_s}$	$C = 1 + \frac{EP}{R_s}$
Otros	$C = 1 + \frac{EP - R_r}{R_s - R_r}$

Este indicador servirá para puntuar finalmente el edificio, de acuerdo a una escala de clases (ver Tabla 4.8). Dado que esta escala se establece en función de los valores de referencia, el problema a resolver por cada país será el de fijar de

²⁷ Comportamiento energético del edificio. Valor del indicador energético empleado para su evaluación (por ejemplo consumo total).

forma adecuada estos valores. Para ello se hace indispensable el conocimiento de datos sobre consumos de edificios existentes.

Tabla 4.8: Escala de puntuación propuesta por prEN 15217.

CLASE	Valor del parámetro C
A	$C < 0.5$
B	$0.5 \leq C < 1$
C	$1 \leq C < 1.5$
D	$1.5 \leq C < 2$
E	$2 \leq C < 2.5$
F	$2.5 \leq C < 3$
G	$3 \leq C$

CAPÍTULO 5. DISTRIBUCIÓN DE CONSUMOS

Dado que no existe una población conocida sobre consumos de edificios en España, no será posible obtener las distribuciones de consumos para cada uso según el procedimiento descrito en el apartado 4.3 de la tesis (página 86), en el que se parte de una estadística amplia sobre consumos de edificios.

Por este motivo, según se explica en el apartado 4.4 de la tesis (página 105), la distribución de consumos normalizados se obtendrá asignando un modelo de probabilidad al conjunto de datos procedentes de otros países que si disponen de una estadística extensa sobre consumos de edificios, de forma que el modelo elegido pueda interpretarse como la población de la que proceden esos datos.

Habrá que seleccionar en primer lugar la muestra de datos disponibles que se adapte mejor a las características de nuestro país. Para ello se ha analizado tanto el contenido como el tamaño de las bases de datos sobre consumos de edificios residenciales existentes en otros países.

A continuación se llevará a cabo el proceso de asignación de un modelo de probabilidad a una muestra de datos. Este consta de dos fases fundamentales: una fase de selección del modelo y otra de evaluación.

La fase de selección consiste en la discriminación de los tipos de curvas o modelos en función de su grado de aproximación a los datos de la muestra.

También consistirá en la estimación de los parámetros en cada modelo a utilizar. Para ello es necesario realizar un análisis previo de los datos disponibles.

En la fase de evaluación o diagnóstico se pretende encontrar una relación estadísticamente significativa entre la muestra y los modelos seleccionados. Para ello se emplean varios métodos como son: la representación gráfica de los datos frente al modelo (métodos gráficos de evaluación); el cálculo de varios estadísticos (pruebas de bondad de ajuste) y, finalmente, el juicio del investigador basado en su experiencia (Christopher A., 2004).

5.1 Selección de la muestra de datos

Dentro del proyecto europeo ENPER-EXIST, que estudia la aplicación de la actual Directiva 2002/91/CE a edificios existentes, se ha analizado el nivel de información sobre consumos de edificios existentes en los países de la Unión Europea (K. Engelund Thomsen y otros, 2006). Se concluye que existen pocos países europeos donde se dispongan de una estadística extensa y completa sobre consumos de edificios, la mayoría de ellos proyecta obtener esta información en paralelo al procedimiento de certificación energética. Sólo en el caso de Dinamarca, cuyo modelo de certificación energética lleva funcionando desde el año 1997 (ver apartado 0, página 38), ha centralizado toda la información en una base de datos, facilitando una estadística completa y detallada sobre los consumos energéticos de los edificios existentes.

El Departamento de Energía de los Estados Unidos, lleva realizando desde el año 1987 campañas para la toma de datos relativos al consumo energético del sector residencial. Estas bases de datos se han constituido a partir de un muestreo previo, y contienen multitud de campos relativos al consumo y a las características de los edificios estudiados. La información detallada acerca del contenido de esta base de datos (RECS 2001) se encuentra disponible en el Anexo B de la tesis.

Para el presente estudio se ha buscado una base de datos con las siguientes características:

- Que contenga valores de consumo segregados por usos (calefacción, refrigeración, agua caliente sanitaria e iluminación)
- Que contenga algún campo con variables climáticas, como por ejemplo los grados-día, para poder obtener correlaciones que permitan la normalización climática.
- Que tenga un tamaño adecuado y que abarque una diversidad climática semejante a la existente en España.

Dado que la diversidad climática recogida en la base de datos RECS del Departamento de Energía de Estados Unidos es muy extensa, por lo que incluye una variación similar a la de España, y que esta base de datos contiene información acerca de los consumos segregados, se ha tomado como base para el proceso de asignación del modelo de probabilidad.

5.2 Selección de los modelos de distribución

Para obtener la variable objeto de análisis se ha partido de los datos de consumo de calefacción y de refrigeración procedentes de RECS 2001 (Anexo B). Estos consumos se han dividido por el *consumo de referencia* correspondiente a su clima (ver apartado 4.3, página 89), obteniendo una nueva muestra de consumos de calefacción y de refrigeración normalizados, que será la muestra a ajustar por el modelo de distribución.

Seguidamente se procederá a hacer un análisis descriptivo de los datos de la nueva muestra de consumos normalizados, que servirá como punto de partida para la selección previa de los modelos de distribución. El resultado se muestra en la Figura 5.1, en la que se representan los histogramas correspondientes a cada una de las dos variables estudiadas: consumo normalizado de calefacción y consumo normalizado de refrigeración. Para la construcción del histograma se ha tenido en cuenta que el límite inferior sea cero, ya que se trata de valores de consumos que no son negativos.

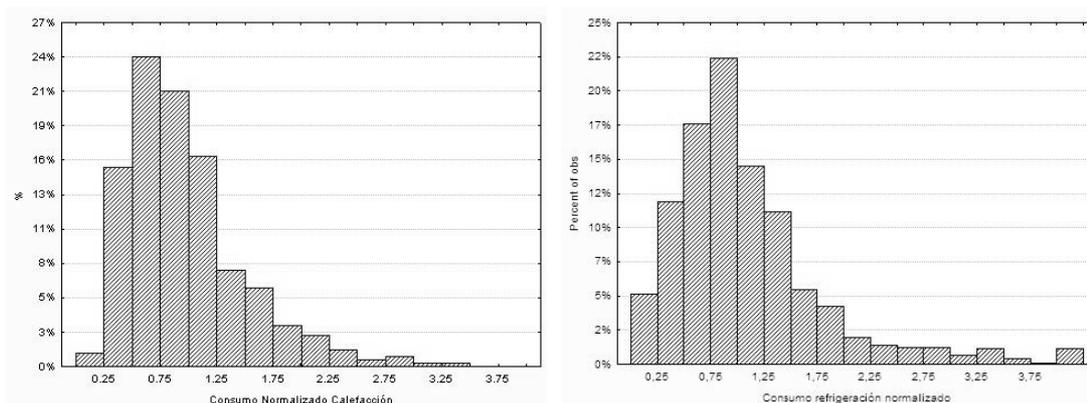


Figura 5.1: Distribución de consumos normalizados de calefacción y de refrigeración. Origen base de datos RECS 2001.

En ambos casos nos encontramos con datos unimodales, con asimetría positiva. Y también se observa que la zona de la moda tiene un apuntamiento en forma de campana. De acuerdo a las forma que muestran los histogramas, y teniendo en cuenta que la variable sólo toma valores positivos, el grupo de

distribuciones estadísticas susceptibles de ser utilizadas como modelos se reducen a las siguientes: Weibull, Logarítmica Normal y Gamma.

A continuación se muestran las funciones de densidad correspondientes a los modelos de distribución seleccionados.

Distribución Weibull:

$$f(x) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{x}{\beta}\right)^{\alpha-1} \exp\left(-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha\right) ; x > 0 \quad [5.1]$$

, donde α es el factor de forma y β el factor de escala.

Distribución LogNormal:

$$f(x) = \frac{\exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \mu}{\sigma}\right)^2\right)}{x\sigma\sqrt{2\pi}} ; x > 0 \quad [5.2]$$

, donde μ es la media y σ la desviación estandar.

Distribución Gamma:

$$f(x) = \frac{x^{\alpha-1}}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \exp\left(-\frac{x}{\beta}\right) ; x > 0 \quad [5.3]$$

, donde α es el factor de forma, β el factor de escala y Γ viene dada por:

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} t^{\alpha-1} e^{-t} dt \quad [5.4]$$

5.2.1 Estimación de parámetros de los modelos

Una vez seleccionados los modelos de distribución a evaluar, se procederá a estimar los parámetros de las tres distribuciones propuestas en el apartado anterior (Weibull, Logarítmica Normal o Gamma).

Existen varios métodos para la estimación de los parámetros de distribuciones basados en la muestra de datos. Cada uno de ellos es más apropiado

para cada tipo de distribución (Christopher A. Cheng, 2004). Para la asignación de los parámetros correspondientes a los tres modelos propuestos en el apartado anterior (Weibull, Logarítmica Normal o Gamma), se han empleado los siguientes:

- Método de los momentos: para la función Gamma y Logarítmica Normal
- Método de máxima verosimilitud: para la función Weibull

Los resultados, que se resumen en las tablas siguientes, se han obtenido mediante el programa estadístico EasyFit 3.0 (MathWave Technologies, 2006).

Tabla 5.1: Parámetros estimados para los modelos de distribución propuestos para el Consumo normalizado de calefacción.

	Distribución	Parámetros
1	Gamma	$\beta=0.42509$ $\alpha=2.2638$
2	Lognormal	$\sigma=1.6372$ $\mu=-1.0873$
3	Weibull	$\beta=0.73418$ $\alpha=0.69629$

Tabla 5.2: Parámetros estimados para los modelos de distribución propuestos para el Consumo normalizado de refrigeración.

	Distribución	Parámetros
1	Gamma	$\beta=1.8425$ $\alpha=0.59045$
2	Lognormal	$\sigma=0.8676$ $\mu=-0.21365$
3	Weibull	$\beta=1.4107$ $\alpha=1.1806$

5.3 Evaluación de los modelos de distribución

En esta etapa se investiga la concordancia entre las observaciones y los valores predichos por el modelo, asignando una medida de probabilidad a dicha concordancia. Existen varios métodos para la evaluación del ajuste de una distribución teórica a una muestra de valores (Johnson et al., 1999). Estos métodos se basan en la comparación entre los valores observados de la muestra y los valores procedentes de la distribución teórica. Se han empleado tres métodos para evaluar la bondad del ajuste:

1. Métodos gráficos
2. Test Chi Cuadrado
3. Test Kolmogorov – Smirnov

5.3.1 Métodos gráficos

Consisten en la comparación cualitativa de los datos de la muestra frente los valores de la distribución teórica.

El primer método gráfico para valorar la desviación de la muestra frente a la distribución consiste en comparar el histograma procedente de la muestra de valores con la curva de probabilidad acumulada correspondiente a la distribución teórica.

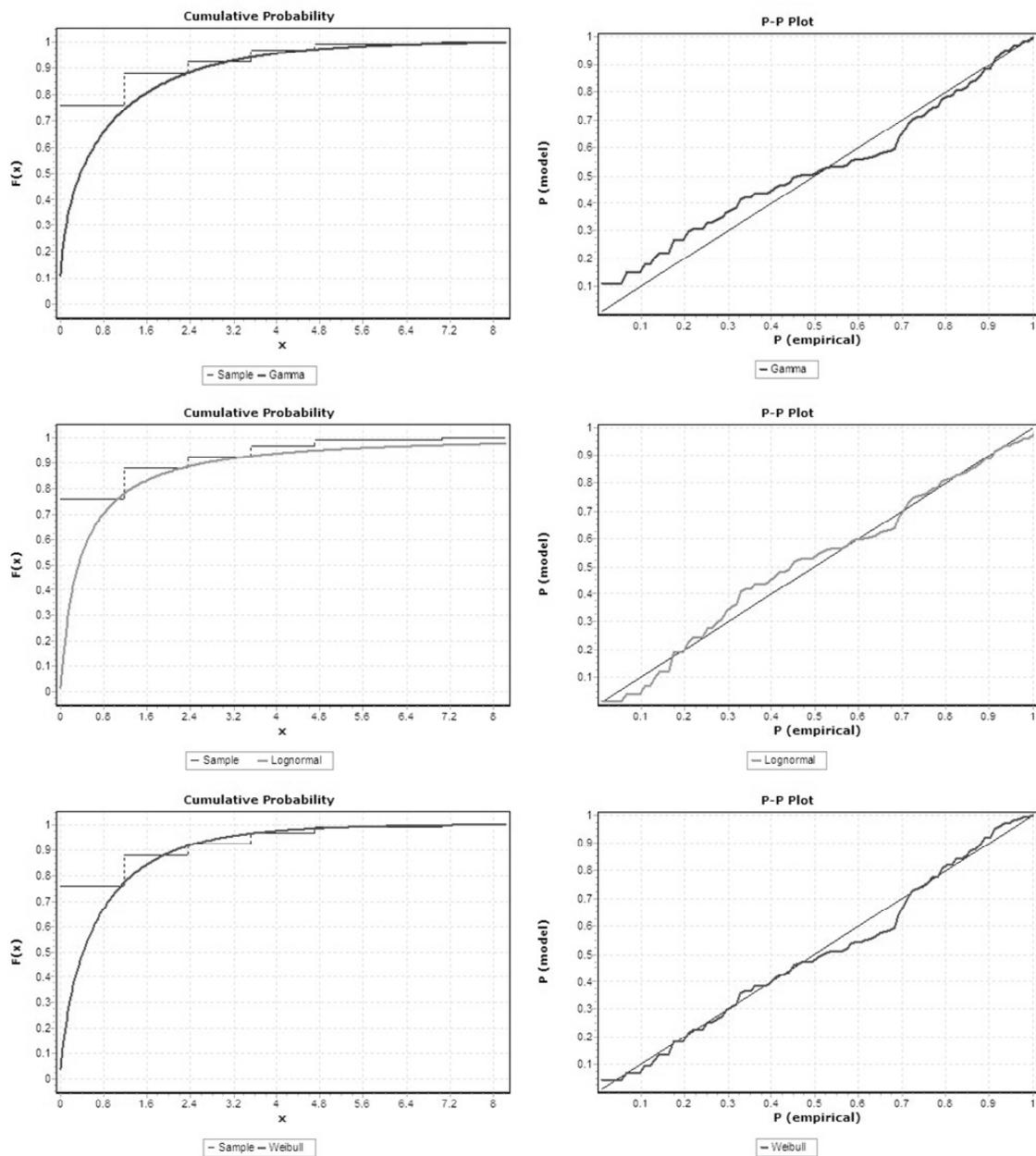


Figura 5.2: Comparación de datos de consumos normalizados de calefacción obtenidos de la muestra (datos reales) frente a datos ajustados mediante los modelos de distribución siguientes: Gamma, Lognormal y Weibull.

En la columna izquierda de la Figura 5.2 y la Figura 5.3 se muestra este gráfico comparativo correspondiente a los datos de la muestra. Se observa como la distribución Logarítmica Normal es la que más se aleja del histograma de la muestra.

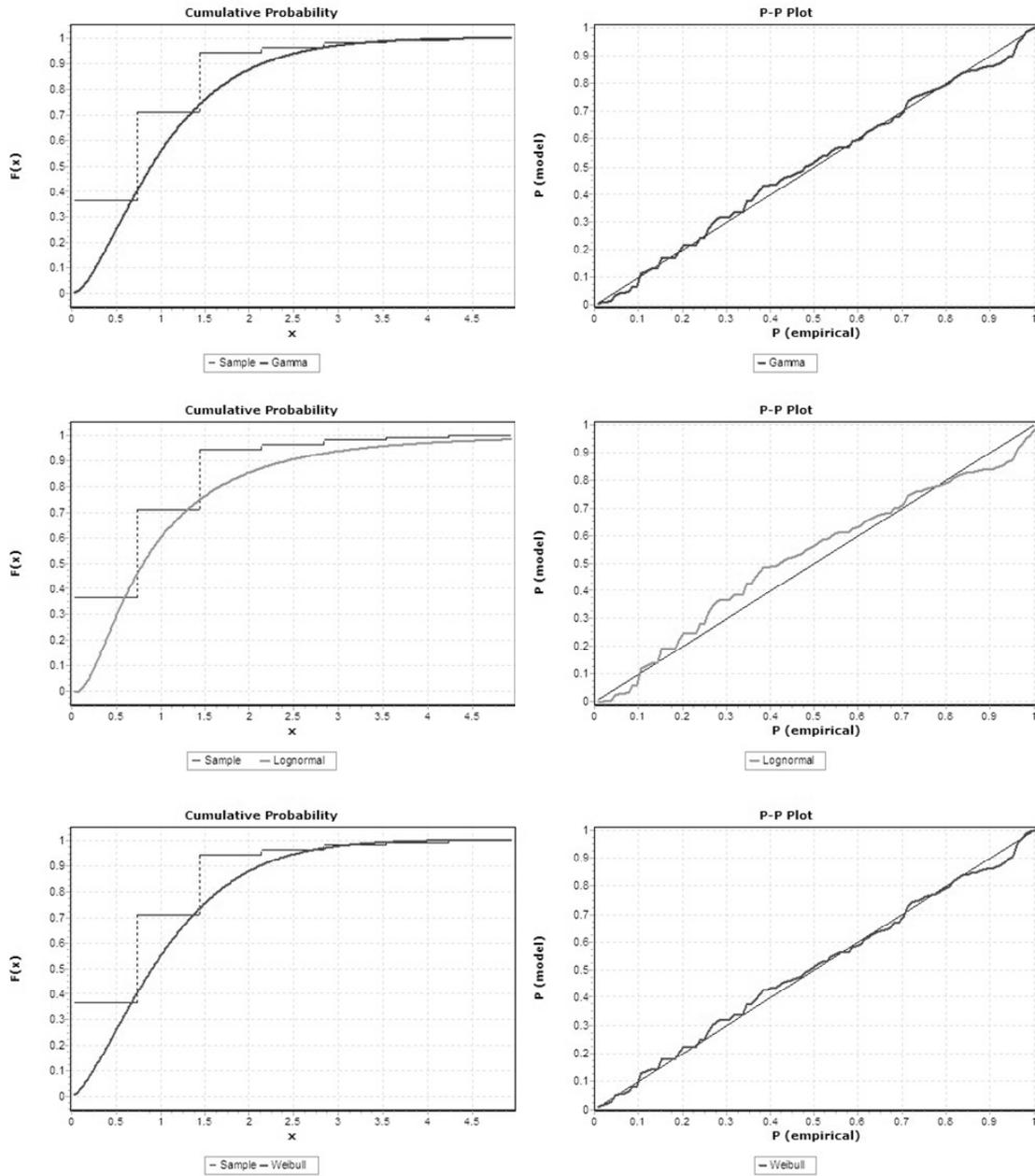


Figura 5.3: Comparación de datos de consumos normalizados de refrigeración obtenidos de la muestra (datos reales) frente a datos ajustados mediante los modelos de distribución siguientes: Gamma, Lognormal y Weibull.

Existen otros métodos gráficos específicos para este propósito, como son los gráficos P-P. En este caso se confrontan las probabilidades acumuladas de la variable de la muestra con las de la distribución teórica. Si la variable seleccionada coincide con la distribución de prueba, los puntos se concentran en torno a una

línea recta. En la Figura 5.2 y Figura 5.3 se muestra el gráfico P-P correspondiente a los datos de la muestra. Sugiere, al igual que el correspondiente histograma, que la distribución de la variable se aleja de la distribución Logarítmica Normal, y se encuentra más próxima a una distribución tipo Weibull.

En esta primera aproximación comienza a quedar claro que, de las tres distribuciones usadas (Log-normal, Gamma y Weibull), las dos que mejor se ajustan a las observaciones son la Gamma y la Weibull, los puntos se sitúan muy cerca de la línea y el comportamiento de los mismos no sigue un patrón curvilíneo como en el caso de la Log-normal.

5.3.2 Tests de ajuste estadístico

Los tests de ajuste estadístico tienen como objetivo evaluar la bondad del ajuste del conjunto de datos de la muestra a una determinada distribución candidata. Su finalidad es aceptar o rechazar la hipótesis de que la muestra procede de una población que se ajusta a la distribución. Para ello se define un nivel de significación, que indicará la probabilidad de que el resultado del contraste de hipótesis se deba al azar. El valor más frecuente de este nivel suele ser $\alpha=0.05$.

La hipótesis se podrá considerara aceptada si el estadístico correspondiente, que cuantifica la desviación entre los datos de la muestra y la distribución teórica, es inferior a un valor crítico, que varía en función del nivel de significación escogido. En la

Tabla 5.5 se muestran los valores críticos para un nivel de significación $\alpha=0.05$.

Los estadísticos evaluados se obtienen a partir de la aplicación de los siguientes tests de bondad de ajuste:

- El test Chi Cuadrado (Snedecor and Cochran, 1989), que es aplicable tanto a variables continuas como discretas, y compara la función de densidad de probabilidad de la muestra con la de la distribución teórica (ver valores del estadístico en la Tabla 5.3 y la Tabla 5.4).
- El test de Kolmogorov Smirnov (Chakravart, Laha, and Roy, 1967), que es únicamente aplicable a variables continuas, y compara la función de probabilidad acumulada de la muestra con la de la distribución teórica (ver valores del estadístico en la Tabla 5.3 y la Tabla 5.4).

Tabla 5.3: Valores de los estadísticos para medir la bondad del ajuste de los datos de consumo normalizado de calefacción.

Distribución	Kolmogorov Smirnov		Chi Cuadrado	
	Estadístico	Ranking	Estadístico	Ranking
Lognormal	0.07801	1	4.1936	1
Weibull	0.08932	2	7.2992	2
Gamma	0.10144	3	14.154	3

Tabla 5.4: Valores de los estadísticos para medir la bondad del ajuste de los datos de consumo normalizado de refrigeración.

Distribución	Kolmogorov Smirnov		Chi Cuadrado	
	Estadístico	Ranking	Estadístico	Ranking
Weibull	0.05064	1	2.9561	1
Gamma	0.05293	2	5.6692	2
Lognormal	0.09938	3	11.244	3

Tabla 5.5: Valores críticos para medir la bondad del ajuste de los datos con $\alpha=0.05$

	Calefacción	Refrigeración
Chi Cuadrado	11.07	12.592
Kolmogorov Smirnov	0.14257	0.13336

Se observa, de los resultados anteriores que la distribución Weibull se ajusta a los datos de la muestra con un nivel de significación del 0.05, por lo que se acepta la hipótesis de que los datos de la muestra proceden de una población que sigue una distribución de este tipo.

5.3.3 Discusión de los resultados de la evaluación

El problema que estamos tratando, el consumo final de cualquiera de los conceptos, es siempre la suma de consumos de muchos equipos que no pueden medirse de manera directa. Estos consumos, a través de sus valores máximos y la frecuencia con que se dan, determinan en última instancia el consumo final de energía en el conjunto del edificio. Cada uno de los consumos en cada equipo tendrá una determinada distribución, que en general, es desconocida, puesto que los datos medidos recogen consumos globales del edificio. Los modelos estadísticos que proporcionan distribuciones asintóticas que aproximan y representan los valores críticos son conocidos como Modelos de Valor Extremo (Karl V. Bury. Y otros, 1986). De esta familia de modelos, los de tipo I son los que más se ajustan a nuestro caso. Estos modelos consideran que las distribuciones subyacentes en cada uno de los conceptos de consumo que finalmente conducen al consumo global no están limitadas en la dirección del valor límite. Desde el punto de vista de los

consumos máximos, esto se traduce en que los consumos máximos no tienen límite superior. Así, cualquiera que sea la distribución (Normal, Weibull, Logarítmica Normal, o Gamma) de consumos de los equipos y de cada concepto, podemos decir que los valores máximos están determinados por una distribución de la familia de los modelos de valor extremo de tipo I. En concreto, la distribución de Weibull pertenece a esta familia. Además, la distribución de Weibull presenta una flexibilidad interesante, ya que se adapta con mayor facilidad a variaciones gracias a su parámetro de forma.

Tras haber comprobado mediante diversos métodos que el ajuste que realiza es suficientemente bueno, y que conceptualmente encaja dentro del problema que tratamos de representar, se decide el uso de la distribución de Weibull para representar los consumos globales de los edificios.

5.4 Procedimiento de obtención de la distribución de consumos

Una vez que ha sido determinado el tipo de distribución que mejor se ajusta a los datos de consumos en edificios, es necesario describir un procedimiento que permita obtener la distribución de consumos a partir de una serie de parámetros característicos.

Partiendo de que la expresión de la distribución de Weibull, en términos de probabilidad acumulada es la siguiente:

$$F(x; \beta, \alpha) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha\right) \quad x > 0 \quad [5.5]$$

Y siendo p la probabilidad asociada al percentil x , y c_0 una constante a determinar, se deduce que:

$$x - c_0 = \beta \left(-\ln(1 - p)\right)^{\frac{1}{\alpha}} \quad [5.6]$$

Para determinar la forma de la distribución será necesario fijar, ya sea bajo hipótesis de partida o a partir del análisis de aquellos datos disponibles sobre la muestra de consumos a representar, dos parámetros relacionados con la forma de la distribución y un valor de referencia que permita la transformación de la distribución normalizada en la distribución de consumos deseada.

A continuación se van a explicar los distintos pasos que permiten definir la distribución de acuerdo a las exigencias conocidas sobre la muestra de consumos a representar. Para ello se ha tenido en cuenta una distribución tipo Weibull. Este procedimiento se podría extrapolar en el caso de optar por otro tipo de distribución en lugar de la Weibull.

5.4.1 Determinación del parámetro de forma alfa

La forma de la distribución que deseamos obtener, deberá ser tal que mantenga la misma concavidad a lo largo de todos los valores posibles. La condición de constancia de la concavidad se consigue cuando la derivada segunda de la expresión [5.1] permanece negativa para todo $x > 0$.

El punto de inflexión se da en:

$$x_{infle} = c_0 + \frac{\alpha - 1}{\alpha} \beta \quad [5.7]$$

Para determinar el parámetro alfa de la función estadística se fijará el punto de inflexión en un percentil determinado, obteniendo el valor de α a partir de la siguiente ecuación:

$$\frac{\alpha - 1}{\alpha} \beta = \beta (-\ln(1 - p))^{\frac{1}{\alpha}} \quad [5.8]$$

El punto de inflexión de la distribución, es decir, el percentil a partir del cual la función de probabilidad acumulada pasa de convexa a cóncava, suele encontrarse por debajo del percentil del 20%. Esta hipótesis de partida deberá llevarse a cabo tras la inspección de diversas distribuciones de consumos reales, como las realizadas con las fuentes de datos de Estados Unidos (RECS 1993 y 1997, anexo B) realizadas en el apartado anterior.

Volviendo al procedimiento de obtención del parámetro α , asumiendo que β es distinto de cero, de la expresión [5.4] se obtiene el valor máximo de alfa.

A continuación se muestra una lista de los posibles valores de alfa para diferentes puntos de inflexión.

Tabla 5.6: Variación del parámetro α con el punto de inflexión

Punto de inflexión	Parámetro α
Percentil 10 %	1.17
Percentil 15%	1.35
Percentil 20%	1.72

Suponiendo que se elige el 20% como punto de inflexión, la función que representa la distribución normalizada de consumos viene dada por:

$$F(Y, \alpha) = 1 - \exp\left(- (Y)^{1.72}\right) \quad [5.9]$$

Siendo la variable que representa el consumo normalizado la siguiente:

$$Y = \left(\frac{X - C_0}{\beta} \right) \quad [5.10]$$

El valor correspondiente al percentil del 20% es $Y = 0.418$. Y el valor medio de esta distribución vendrá dado por:

$$\mu = \Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) \quad [5.11]$$

Para $\alpha = 1.72$ se obtiene un valor medio de $Y = 0.892$ a partir de la expresión [5.7], que se corresponde, según la expresión [5.5], con un percentil del 56%.

De la expresión [5.2] se pueden obtener los distintos valores de la variable normalizada Y , asociados a cada percentil. En la tabla siguiente se muestran algunos de ellos para $\alpha = 1.72$.

Tabla 5.7: Percentiles de la variable Y ($\alpha = 1.72$)

Percentil	Variable normalizada Y
10%	0.27
30%	0.549
50%	0.808
70%	1.114
90%	1.624

A continuación se muestra una tabla resumen con los valores característicos de la distribución normalizada para distintos valores de alfa, es decir, para distintos puntos de inflexión.

Tabla 5.8: Valores característicos de la distribución normalizada en función de α

<i>alfa</i>	<i>Punto de inflexión</i>	<i>Valor medio</i>	<i>Probabilidad de la media</i>
1.17	Y10% = 0.146	0.947	0.61
1.35	Y15% = 0.26	0.917	0.59
1.72	Y20% = 0.418	0.892	0.56

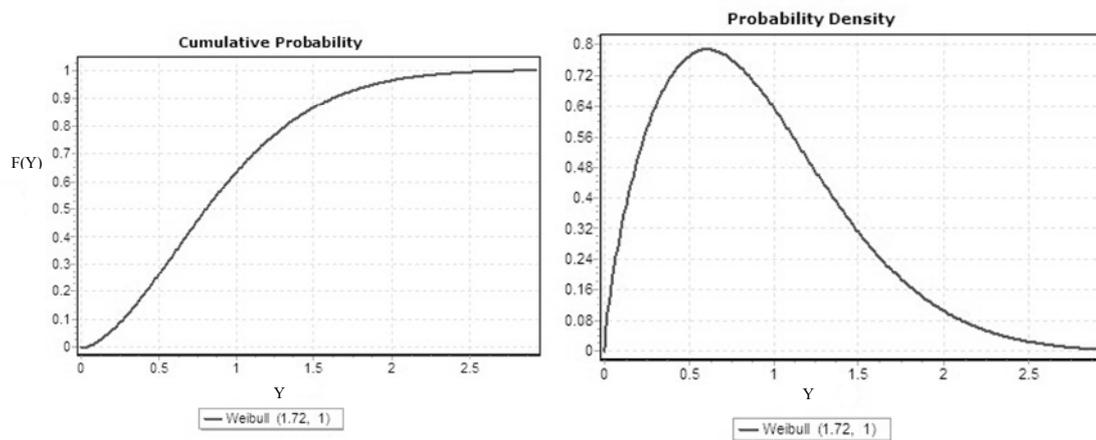


Figura 5.4: Probabilidad acumulada y función densidad, con inflexión en el percentil del 20% ($\alpha=1.72$).

5.4.2 Determinación de la constante de traslación c_0'

El segundo paso del proceso consiste en la determinación de la constante de traslación normalizada C_0' . Para ello se parte de la ecuación [5.12], donde se representa la variable estadística normalizada Y.

$$Y = \left(\frac{X - c_0}{\beta} \right) = \frac{X}{\beta} - c_0' \quad [5.12]$$

Para ello, se requerirá de un parámetro K que representa el ratio entre el valor de consumo correspondiente a un percentil alto, por ejemplo el correspondiente al percentil del 90%, y el valor de consumo correspondiente a un percentil bajo, por ejemplo el 10%. Como se explicó en el apartado 4.3 de la tesis (página 98), este ratio dependerá tanto del tipo de uso energético que se esté representando como del grado de similitud escogido para elaborar el escenario de comparación. A partir de este se determinará la constante de desplazamiento normalizada de la distribución, C_0' , mediante la expresión [5.13].

$$\frac{X_{90}}{X_{10}} = K \longrightarrow \frac{Y_{90} + C_0'}{Y_{10} + C_0'} = K \longrightarrow C_0' = \frac{Y_{90} - K \cdot Y_{10}}{K - 1} \quad [5.13]$$

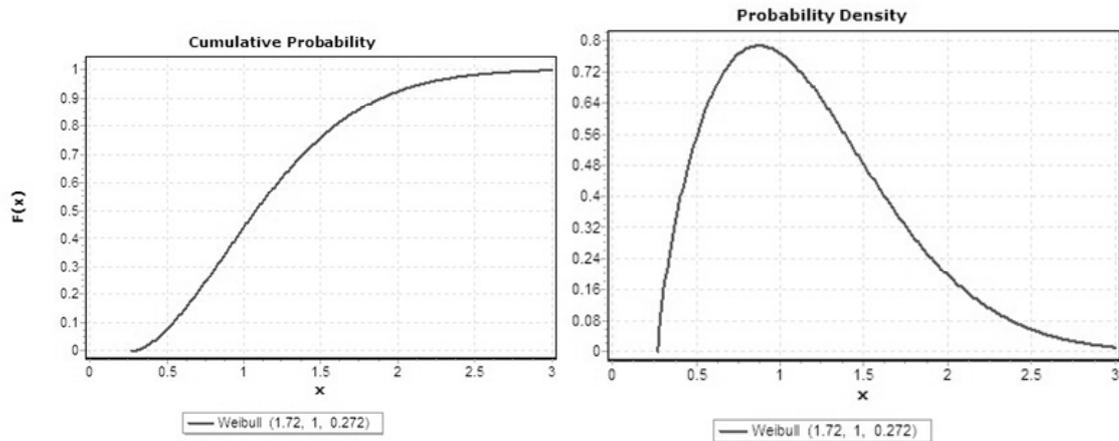


Figura 5.5: Probabilidad acumulada y función densidad, con inflexión en el percentil del 20% y ratio 90%-10% igual a 3.5 ($\alpha=1.72$; $c_0'=0.272$).

En la siguiente tabla se resumen los diversos valores que toma la constante de traslación normalizada C_0' para distintos márgenes de variación del consumo, expresados a través del ratio entre los percentiles 90 y 10%.

Tabla 5.9: Variación de la constante de traslación frente al ratio 90-10%

Ratio 90-10%	Constante de traslación C_0'
3.5	0.272
4	0.181
5	0.068

En el caso de que no se conozca ninguna relación entre dos percentiles, este paso se obviará, suponiendo que la constante de desplazamiento C_0' es igual a cero. Esto sería equivalente a afirmar que la relación entre el percentil del 90% y el 10% vienen dado por la expresión [5.14].

$$\frac{x_{90}}{x_{10}} = \frac{Y_{90}}{Y_{10}} = K \quad [5.14]$$

Por ejemplo, para $\alpha=1.72$, como $Y_{90}=1.624$ y $Y_{10}=0.270$, si se considera que C_0' es igual a cero, se tendría, según la expresión [5.14] $K=6.015$.

5.4.3 Determinación del factor de escala beta

Para deshacer la normalización de la distribución será necesario obtener el factor de escala beta. Para ello se transformará la distribución de modo que se

obligue a que pasar por un valor de referencia, por ejemplo el valor medio de la muestra que se desea representar, o el valor correspondiente a un percentil determinado, por ejemplo el 50%, mediana de la muestra.

Para ilustrar este último paso se supone que se conoce la mediana del consumo de la población de viviendas, es decir, se conoce el percentil x_{50} . Conocido este valor y el parámetro K (relación entre el percentil del 90% y del 10%), se podrá determinar el factor de escala beta a través de la ecuación [5.15].

$$\beta = \frac{x_{50}}{Y_{50} + C_0'} \quad [5.15]$$

El coeficiente de traslación de la distribución, C_0 , se calculará a partir de la ecuación [5.16]

$$C_0 = \beta \cdot C_0' \quad [5.16]$$

A continuación se muestra los valores del factor de escala β calculado con un valor de referencia $x_{50}=130 \text{ kWh/m}^2$, para distintos valores de α y con un ratio 90%-10% igual a 3.5.

Tabla 5.10: Valores del factor de escala β y de la constante de traslación C_0' en función de α . Para valor de referencia $x_{50} = 130 \text{ kWh/m}^2$ y ratio 90%-10% igual a 3.5 ($K=3.5$).

Factor de forma α	Constante de traslación normalizada C_0'	Factor de escala β	Constante de traslación C_0
1.17	0.6112	96.86	59.200
1.35	0.4788	104.77	50.164
1.72	0.2716	120.41	32.705

El valor de referencia será el que determina finalmente el grado de similitud entre el edificio objeto y la distribución estadística de consumos energéticos. Hay que recordar que esta distribución podrá utilizarse como escenario de comparación, permitiendo evaluar al edificio objeto con respecto a otros edificios del mismo tipo, situados en la misma localidad, con el mismo uso, etc. Es decir, las características que comparta el edificio objeto con los edificios representados en la distribución de consumos dependerán del origen del valor de referencia, es decir, del conjunto de edificios a los que represente este valor.

En el ejemplo de la Figura 5.6 se obtiene la distribución a partir de un valor de referencia $x_{50} = 130 \text{ kWh/m}^2$. Si este valor representa el consumo total asociado al percentil del 50% de la población de viviendas unifamiliares existentes en Sevilla, la distribución de consumos obtenida a partir de él sería válida para evaluar edificios de viviendas unifamiliares existentes, situados en Sevilla.

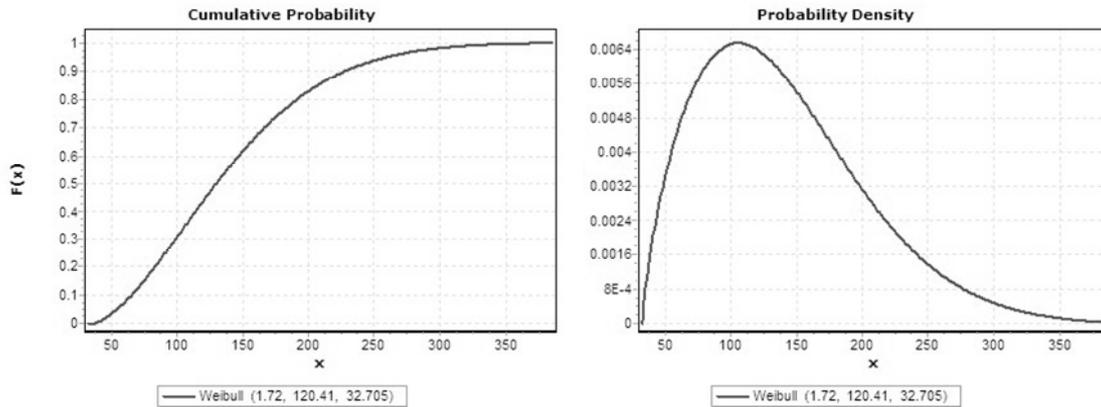


Figura 5.6: Probabilidad acumulada y función densidad, con inflexión en el percentil del 20% y ratio 90%-10% igual a 3.5 ($\alpha=1.72$; $\beta=120.41$; $c_0=32.705$). Y valor de referencia $x_{50} = 130 \text{ kWh/m}^2$.

En la Tabla 5.11 y en la Figura 5.7, página siguiente, se muestra cómo la distribución de consumos varía, con un mismo valor de referencia $x_{50} = 130 \text{ kWh/m}^2$, para márgenes de variación del consumo diferentes.

Tabla 5.11: Valores del factor de escala β y de la constante de traslación C_0 en función del ratio 90%/10% Para valor de referencia $x_{50} = 130 \text{ kWh/m}^2$.

Factor K	Constante de traslación normalizada C_0'	Factor de escala β	Constante de traslación C_0
3.5	0.272	120.41	32.705
4	0.181	131.43	23.80
5	0.068	148.38	10.10

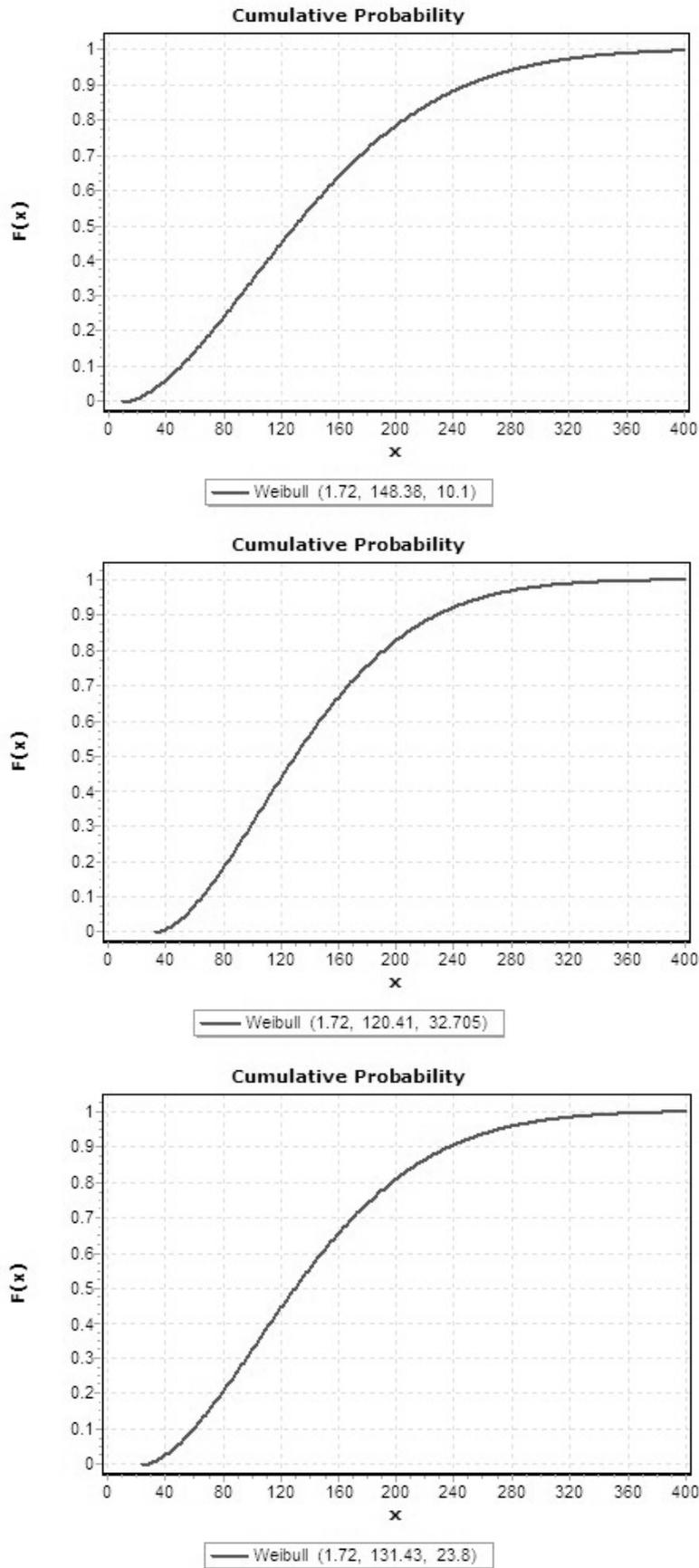


Figura 5.7: Variación de la distribución de consumos en función del ratio 90%/10% (3.5; 4; 5)

CAPÍTULO 6. MEDIDAS DE AHORRO ENERGÉTICO

6.1 Introducción

Uno de los objetivos fundamentales del proceso de certificación de edificios existentes es la mejora del comportamiento energético de los mismos, para lo cual se deberá incluir en el certificado, según la Directiva, una serie de recomendaciones sobre medidas de mejora aplicables al edificio evaluado. Eventualmente, para aquellas medidas de claro interés energético, económico y medioambiental se podría propiciar, a través de subvenciones o exención de impuestos como el IBI, su implementación real.

Estas recomendaciones constituirían un catálogo de medidas de mejora viables técnicamente y rentables económicamente, que podría desarrollar cada comunidad autónoma, respondiendo a criterios regionales de política energética. Este catálogo podría desarrollarse vía simulación, constituyendo diversos paquetes de medidas en función de diversos escenarios de tipos de edificios, climas y características de la construcción del edificio y de sus sistemas.

En el caso de una certificación de edificios existentes basada en simulación, como propone el Proyecto de Real Decreto de Certificación de Edificios Existentes para España (ver capítulo CAPÍTULO 3), la propia herramienta de simulación podría ser empleada para la realización de estudios comparativos a partir de las sugerencias del catálogo de medidas de mejora. Esto permitiría cuantificar y ordenar las medidas para facilitar la selección de aquellas con mayor interés energético.

Pero en el caso de que la certificación se base únicamente en medidas sería necesario, además, proceder a la desagregación del consumo del edificio por usos, y en demandas y rendimientos para cada uso, tal y como se propuso en el capítulo tres sobre la caracterización energética del edificio. La identificación de los consumos excesivos y de sus causas permitiría identificar las medidas de catálogo más adecuadas al edificio estudiado. A partir de aquí, y a pesar de que la Directiva no obliga a una cuantificación detallada de las medidas de mejora, sería conveniente la elaboración de procedimientos, alternativos a la simulación, para la estimación de potenciales de mejora. Por ello se propone la elaboración de una herramienta que podría, en un primer paso, buscar entre los distintos bloques de actuación los posibles modos de mejorar la eficiencia energética del edificio. Evaluando, posteriormente, el porcentaje de mejora asociado a cada una de las alternativas previamente seleccionadas. De esta forma se proporcionaría al usuario parte de la información necesaria para decidir sobre cambios en el consumo final del inmueble.

6.2 Factores de actuación sobre el ahorro energético

El estudio de las medidas de ahorro en un edificio presenta una gran complejidad, dada la gran cantidad y diversidad de relaciones existentes entre los distintos parámetros que intervienen en el comportamiento del edificio.

Existen muchos parámetros que pueden tener efectos contrapuestos, aumentando el consumo de algunas unidades activas y disminuyéndolo de otras.

Es importante tener en cuenta que existirán algunas medidas que impliquen un nuevo diseño o un re-diseño del sistema de climatización. El diseño lo exigiría la introducción de un nuevo equipo dentro del sistema, como sería el caso de incluir un equipo de recuperación de calor, o el cambio por completo de sistema, en cambio el re-diseño sería consecuencia de introducir cambios en las variables de diseño o en las condiciones de operación.

Los dos grandes factores que afectan de manera directa al consumo energético de un edificio son la Demanda energética del edificio y el rendimiento medio estacional del sistema, y que se relacionan, como bien es sabido mediante la expresión siguiente:

$$C = \frac{D}{\eta} \quad [6.1]$$

Gracias a esta sencilla expresión se puede interpretar que para conseguir un descenso del consumo de energía por instalaciones térmicas en un edificio se podría actuar:

1. Reduciendo la Demanda energética del edificio.
2. Aumentando el rendimiento medio estacional de la instalación.
3. Realizando conjuntamente una reducción de la Demanda y un incremento del rendimiento medio estacional.

6.2.1 Factores que intervienen en la demanda energética

Las variables necesarias para realizar el cálculo de cargas pueden localizarse dentro de uno de estos tres bloques:

1. Clima: todas aquellas variables relativas a la climatología correspondiente a la localidad geográfica donde se encuentre el edificio.
2. Epidermis: características de la epidermis edificatoria referidas al comportamiento térmico de la misma.
3. Características ocupacionales y funcionales del edificio: bajo este nombre se reflejan los niveles de ocupación, iluminación y equipos, así como su variación durante el período de funcionamiento.

De esta forma la Demanda energética de un edificio puede expresarse mediante la siguiente relación funcional:

$$D = \phi(\text{Clima}, \text{Epidermis}, \text{COF}, \text{IF}) \quad [6.2]$$

Dado que las características climáticas dependen exclusivamente del emplazamiento del edificio, las características ocupacionales y funcionales así como el intervalo de funcionamiento son impuestas por la tipología de la edificación y los usos que se hagan de ella, solamente es posible actuar sobre la epidermis edificatoria para poder modificar de alguna manera la demanda del edificio.

6.2.2 Factores que intervienen en el rendimiento

El rendimiento global de una instalación podría representarse mediante la siguiente expresión:

$$\eta_{Global} = \phi(\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n) \quad [6.3]$$

Donde $\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n$ representan los rendimientos parciales de los equipos que componen el sistema de climatización.

Resulta fácil adivinar, en función de esta última expresión, que el aumento en los rendimientos de los equipos implica, de manera indirecta, un aumento del rendimiento global de la instalación.

Pero un aumento en la eficiencia de los equipos no es lo único que puede hacerse para mejorar la totalidad del sistema ya que el propio sistema influye fuertemente a la hora de conectar los distintos equipos, es decir no sólo los equipos influyen sobre el rendimiento global del sistema sino también al acoplamiento existente entre ellos.

Es la función ϕ la que caracteriza la disposición y el enlace de los distintos equipos representando de esta forma el tipo de sistema empleado y las estrategias de operación escogidas para su funcionamiento.

Además, la esperada influencia de las fuentes de energía sobre el rendimiento global se encuentra incluida en los rendimientos parciales de los equipos.

Resumiendo, un buen rendimiento global no se obtiene únicamente mediante un aumento de los rendimientos parciales de los equipos, ya que aunque sea una posible fuente de mejora se conseguirían mejores resultados si se partiese del sistema más adecuado.

Es importante destacar también que el rendimiento de un equipo puede variar con el tiempo dependiendo del factor de carga que soporte en cada instante. Generalmente al trabajar en condiciones muy próximas a las nominales el rendimiento se encuentra muy próximo al máximo, mientras que durante periodos de funcionamiento a carga parcial este se reduce.

6.3 Estimación de potenciales de ahorro energético

A continuación se proponen dos metodologías simplificadas para la estimación de los potenciales de ahorro asociados a diversas medidas de mejora como son: la sustitución o puesta a punto de equipos de refrigeración y calefacción, y la variación del nivel de aislamiento del edificio.

También se lleva a cabo una revisión de los potenciales de ahorro asociados a actuaciones sobre posibles fallos o problemas que, comúnmente, suelen darse en las instalaciones de climatización de edificios residenciales.

Con todo ello se puede elaborar el catálogo de medidas de mejora para diversas circunstancias. Es decir, esta lista de medidas se adecuará a los distintos tipos de edificios, climas y características de la construcción y de sus sistemas.

6.3.1 Estimación de potenciales de ahorro por mejora de equipos

Esta metodología permitirá estimar potenciales de ahorros asociados a la sustitución o puesta a punto de aquellos equipos que representen consumos energéticos importantes dentro del sistema de climatización.

El consumo de un equipo se puede expresar como el cociente entre la demanda sobre el equipo y el rendimiento medio estacional.

$$C = \frac{D_{eq}}{\eta} \quad [6.4]$$

La metodología desarrollada para la estimación del ahorro debido a esta medida parte de la hipótesis de que la demanda se mantiene constante al pasar del equipo existente al equipo mejorado. Esto quiere decir que el nuevo equipo hace frente a la misma demanda que el equipo existente pero con mejores prestaciones, lo que se traducirá en un menor consumo.

$$C_2 \cdot \bar{\eta}_2 = C_1 \cdot \bar{\eta}_1 \quad [6.5]$$

En esta metodología la mejora de las prestaciones del equipo se representan a través de dos factores: Factor de Mejora del Rendimiento (*FMr*) y Factor de Mejora a Carga Parcial (*FMcp*). Estos factores son indicadores del grado de mejora del equipo nuevo frente al existente, ya sea mediante un aumento del rendimiento en condiciones nominales (*FMr*) o mediante la mejora del comportamiento a carga parcial (*FMcp*).

El factor de mejora del rendimiento, *FMr*, se expresa mediante el incremento relativo del rendimiento nominal al pasar del equipo existente al mejorado:

$$FMr = \frac{\eta_2 - \eta_1}{\eta_1} = \frac{\Delta\eta}{\eta} \quad [6.6]$$

donde:

η_1 es el rendimiento nominal del equipo existente

η_2 es el rendimiento nominal del equipo mejorado

Por tanto, suponiendo que ambos equipos presentan igual comportamiento a carga parcial, la relación entre ambos consumos vendrá dada por la ecuación siguiente:

$$\frac{C_2}{C_1} = \frac{\eta_1}{\eta_2} = \frac{1}{1 + FMr} \quad [6.7]$$

En el caso de que ambos equipos presenten comportamientos distintos a carga parcial, el factor de mejora a carga parcial, $FMcp$, queda definido a través de la siguiente expresión:

$$\frac{C_2}{C_1} = \frac{\eta_1}{\eta_2} = \frac{\eta_1}{\eta_2} \cdot (1 - FMcp) \quad [6.8]$$

Gracias a la hipótesis de que la demanda se mantiene constante al pasar de un equipo a otro se puede deducir una expresión que estima el ahorro relativo en función de los factores de mejora.

$$Ahorro = \frac{C_1 - C_2}{C_1} = \frac{FMr}{1 + FMr} \cdot (1 - FMcp) + FMcp \quad [6.9]$$

En la Figura 6.1 se representa el porcentaje de Ahorro en función del incremento relativo del rendimiento nominal del equipo (FMr) y del Factor de Mejora a Carga Parcial ($FMcp$).

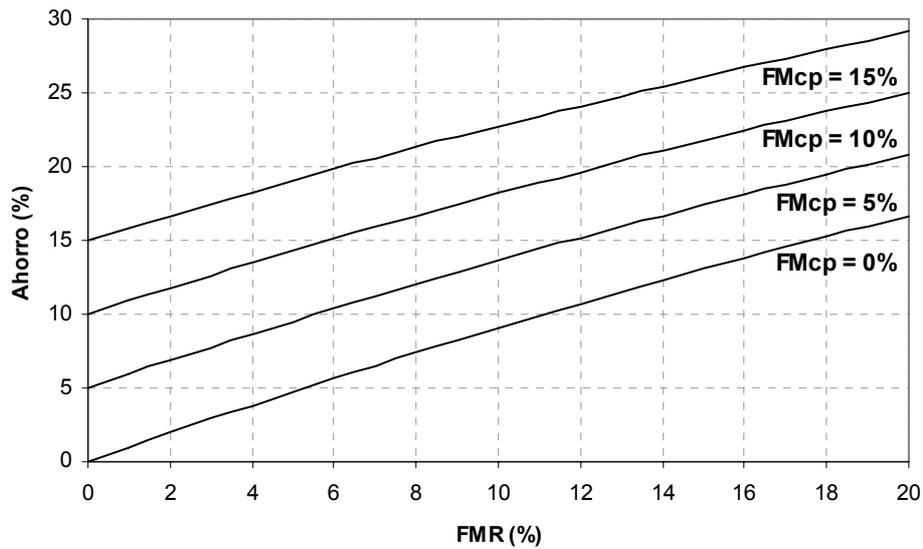


Figura 6.1: Variación del ahorro en función de la mejora del rendimiento para distintos valores de FM_{cp}

En el caso extremo de no existir incremento del rendimiento nominal del equipo podría obtenerse un porcentaje de ahorro en el consumo si el equipo mejorado presentase mejor comportamiento a carga parcial que el equipo existente (FM_{cp} distinto de cero). Por el contrario si existiese un mismo comportamiento a carga parcial de ambos equipos (FM_{cp} igual a cero) el porcentaje de ahorro se estimaría a partir de la curva inferior.

1. Obtención del Factor de Mejora del Rendimiento (FM_r)

Este factor sólo depende del rendimiento nominal del equipo existente y del equipo mejorado. Por tanto, para su obtención, sólo se requiere el conocimiento de los rendimientos de los equipos existentes susceptibles de ser mejorados y de los nuevos equipos disponibles.

Estos rendimientos dependen tanto del tipo de equipo como de la capacidad de los mismos. También influye la antigüedad del equipo, ya que el grado de deterioro sufrido por el equipo debido al uso afectará al rendimiento nominal, disminuyendo su valor respecto al que tenía cuando se instaló por primera vez. Por ello, en el caso de estimar ahorros asociados a este tipo de medidas en edificios existentes, se deberán medir los rendimientos de los equipos instalados o, en su defecto, suponer un valor típico en función de la antigüedad del equipo.

A mayor distancia entre el rendimiento de partida y el final, mayor será el factor de mejora, tal y como se muestra en la Figura 6.1.

Ejemplo 1.1. Paso de caldera de una a cuatro estrellas

Las calderas se encuentran catalogadas en función de su eficiencia energética mediante un marcado en estrellas, según del R.D. 275/1995, tal como se muestra en la Tabla 6.1. Las calderas deberán cumplir simultáneamente los requisitos expuestos para potencia nominal y a carga parcial.

Tabla 6.1. Variación del rendimiento frente a la potencia nominal según el marcado CE de calderas

Marca CE	η_{nom}	η_{30}
	($T_m = 70^\circ C$)	($T_m = 50^\circ C$)
★	$84.0 + 2.0 \cdot \log P_n$	$80.0 + 3.0 \cdot \log P_n$
★★	$87.0 + 2.0 \cdot \log P_n$	$83.0 + 3.0 \cdot \log P_n$
★★★	$90.0 + 2.0 \cdot \log P_n$	$86.0 + 3.0 \cdot \log P_n$
★★★★	$93.0 + 2.0 \cdot \log P_n$	$89.0 + 3.0 \cdot \log P_n$

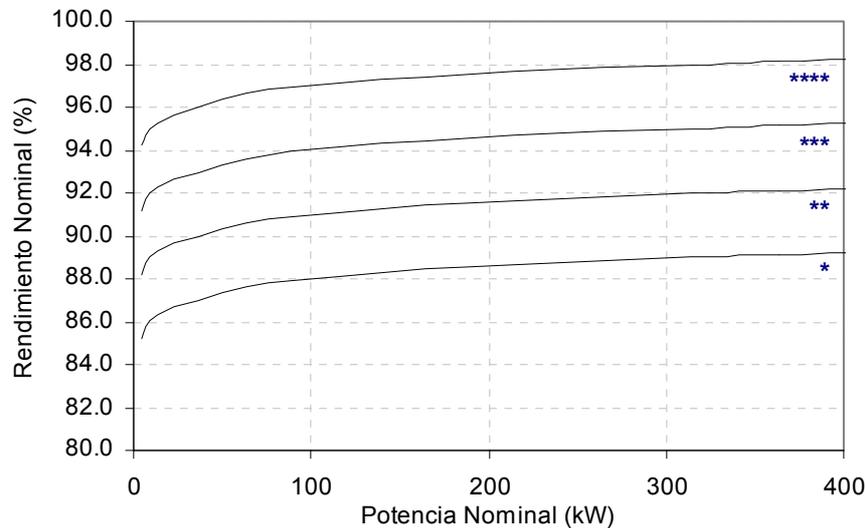


Figura 6.2: Variación del rendimiento nominal de calderas frente a la potencia nominal según marcado CE.

Según la ecuación [6.6] el factor de mejora del rendimiento (FMr) debido al paso de una caldera de una estrella a una caldera marcada con cuatro estrellas vendría dado por la ecuación [6.10]. El resultado arroja un factor que disminuye levemente con la potencia nominal y que se sitúa entorno al 10.25%.

$$FMr^{* \rightarrow ****} = \frac{\eta^{****} - \eta^*}{\eta^*} = \frac{93 - 84}{84 + 2 \cdot \log P_n} \quad [6.10]$$

Por tanto, si se sustituye una caldera de una estrella por una de cuatro estrellas se obtiene un FMr de 10.25%. El porcentaje de ahorro obtenido en este

caso vendrá dado por la ecuación [6.9], tomando un factor de mejora a carga parcial de cero. Se obtiene, de esta forma, un ahorro del 9.3%.

Ejemplo 1.2. Paso de equipo autónomo aire/aire de clase G a clase A

Según la Directiva 2002/31/EC se establece una clasificación de los equipos en función de su rendimiento, otorgándole en cada caso una determinada clase. En la Tabla 6.2 se muestra la clasificación de clases propuesta por la Directiva para equipos autónomos tipo splits y multi-splits en función de sus rendimientos.

Tabla 6.2. Clasificación por EER, en condiciones Eurovent²⁸, de equipos autónomos tipo splits y multi-splits según la Directiva 2002/31/EC.

Clase	Sistemas Splits y multi-splits
A	$3.20 < \text{EER}$
B	$3.20 \geq \text{EER} > 3.00$
C	$3.00 \geq \text{EER} > 2.80$
D	$2.880 \geq \text{EER} > 2.60$
E	$2.60 \geq \text{EER} > 2.40$
F	$2.40 \geq \text{EER} > 2.20$
G	$2.20 \geq \text{EER}$

Por tanto, según la ecuación [6.6], si se sustituye un equipo autónomo de refrigeración²⁹ con EER de 2.0 (clase G) por otro con un EER de 3.2 (clase A) se obtiene un FMr de 60%. El porcentaje de ahorro obtenido en este caso vendrá dado por la ecuación [6.9]. Y bajo la hipótesis de que el comportamiento a carga parcial de ambos equipos es el mismo, es decir, factor de mejora a carga parcial igual a cero, se obtiene un ahorro relativo del 37.5%.

2. Obtención del Factor de Mejora a Carga Parcial (FMcp)

Este factor representa la disminución en el consumo del equipo debida a la mejora del comportamiento a carga parcial.

Para obtenerlo se requiere el conocimiento del comportamiento a carga parcial del equipo. Dado que el rendimiento del equipo depende de las condiciones de operación, y variará frente al factor de carga parcial, será necesaria la curva que corrige el rendimiento nominal en función de la carga parcial. Esta curva variará en función del tipo de equipo y del tipo de control establecido para su funcionamiento.

Para caracterizar correctamente el comportamiento energético de un equipo, teniendo en cuenta las posibles variaciones de su consumo y de su capacidad

²⁸ Temperatura seca interior 27°C, Temperatura de bulbo húmedo interior 19°C, Temperatura seca exterior 35°C.

²⁹ Puede tratarse tanto de un sistema individual, es decir, un split o multisplit con evaporador en cada espacio a refrigerar, o un sistema centralizado, es decir, un solo equipo split por vivienda conectado a una pequeña red de conductos.

durante un determinado periodo de operación, será necesario realizar ensayos para distintas condiciones de operación y para distintos regímenes de carga parcial.

Algunos programas de simulación de sistemas, como el DOE-2 (LBL, 1990), calculan el consumo de los equipos para cada instante como un producto entre su valor nominal y unas funciones que tengan en cuenta las variaciones respecto a las condiciones de operación y respecto al factor de carga parcial. Estos procedimientos se basan en el “principio de separación de variables”, considerando independiente la variación debida a las condiciones de operación de la debida a la carga parcial (Juan F. Coronel y otros, 2006).

Con carácter general se puede representar la capacidad disponible de un equipo, CAP_{actual} , como un producto de su capacidad nominal y una función que la corrige en función de las condiciones de operación, como se representa en la ecuación [3.56.11]

$$CAP_{actual} = CAP_{nom} \cdot Q_1(T_1, T_2) \quad [6.11]$$

Donde:

CAP_{nom} es la capacidad del equipo en condiciones nominales

$Q_1(T_1, T_2)$ es la curva que corrige la capacidad disponible del equipo en función de las temperaturas de operación. Por ejemplo, para un equipo autónomo de frío estas pueden ser la temperatura húmeda del aire del local (T_1) y la temperatura seca del aire exterior (T_2).

De la misma forma, se puede representar el consumo de un equipo en un determinado instante, C_{actual} , como el producto del consumo en condiciones nominales, C_{nom} , por una serie de funciones que corrigen en función de las condiciones de operación y de carga parcial actuales. Ver ecuación [3.66.12]

$$C_{actual} = C_{nom} \cdot Q_1(T_1, T_2) \cdot C_1(T_1, T_2) \cdot C_2(fcp) \quad [6.12]$$

Donde:

C_{nom} es el consumo del equipo en condiciones nominales.

$C_1(T_1, T_2)$ es la curva que caracteriza la variación del consumo del equipo en función de las condiciones de operación.

$C_2(fcp)$ es la curva que caracteriza la variación del consumo a carga parcial del equipo.

fcp es el factor de carga parcial del equipo y representa la relación entre la carga actual sobre el equipo frente a la capacidad del equipo en las condiciones actuales de funcionamiento. Tal y como se representa en la ecuación siguiente:

$$fcp = \frac{Q_{actual}}{CAP_{actual}} \quad [6.13]$$

A partir de las expresiones anteriores se puede representar el consumo de un equipo a carga parcial de la siguiente forma:

$$C_{parcial} = \frac{Q_{parcial}}{\eta_{parcial}} = \frac{CAP_{parcial} \cdot fcp}{\eta_{parcial}} \quad [6.14]$$

Teniendo en cuenta que, bajo las mismas condiciones de temperatura, el rendimiento de los equipos varía en función del factor de carga parcial, se podría definir un rendimiento normalizado como la relación entre el rendimiento a carga parcial y nominal del equipo.

$$\eta^* = \frac{\eta_{parcial}}{\eta_{nom}} \quad [6.15]$$

Sustituyendo el rendimiento normalizado en la expresión [6.14], el consumo del equipo quedaría expresado de la siguiente forma:

$$C_{parcial} = \frac{CAP_{parcial} \cdot fcp}{\eta_{nom} \cdot \eta^*} = C_{nom} \cdot Q_1 \cdot \frac{fcp}{\eta^*} \quad [6.16]$$

A partir de las expresiones anteriores se podría definir un nuevo parámetro, consumo normalizado, que depende del factor de carga parcial, del rendimiento normalizado y la curva que corrige la capacidad disponible del equipo en función de las temperaturas de operación, tal y como se representa en la siguiente expresión, :

$$C^* = \frac{C_{parcial}}{C_{nom}} = \frac{fcp}{\eta^*} \cdot Q_1 \quad [6.17]$$

La determinación de la variación del rendimiento normalizado frente al factor de carga parcial requiere el ensayo de los equipos para diferentes condiciones de de carga parcial. Por ejemplo, la norma ARI (ARI, 1989), que se refiere al parámetro anterior como *part load factor (PLF)*, propone la siguiente expresión para la caracterización del rendimiento a carga parcial en equipos autónomos aire/aire:

$$PLF = \frac{EER_{parcial}}{EER_{nom}} = 1 - C_d(1 - fcp) \quad [6.18]$$

, donde C_d es el factor de degradación. Este factor representa la degradación del rendimiento de aquellos equipos de climatización que regulan su funcionamiento a carga parcial mediante ciclos de encendido y apagado, que según (Hugo Henderson y otros, 1999) dependerá del tiempo de respuesta del sistema en el encendido y la duración de cada ciclo. Por defecto se suele tomar igual a 0.25.

Otros estudios experimentales (Anglesio, 2001), que han servido de base para la elaboración de la norma italiana UNI 10963³⁰ (UNI, 2003), sugieren la existencia de una correlación lineal entre el factor C^* y el factor de carga parcial, tal y como se muestra en la ecuación [6.19]. Esto permitiría obtener el modelo matemático que representa la variación a carga parcial mediante dos medidas del consumo, una a plena carga y otra a carga parcial.

$$\eta^* = \frac{fcp}{C^*} \cdot Q_1 = \frac{fcp}{a \cdot fcp + b} \cdot Q_1 \quad [6.19]$$

El programa DOE-2 (LBL, 1990) incluye en su librería una serie de correlaciones que caracterizan el comportamiento de los equipos a carga parcial. DOE-2 es un programa de simulación de sistemas hora a hora, por ello necesita conocer el consumo de los equipos en función del factor de carga parcial. Las curvas que por defecto tiene implementadas el programa DOE-2 (LBL, 1993) estiman la variación del parámetro C^* (consumo normalizado) frente a la carga parcial mediante funciones lineales o cuadráticas.

$$\eta^* = \frac{fcp}{C^*} \cdot Q_1 = \frac{fcp}{a + b \cdot fcp + c \cdot fcp^2 + d \cdot fcp^3} \cdot Q_1 \quad [6.20]$$

³⁰ En la que se establece un procedimiento de evaluación del comportamiento a carga parcial de equipos de aire acondicionado, plantas enfriadoras y bombas de calor

En la siguiente figura se ha representado la variación tanto del rendimiento normalizado, η^* , como del consumo normalizado, C^* , de una caldera convencional. El procedimiento de obtención de estas curvas, y de las que se utilizarán en los ejemplos posteriores, queda descrito en el anexo C de la tesis. Se puede observar cómo en un equipo real el rendimiento disminuye con respecto al nominal a medida que baja el factor de carga parcial.

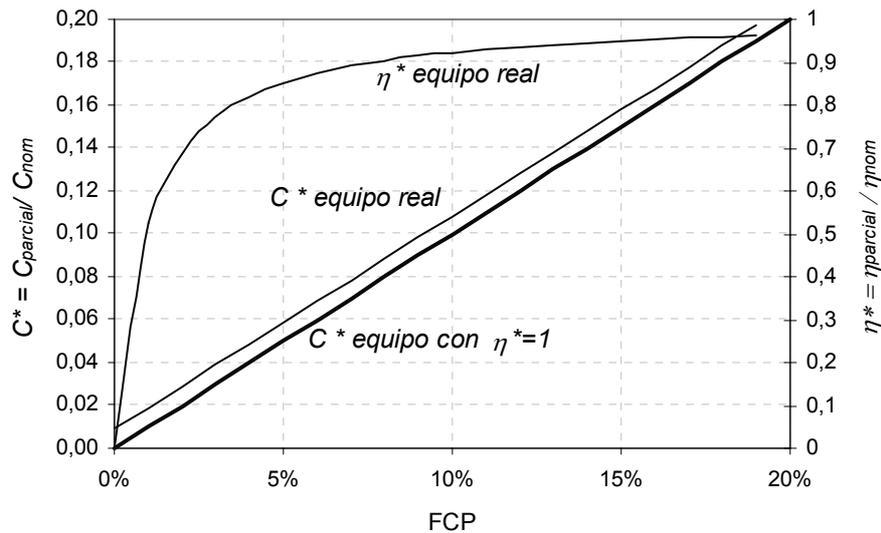


Figura 6.3 Variación de los parámetros η^* y C^* con el factor de carga parcial (fcp).

Para la obtención del FMcp será necesario disponer de la variación del parámetro C^* frente al factor de carga parcial, ya sea mediante una curva continua, o mediante valores medios para distintos rangos de carga parcial, tal y como se muestra en la Figura 6.4.

También se necesita caracterizar la variación del grado de carga parcial sobre el equipo. Para ello se propone representar, mediante un histograma de frecuencias, el porcentaje de horas del equipo trabajando dentro de cada rango de carga parcial. Tal y como se representa en la Figura 6.5, se definen un total de once clases, y en clase el factor de carga parcial varía entre los siguientes límites: 0-10%; 10-20%; 20-30%; 30-40%; 40-50%; 50-60%; 60-70%; 70-80%; 80-90%; 90-100% y >100%.

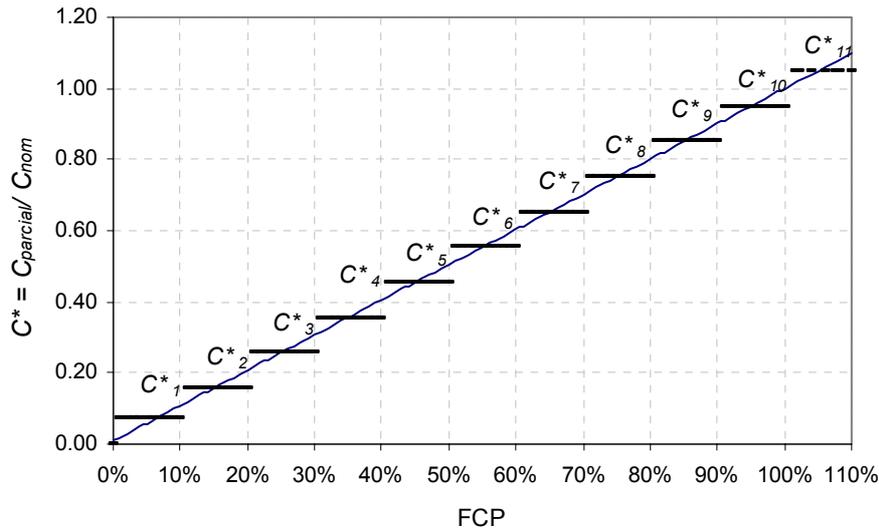


Figura 6.4 Ejemplo de curva de variación del parámetro C^* con el factor de carga parcial y valores medios, C^*_i , para cada rango de carga parcial.

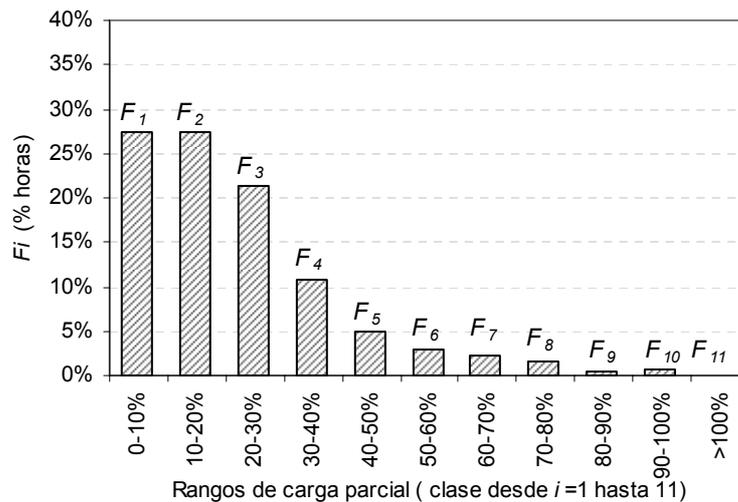


Figura 6.5 Ejemplo de frecuencias de operación de un equipo para diferentes rangos de carga parcial.

Esta distribución de frecuencias es difícil de obtener ya que depende de muchos factores a la vez como son: el tipo de sistema al que pertenece el equipo, el tipo de edificio (epidermis, cargas internas, geometría,...), el clima y las condiciones de operación. La obtención de este histograma de frecuencias requiere la simulación del conjunto formado por el edificio y el sistema.

Para la obtención de la distribución de frecuencias representada en la Figura 6.5, y de otras empleadas en los ejemplos posteriores, se han simulado mediante el programa DOE-2.2 dos edificios: una vivienda unifamiliar adosada y un bloque de

viviendas. En el anexo D se describen detalladamente las características de estos edificios.

Se propone la simulación de distintas tipologías de edificios, situados en distintos climas, y con varias condiciones de operación para obtener una muestra representativa de las distribuciones de frecuencias asociadas los diversos equipos empleados en el sector residencial.

Suponiendo que se dispone de las curvas de variación del parámetro C^* correspondiente al equipo existente y al mejorado, y de la distribución de frecuencias que caracteriza la variación del factor de carga parcial del equipo se estima el Factor de Mejora a carga parcial (FMcp). Este constituirá un factor de mejora al pasar del equipo existente (1) al equipo mejorado (2), y se calcula a través de la suma de los consumos normalizados ponderada en función de la frecuencia del equipo dentro de cada rango de carga parcial. Para ello se emplea la siguiente expresión:

$$FMcp_{1 \rightarrow 2} = \frac{\sum_i F_i \cdot C_{i,1}^* - \sum_i F_i \cdot C_{i,2}^*}{\sum_i F_i \cdot C_{i,1}^*} \quad [6.21]$$

Siendo:

$C_{i,1}^*$: Valor medio de la curva de variación del consumo normalizado a carga parcial, para la clase "i" y para el equipo existente.

$C_{i,2}^*$: Valor medio de la curva de variación del consumo normalizado a carga parcial, para la clase "i" y para el equipo mejorado.

F_i : Fracción de horas en las que el equipo se encuentra trabajando dentro de la clase "i"

Ejemplo 2.1. Paso de caldera convencional a caldera de condensación

El R.D. 275/1995 establece los requisitos mínimos de rendimiento térmico para calderas nuevas de agua caliente alimentadas con combustibles líquidos o gaseosos, para potencias comprendidas entre 4 y 400 kW. En la Tabla 6.3 se resumen dichas exigencias, en función del tipo de caldera, que como se observa es independiente del tipo de combustible y aumenta con la potencia de la caldera.

Tabla 6.3. Rendimientos mínimos de calderas según R.D. 275/1995

Tipo de Caldera	Potencias (kW)	Rendimiento Nominal		Rendimiento al 30%	
		$T_m(^{\circ}\text{C})$ ³¹	η_{nom}	$T_m(^{\circ}\text{C})$	η_{30}
Estándar	4 a 400	70	$84.0 + 2.0 \cdot \log P_n$	50	$80.0 + 3.0 \cdot \log P_n$
Baja Temperatura	4 a 400	70	$87.5 + 1.5 \cdot \log P_n$	40	$87.5 + 1.5 \cdot \log P_n$
Condensación	4 a 400	70	$91.0 + 1.0 \cdot \log P_n$	30 ³²	$97.0 + 1.0 \cdot \log P_n$

Por tanto, según la ecuación [6.6], si se sustituye una caldera convencional, con rendimiento de 87%, por una caldera de condensación, con un rendimiento del 92%, se obtiene un FMr de 5.74%.

Para evaluar el Factor de Mejora a Carga Parcial al pasar de una caldera convencional a una caldera de condensación, se requiere conocer tanto la curva que represente el comportamiento de ambas calderas a carga parcial, como el grado de carga parcial al que se someten en el edificio.

Tal y como se explica en el anexo C, las curvas que caracterizan la variación del comportamiento a carga parcial de ambos tipos de calderas se puede representar mediante las curvas de la Figura 6.7.

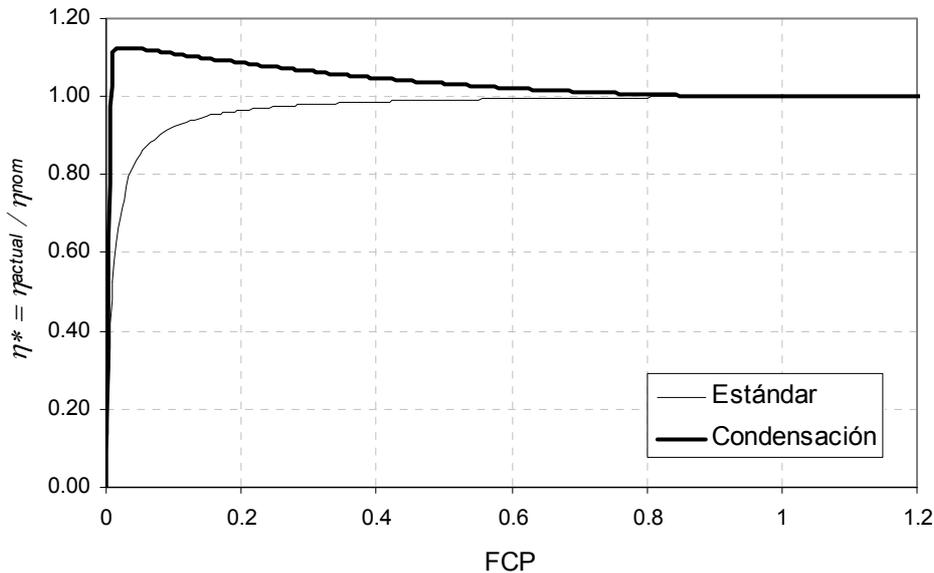


Figura 6.6: Curvas de comportamiento a carga parcial obtenidas partir de las exigencias del RD.

A partir de estas curvas se obtienen los valores medios del consumo normalizado, C^* , para cada clase o rango de carga parcial, tal y como se muestra en la tabla siguiente.

³¹ Temperatura media de la caldera.

³² Temperatura de entrada a la caldera.

Tabla 6.4. Valores medios del C^* para calderas estándar y de condensación.

Clase	Rango de carga parcial	C^*_i Estándar	C^*_i Condensación
1	0-10%	0,07	0,06
2	10-20%	0,16	0,14
3	20-30%	0,26	0,23
4	30-40%	0,36	0,33
5	40-50%	0,46	0,43
6	50-60%	0,56	0,54
7	60-70%	0,66	0,64
8	70-80%	0,76	0,74
9	80-90%	0,86	0,85
10	90-100%	0,95	0,95
11	>100%	1,23	1,25

A continuación se determinará, mediante estimación o mediante simulación, el número de horas de funcionamiento de la caldera (se supone que será igual para ambos tipos de caldera) dentro de cada rango de carga parcial. Es decir, se trata de obtener la frecuencia observada para cada rango de carga.

De los casos descritos en el Anexo D, vivienda adosada y en bloque para Sevilla, y simulados con el programa DOE-2.2, se obtienen las distribuciones de frecuencias para la caldera representadas en la Figura 6.7.

Sustituyendo en la expresión [6.21] se obtiene un Factor de Mejora a Carga Parcial para la vivienda adosada en Sevilla del 8.44%, y para la vivienda en bloque en Sevilla del 8.21%.

Tabla 6.5. Porcentajes de ahorro estimados para sustitución de caldera estándar por caldera de condensación. Para viviendas en Sevilla.

Tipo	FMr (%)	FMcp (%)	Ahorro (%)
Adosada	5.74	9.36	14.29
Bloque	5.74	9.02	13.97

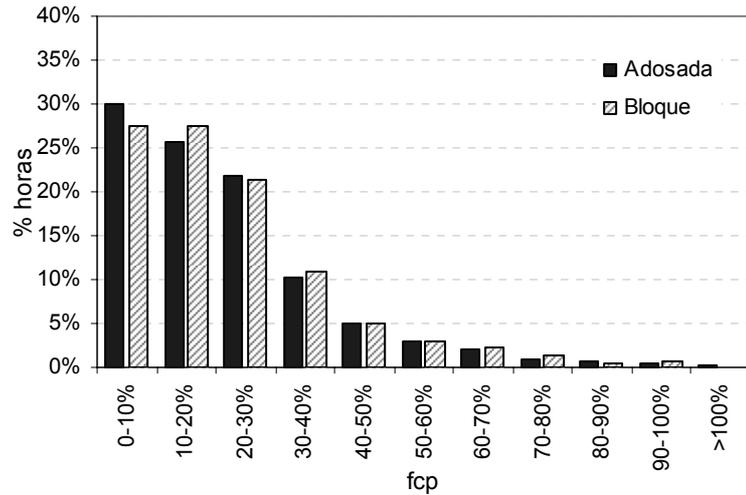


Figura 6.7: Frecuencia observada de caldera dentro de cada rango de carga parcial. Resultados de la simulación de modelos de edificios residenciales en Sevilla.

Ejemplo 2.2. Paso de autónomo aire/aire convencional (control on-off) a inverter (control modulante)

Suponiendo, en este caso, que el EER de ambos equipos, el existente y el mejorado, es el mismo, el Factor de Mejora del rendimiento será igual a cero.

Para evaluar el Factor de Mejora a Carga Parcial al pasar de un control on-off a un control modulante se requiere conocer tanto la curva que represente el comportamiento de ambos equipos a carga parcial, como el grado de carga parcial al que se someten en el edificio.

Las curvas empleadas para caracterizar el comportamiento a carga parcial de ambos equipos proceden de la literatura (Henderson, 1999) y (Anglesio, 2001), y se explican con detalle en el anexo C. Aparecen representadas en la Figura 6.8, en la página siguiente.

A partir de estas curvas se obtienen los valores medios del consumo normalizado, C^* , para cada clase o rango de carga parcial, tal y como se muestra en la Tabla 6.6 de la página siguiente.

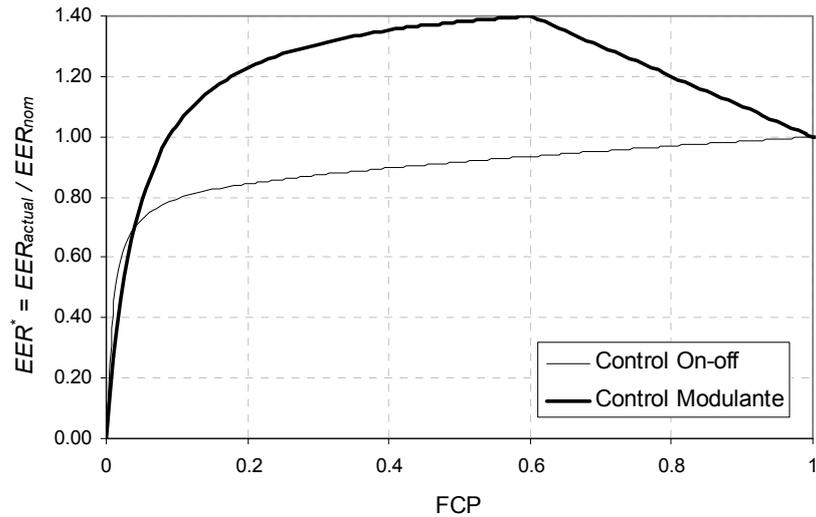


Figura 6.8: Curvas de comportamiento a carga parcial para equipos autónomos con control típico on-off y control modulante (inverter).

Tabla 6.6. Valores medios del C^* para equipos autónomos con control típico on-off y control modulante (inverter).

Clase	Rango de carga parcial	C^*_i On-off	C^*_i Modulante
1	0-10%	0.10	0.09
2	10-20%	0.18	0.13
3	20-30%	0.29	0.20
4	30-40%	0.40	0.26
5	40-50%	0.50	0.33
6	50-60%	0.59	0.40
7	60-70%	0.69	0.48
8	70-80%	0.78	0.60
9	80-90%	0.87	0.74
10	90-100%	0.96	0.91
11	>100%	1.04	1.11

De los casos descritos en el anexo b, vivienda adosada y en bloque para Sevilla, y simulados con el programa DOE-2.2, se obtienen las distribuciones de frecuencias para la caldera representadas en la Figura 6.9.

Sustituyendo en la expresión [6.21] y en la [6.9] se obtienen el Factor de Mejora a Carga Parcial y el ahorro porcentual para cada caso. Los resultados se encuentran resumidos en la Tabla 6.7.

Tabla 6.7. Porcentajes de ahorro estimados por sustitución de autónomo convencional por inverter. Para viviendas en Sevilla.

Tipo	FMr (%)	FMcp (%)	Ahorro (%)
Adosada	0	25.15	25.15
Bloque	0	25.72	25.72

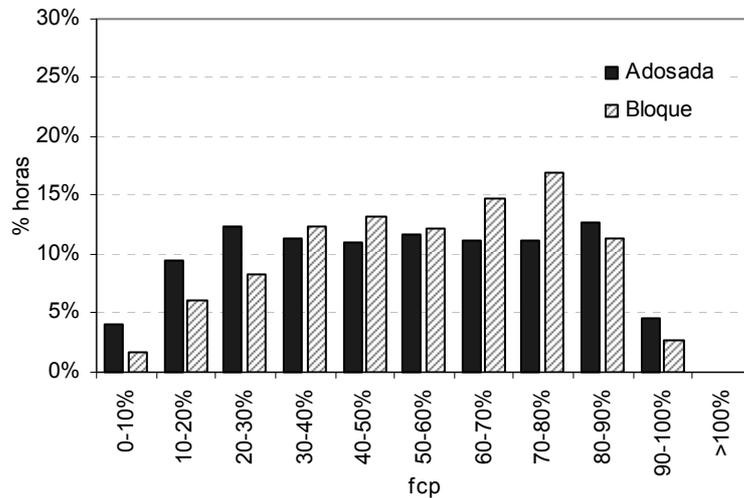


Figura 6.9: Frecuencia observada del autónomo en régimen de refrigeración dentro de cada rango de carga parcial. Resultados de la simulación de modelos de edificios residenciales en Sevilla.

3. Obtención de la mejora debida a la revisión de la capacidad de equipos

En muchas ocasiones los equipos de climatización se instalan con capacidades sobreestimadas con respecto a los requerimientos del edificio, se dice en estos casos que el equipo se encuentra sobredimensionado.

Sobredimensionar por encima del 50% es una práctica habitual, resultando una operación ineficiente del equipo y posibles problemas de funcionamiento, como por ejemplo fallo en los compresores de los sistemas de refrigeración (Rick Karg y otros, Julio de 2000). De hecho, según determinados estudios (Henderson, H.I., 1992), una sobreestimación del 50% de la capacidad en sistemas autónomos de frío puede incrementar su consumo hasta un 9%, lo que indica la importancia de un correcto dimensionado como medida de ahorro energético.

Para evaluar el potencial de ahorro asociado a la adecuación de la capacidad del equipo, se necesita caracterizar la variación del grado de carga parcial al queda sometido el equipo. En este caso la curva de comportamiento a carga parcial del equipo no cambia del equipo existente al mejorado, ya que se trata del mismo equipo pero con capacidades diferentes.

En este caso se estima el Factor de Mejora a carga parcial (FMcp), para el paso del equipo sobredimensionado (1) al equipo con capacidad adecuada (2), a través de la ecuación [6.22].

$$FMcp_{1 \rightarrow 2} = \frac{\sum_i F_{i,1} \cdot C_i^* - \frac{1}{(1+S)} \cdot \sum_i F_{i,2} \cdot C_i^*}{\sum_i F_{i,1} \cdot C_i^*} \quad [6.22]$$

Siendo:

C_i^* : Valor medio de la curva de variación del consumo normalizado a carga parcial para la clase "i".

$F_{i,1}$: Fracción de horas en las que el equipo se encuentra trabajando dentro de la clase "i", con capacidad sobreestimada.

$F_{i,2}$: Fracción de horas en las que el equipo se encuentra trabajando dentro de la clase "i", con capacidad adecuada.

S : Grado de sobreestimación de la capacidad del equipo.

Ejemplo 3.1. Adecuación de la capacidad de equipos en vivienda adosada (caldera convencional y autónomo con control on-off)

Para determinar el ahorro debido a la adecuación de la capacidad de los equipos correspondientes a una vivienda adosada situada en Sevilla, se determinará, mediante simulación, la frecuencia de funcionamiento de cada uno de ellos dentro de cada rango de carga parcial para distintos grados de funcionamiento.

Del caso descrito en el anexo D, vivienda adosada para Sevilla, y simulados con el programa DOE-2.2, se obtienen las distribuciones de frecuencias para la caldera y para equipo autónomo de frío. En la Figura 6.10 y en la Figura 6.11 se encuentran representadas las distribuciones de frecuencias para un dimensionado correcto y una sobreestimación de la capacidad del 30%. Se puede observar como al incrementarse el grado de sobreestimación la distribución de frecuencias se desplaza hacia las zonas de menos carga, por lo que el equipo trabajará más horas dentro de rangos bajos de carga parcial.

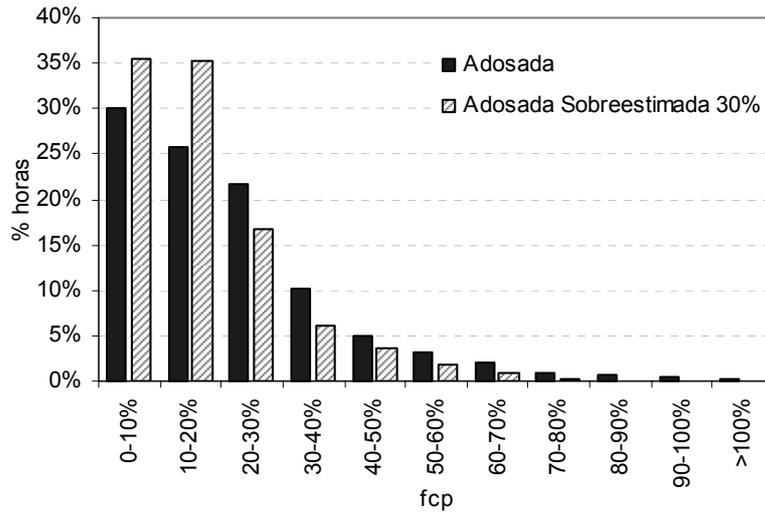


Figura 6.10: Frecuencia observada de caldera dentro de cada rango de carga parcial. Para caldera de capacidad correcta y de capacidad sobreestimada.

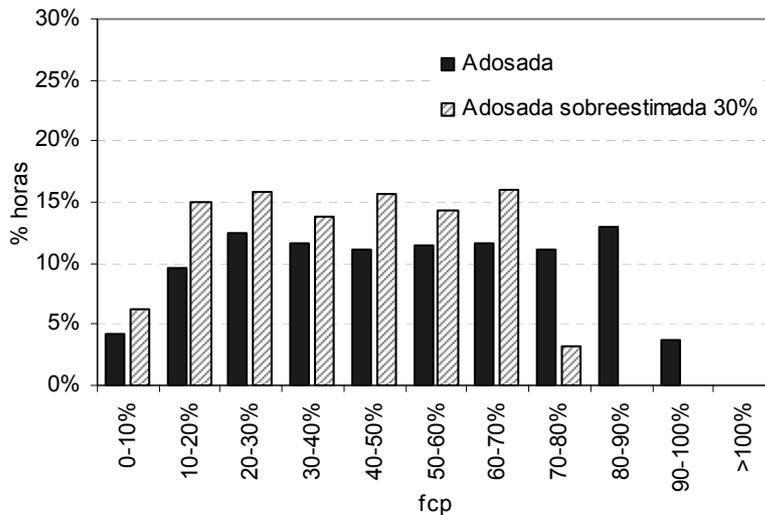


Figura 6.11: Frecuencia observada del autónomo en régimen de refrigeración dentro de cada rango de carga parcial. Para autónomo de capacidad correcta y de capacidad sobreestimada.

Sustituyendo en la expresión [6.22] y en la [6.9] se obtienen el Factor de Mejora a Carga Parcial y el ahorro porcentual para cada caso. Los resultados se encuentran representados en la Figura 6.12. Para valores de sobreestimación del 50% se pueden prever ahorros del 7% para la caldera y del 4% para el equipo autónomo.

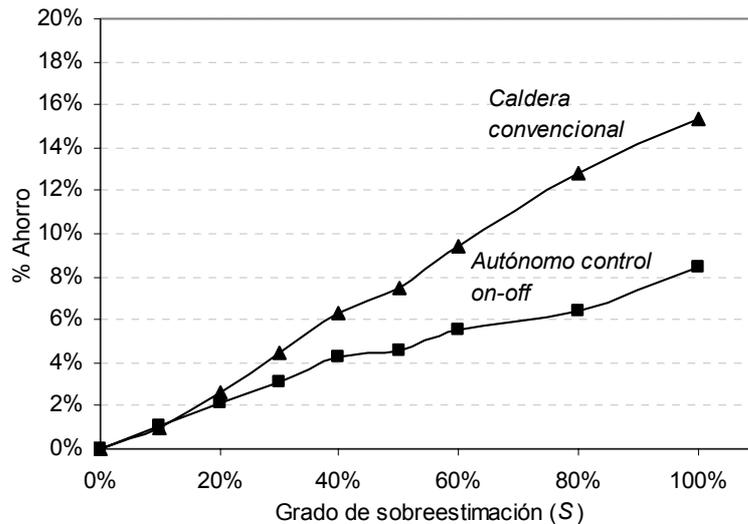


Figura 6.12: Variación del ahorro porcentual frente al grado de sobreestimación de caldera (curva superior) y equipo autónomo (curva inferior). En vivienda adosada en Sevilla

6.3.2 Estimación de potenciales de ahorro por mejora del aislamiento

Esta metodología permitirá estimar rangos de potenciales de ahorros asociados a la mejora del aislamiento térmico del edificio.

Para ello se propone la obtención de leyes o correlaciones empíricas, basadas en simulaciones previas, que permitan determinar el ahorro en demanda de calefacción al aumentar el nivel de aislamiento de un determinado componente³³. Este ahorro dependerá también de otros factores como son el clima, la orientación, el tipo de edificio y las condiciones operacionales. Por lo que sería conveniente disponer de una base de datos extensa para realizar análisis de sensibilidad a estos factores.

Los resultados expuestos a continuación se basan en los resultados del trabajo desarrollado por el grupo de Termotecnia en diciembre de 2006 (AICIA, 2006). En este se procede a la simulación de 26880 casos mediante el motor de cálculo de LIDER, Limitación de la Demanda Energética, Documento Reconocido del Código Técnico de la Edificación (Ministerio de la Vivienda, 2006). Para la definición de los casos se tuvieron en cuenta variaciones del clima, del tipo de edificio, de la orientación y del nivel de aislamiento de cada uno de sus componentes.

³³ Muros, suelos, cubiertas y ventanas.

En la Figura 6.13 se puede observar un ejemplo de los resultados de las simulaciones. En esta se han representado, mediante curvas de frecuencia para cada orientación, la distribución del ahorro en demanda de calefacción obtenido para un clima como Sevilla, y para un incremento del nivel de aislamiento en muros exteriores determinado.

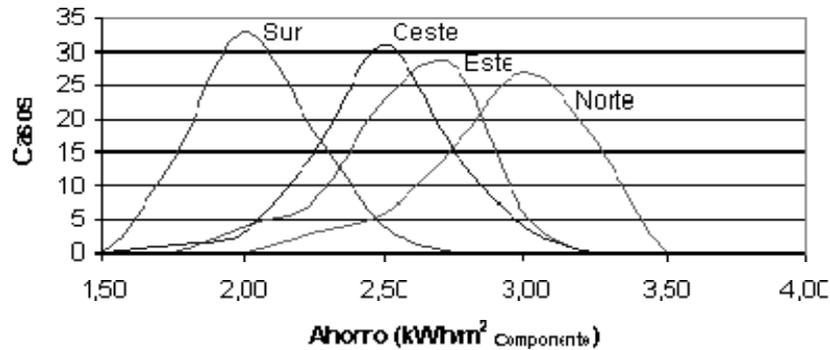


Figura 6.13: Distribuciones de ahorros en demanda de calefacción para cada orientación, en Sevilla y para un aumento del nivel de aislamiento en muros exteriores $\Delta U=0.12 \text{ W/m}^2\text{K}$.

De cada una de las distribuciones obtenidas a partir de los casos simulados se ha tomado el percentil 10 %, la media y el percentil 90 %, tal y como se muestra en la Tabla 6.8. Se observa que al dividir el ahorro por la reducción de la transmitancia térmica, ΔU , se obtiene un ratio independiente de la variación del nivel de aislamiento (ver Tabla 6.9), pero dependiente del clima y de la orientación.

Tabla 6.8. Parámetros representativos de la distribución de ahorros en demanda de calefacción, para Sevilla.

$kWh/m^2_{Componente}$		Percentil 10 %	Media	Percentil 90 %
$\Delta U = 0.09 \text{ W/m}^2\text{K}$	Norte	1.89	2.19	2.39
	Este	1.69	1.91	2.09
	Sur	1.29	1.49	1.70
	Oeste	1.65	1.84	2.07
$\Delta U = 0.12 \text{ W/m}^2\text{K}$	Norte	2.52	2.90	3.15
	Este	2.25	2.53	2.77
	Sur	1.73	1.98	2.25
	Oeste	2.20	2.45	2.73
$\Delta U = 0.21 \text{ W/m}^2\text{K}$	Norte	4.40	5.09	5.54
	Este	3.94	4.43	4.86
	Sur	3.02	3.47	3.95
	Oeste	3.85	4.29	4.79

Tabla 6.9. Ahorros Ratio ahorro de demanda de calefacción / reducción de transmitancia térmica

$\frac{kWh/m^2_{Componente}}{W/m^2K}$		$\frac{Percentil\ 10\ \%}{\Delta U}$	$\frac{Media}{\Delta U}$	$\frac{Percentil\ 90\ \%}{\Delta U}$
$\Delta U = 0.09\ W/m^2K$	Norte	21.00	24.33	26.56
	Este	18.78	21.22	23.22
	Sur	14.33	16.56	18.89
	Oeste	18.33	20.44	23.00
$\Delta U = 0.12\ W/m^2K$	Norte	21.00	24.17	26.25
	Este	18.75	21.08	23.08
	Sur	14.42	16.50	18.75
	Oeste	18.33	20.42	22.75
$\Delta U = 0.21\ W/m^2K$	Norte	20.95	24.24	26.38
	Este	18.76	21.10	23.14
	Sur	14.38	16.52	18.81
	Oeste	18.33	20.43	22.81

Los resultados obtenidos permitieron obtener correlaciones para evaluar la influencia de los diferentes valores de transmitancia térmica sobre la demanda de calefacción del edificio, tal y como se mostrará en los siguientes apartados.

1. Obtención del ahorro en demanda de calefacción frente a variaciones del nivel de aislamiento

A partir de los casos analizados se concluye que el ratio entre ahorro de la demanda de calefacción y nivel de aislamiento, presenta una dependencia del clima y de la orientación, tal y como se muestra en la ecuación [6.23].

$$\frac{\Delta D}{A \cdot \Delta U} = f(\text{Clima}, \text{Orientación}) \quad [6.23]$$

Siendo:

ΔD : Ahorro de demanda de calefacción (kWh)

ΔU : Incremento del nivel de aislamiento ($W/m^2\ K$)

A: área del elemento (m^2)

Las variables independientes, clima y orientación, pueden ser representadas por la excitación externa (temperatura y radiación), ya que la radiación solar sobre superficie vertical incluye el efecto de la orientación.

De esta manera, la excitación externa de un elemento de un componente del edificio puede expresarse según la ecuación siguiente:

$$q = A \cdot h_{CR} \cdot (T_{SA} - T_{SE}) \quad [6.24]$$

Siendo:

A: área del elemento.

h_{CR} : coeficiente convectivo-radiante definido como la suma del coeficiente convectivo y del coeficiente radiante.

T_{SA} : temperatura sol-aire, definida según ecuación [6.25]

T_{SE} : temperatura de la superficie externa

$$T_{SA} = \frac{\alpha \cdot I}{h_{CR}} + T_{eq} \quad [6.25]$$

Siendo:

α : absorptividad³⁴.

I: radiación solar global incidente sobre el elemento³⁵.

T_{eq} : temperatura equivalente, calculada según la ecuación [6.26]

$$T_{EQ} = \frac{h_C \cdot T_A + h_R \cdot T_R}{h_C + h_R} \quad [6.26]$$

Siendo:

T_A : Temperatura de aire.

T_R : Temperatura radiante.

h_C y h_R : Coeficiente convectivo y radiante.

La temperatura sol-aire, definida en la ecuación [6.25], puede ser usada para obtener los Grados Días Modificados (GDM), cuyo cálculo es similar a los

³⁴ Se toma 0.70 en elementos opacos y 0.10 en elementos transparentes.

³⁵ Sobre muros y ventanas es la suma de la radiación solar directa sobre superficie vertical, radiación solar difusa y radiación solar reflejada. Sobre cubiertas es la suma de la radiación solar sobre superficie horizontal y radiación solar difusa. Sobre suelos es nula.

conocidos Grados Días de calefacción (GDC) pero reemplazando la temperatura de aire por la temperatura sol-aire.

Los grados día modificados (GDM) se calculan en base 20°C para los meses de enero, febrero, marzo, abril, mayo, octubre, noviembre y diciembre. Este parámetro incluye más información que los tradicionales grados día ya que la orientación, la radiación exterior y la temperatura radiante media es tenida en cuenta.

Se demuestra que la correlación que mejor se ajusta a la dependencia funcional anterior expresada en la ecuación [6.23] es de tipo lineal y se expresa según la ecuación siguiente:

$$\frac{\Delta D}{A \cdot \Delta U} = a \cdot GDM \quad [6.27]$$

Donde:

GDM: Grados Días Modificados (GDM).

a: Constante de proporcionalidad, cuyos valores son los que aparecen en la Tabla 6.10.

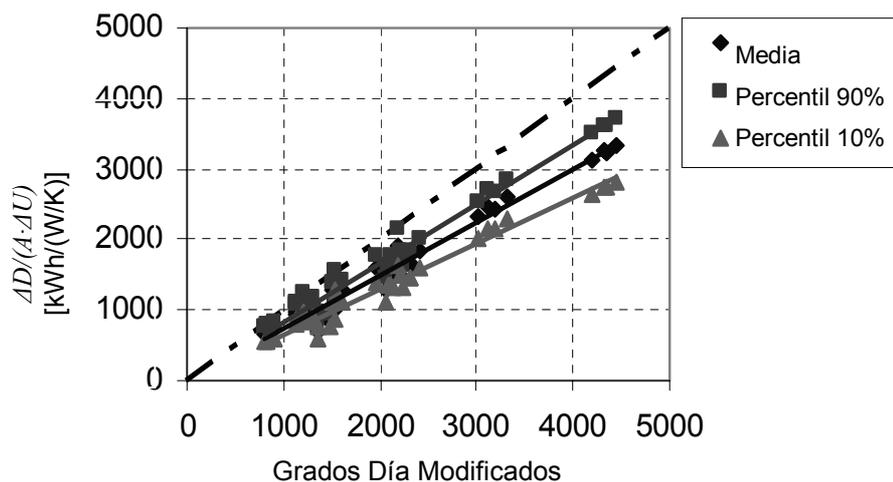


Figura 6.14: Correlaciones para la estimación del ahorro en demanda de calefacción debido a mejora de aislamiento en muros exteriores, cubiertas, suelos y ventanas.

Tabla 6.10. Constantes de proporcionalidad para correlaciones de estimación del ahorro en demanda de calefacción debido a la mejora del aislamiento en muros exteriores, cubiertas, suelos y ventanas.

	a (kWh/(W/K × GD))
Percentil 90 %	0.835
Media	0.754
Percentil 10 %	0.651

Este procedimiento permite tener acotado el ahorro de demanda de calefacción ya que la constante de proporcionalidad, a , nunca alcanza el valor 1.

Ejemplo 1.1. Mejora del nivel de aislamiento en muro exterior y ventana con orientación norte

Se desea obtener el margen de ahorro potencial, en términos de demanda de calefacción por superficie de componente modificada, debido a una mejora del nivel de aislamiento en un muro y una ventana con orientación norte de una vivienda situada en Sevilla. Para ello se parte de los datos relativos a los grados día modificados para esta localidad, que se encuentran representados en la siguiente tabla.

Tabla 6.11. Grados Día Modificados en Sevilla

GDM	Orientación							
	S	E	O	N	SE	NE	SO	NO
Muros	1056	1081	1178	1219	1049	1191	1135	1207
Cubiertas	1080							
Suelos	1165							
Ventanas	1259	1295	1303	1322	1269	1318	1280	1319

Se considera un incremento del nivel de aislamiento, ΔU , de 0.12 W/m²K en el muro exterior y de 2 W/m²K en las ventanas. Empleando la ecuación [6.27], se obtiene el ahorro en demanda de calefacción por área de componente que se muestra en la Tabla 6.12.

Tabla 6.12. Ahorros en demanda de calefacción [kWh/m²_{componente}] debidos a incremento del nivel de aislamiento en muros y ventanas al norte en Sevilla

Componente-Orientación	ΔU [W/m ² K]	Percentil 10%	Media	Percentil 90%
Muro- Norte	0.12	2.52	2.90	3.15
Ventana-Norte	2	29.19	35.36	39.77

2. Obtención del ahorro en demanda de calefacción frente a variaciones del factor solar en ventanas

Tras el estudio de los casos simulados la dependencia funcional para la estimación del ahorro debido a la radiación global en ventanas se establece mediante la ecuación [6.28].

$$\frac{\Delta D}{A \cdot \Delta g} = f(C \text{ lim } a, \text{Orientación}) \quad [6.28]$$

Siendo:

ΔD : Ahorro de demanda de calefacción (kWh).

Δg : Incremento del factor solar (Adimensional).

A: Área del elemento (m²).

Se demuestra que la curva que mejor se ajusta a la dependencia funcional anterior (ver) es de tipo lineal y se expresa por medio de la ecuación siguiente:

$$\frac{\Delta D}{A \cdot \Delta g} = a \cdot RG \quad [6.29]$$

Donde:

RG: Radiación global (kWh/m²).

a: Constante de proporcionalidad cuyos valores son los que aparecen en la

Tabla 6.13. Constantes de proporcionalidad para correlaciones de estimación del ahorro en demanda de calefacción debido al incremento del factor solar en ventanas.

	a (Adimensional)
Percentil 90 %	0.705
Media	0.536
Percentil 10 %	0.355

Ejemplo 2.1. Mejora del factor solar en ventanas con orientación sur

Se desea obtener el margen de ahorro potencial, en términos de demanda de calefacción por superficie de componente modificada, debido a una mejora del factor solar de las ventanas con orientación sur de una vivienda situada en Sevilla. Para ello se parte de los datos relativos a la radiación global incidente para esta localidad, que se encuentran representados en la siguiente tabla.

Tabla 6.14. Radiación global solar incidente en Sevilla.

kWh/m ²	Orientación							
	S	E	O	N	SE	NE	SO	NO
Ventanas	567	291	287	132	465	156	461	154

Se parte de unas ventanas con un nivel de aislamiento, U, de 3 W/m²K. Y se considera un incremento del factor solar en ventanas de 0.5. Empleando la ecuación [6.29] se obtiene el ahorro en demanda de calefacción por área de componente que se muestra en la Tabla 6.15.

Tabla 6.15. Ahorros en demanda de calefacción [kWh/m²_{componente}] debidos a incremento del factor solar en ventanas al sur en Sevilla.

orientación	Percentil 10%	Media	Percentil 90%
Norte	14.27	20.94	25.88

3. Obtención del ahorro en consumo de calefacción frente a variaciones del nivel de aislamiento

No hay que olvidar que una modificación de los componentes va a repercutir en el sistema, ya que, a pesar de que se produzca una disminución de la demanda, habría que cuantificar el grado de sobredimensionamiento, que afectará al comportamiento a carga parcial. Por ello se propone realizar un estudio similar al anterior pero con el objetivo de cuantificar el ahorro en carga punta, debido a la modificación en el grado de aislamiento del edificio. De esta forma se podría estimar el margen de variación del grado de sobredimensionamiento del equipo, y se podría modificar, consecuentemente, el consumo final del edificio, en función del nuevo estado de carga parcial sobre el equipo.

Para estimar la variación del consumo se propone emplear el procedimiento descrito en el apartado 6.3 de la tesis, concretamente al caso explicado en la página 162.

Según se ha descrito en los apartados anteriores, se puede estimar al ahorro en demanda debido a la mejora del nivel de aislamiento del edificio.

Pero debido a esta actuación sobre el edificio, la capacidad de los equipos queda sobreestimada en un determinado porcentaje S , que debería ser también determinado. Debido a ello, a pesar de que se trata del mismo equipo, con el mismo rendimiento nominal tanto en la situación inicial como en la mejorada, las condiciones de carga parcial se habrán modificado, dado que la capacidad del equipo en la situación mejorada quedará sobreestimada. Por tanto el rendimiento medio estacional del equipo variará de acuerdo con el nuevo grado de carga parcial, y esta variación se podrá estimar mediante la ecuación [6.8], que, teniendo en cuenta la igualdad de rendimientos nominales entre ambas situaciones quedará de la siguiente forma:

$$\frac{\overline{\eta_1}}{\eta_2} = (1 - FMcp) \quad [6.30]$$

Para la determinación del Factor de Mejora Carga Parcial, y suponiendo que el equipo en las condiciones de partida poseía una capacidad adecuada, se emplea la ecuación [6.31]. Esta ecuación arrojará resultados negativos, tal y como se ilustra en la Figura 6.15, debido a que la carga sobre el equipo se encuentra más parcializada en la situación final.

$$FMcp_{1 \rightarrow 2} = \frac{\sum_i F_{i,1} \cdot C_i^* - (1 + S) \cdot \sum_i F_{i,2} \cdot C_i^*}{\sum_i F_{i,1} \cdot C_i^*} \quad [6.31]$$

Siendo:

C_i^* : Valor medio de la curva de variación del consumo normalizado a carga parcial para la clase "i".

$F_{i,1}$: Fracción de horas en las que el equipo se encuentra trabajando dentro de la clase "i", con capacidad sobreestimada.

$F_{i,2}$: Fracción de horas en las que el equipo se encuentra trabajando dentro de la clase "i", con capacidad adecuada.

S : Grado de sobreestimación de la capacidad del equipo.

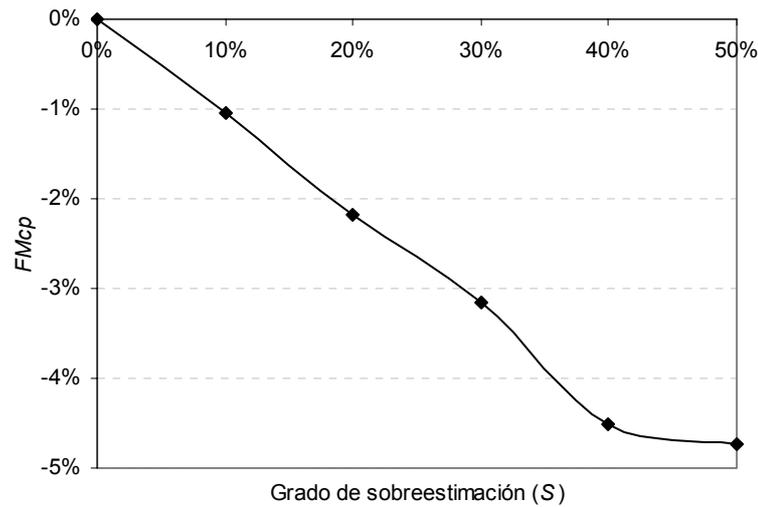


Figura 6.15: Factor de Mejora a Carga Parcial frente al grado de sobredimensionamiento debido a mejora del nivel de aislamiento del edificio

Sólo en el caso en el que no se produzca una sobreestimación de la capacidad del equipo tras actuar sobre el nivel de aislamiento se obtendría un Factor de Mejora a Carga Parcial nulo.

A continuación se va a evaluar como se compensarían ambos efectos: disminución de la demanda y parcialización de la carga. Para ello se define el Factor de Mejora de la Demanda (FM_d) como el ahorro relativo en demanda sobre el equipo, ver ecuación [6.32].

A continuación se puede deducir una expresión que estima el ahorro relativo en función de los factores de mejora, según la ecuación [6.33].

$$FM_d = \frac{D_1 - D_2}{D_1} \quad [6.32]$$

$$Ahorro = \frac{C_1 - C_2}{C_1} = FM_d \cdot (1 - FM_{cp}) + FM_{cp} \quad [6.33]$$

En la Figura 6.16 se representa el porcentaje de Ahorro en función del ahorro relativo en demanda (FM_d) y del Factor de Mejora a Carga Parcial (FM_{cp}).

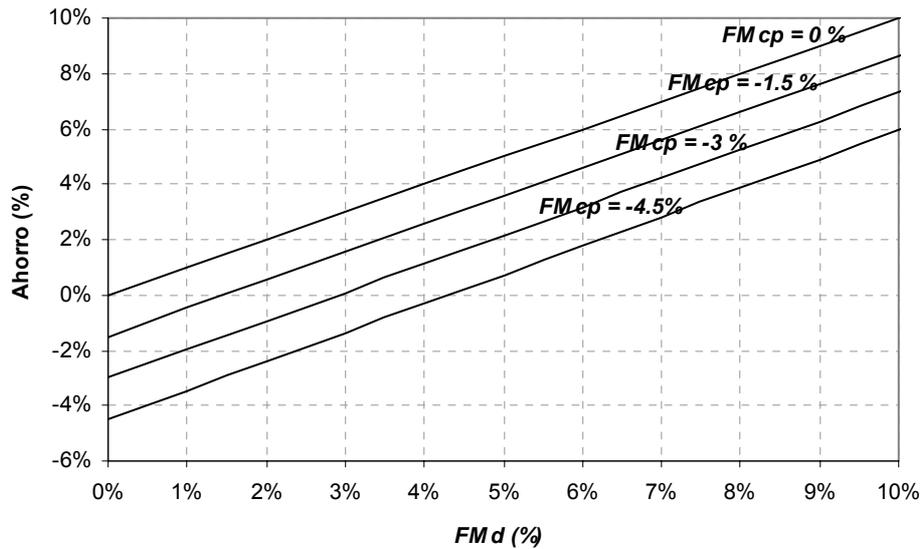


Figura 6.16: Variación del ahorro en función del ahorro relativo en demanda (FM_d) para distintos valores del FM_{cp} .

6.3.3 Revisión de potenciales de ahorro por mejora de las instalaciones

En muchas ocasiones el origen de elevados consumos en edificios existentes se debe a fallos o deterioro de la instalación. Por ejemplo, según datos del Consorcio para la Eficiencia Energética de Estados Unidos (CEE, julio de 2000) el 47% de los edificios residenciales inspeccionados por esta agrupación tenían capacidades sobreestimadas; el 70% funcionaba con caudales inadecuados y el 44% no poseían una carga de refrigerante apropiada. Los resultados de un informe editado por la Agencia de Protección del Medioambiente de Estados Unidos (C. Neme, 1999) revelan unos potenciales de ahorro asociados a mejoras en las instalaciones de las viviendas superiores al 30%, tal y como se muestra en la Figura 6.17.

Dado el alto porcentaje de ahorro alcanzable debido a la puesta a punto y la mejora de las instalaciones de climatización en viviendas, sería conveniente incluir y evaluar los potenciales de ahorro asociados a las mismas. En la PrEN 10203 (CEN, 2005) se incluye una lista de posibles medidas para la reducción del consumo energético en edificios (ver Figura 6.18). En ella se incluye la revisión periódica de los equipos de calefacción, refrigeración y sistemas de distribución, lo que permitiría detectar posibles defectos en las instalaciones.

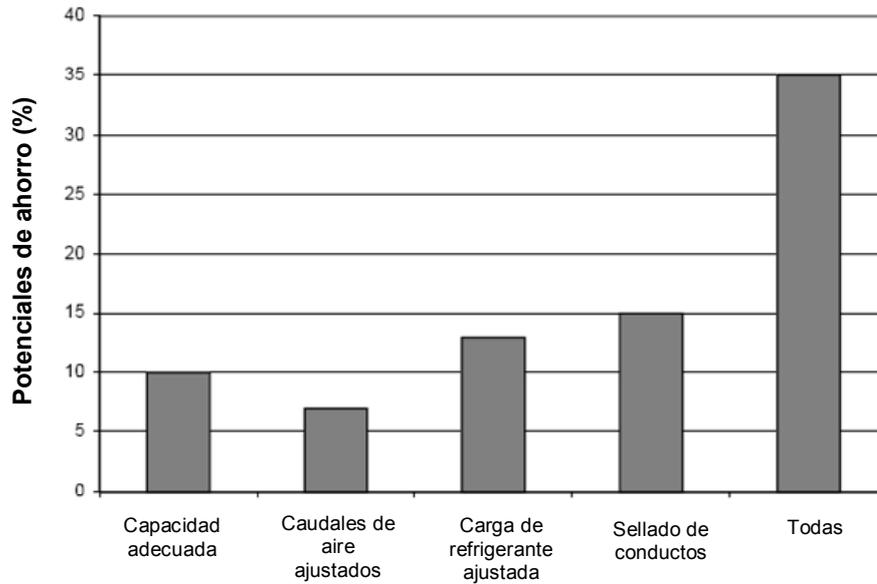


Figura 6.17: Potenciales de ahorro debidos a mejoras en las instalaciones de climatización en viviendas de Estados Unidos. Fuente EPA.

Por poner algunos ejemplos al respecto, según la Guía para la Puesta a Punto de Edificios Residenciales elaborada por el Lawrence Berkeley National Laboratory (Craig Wray y otros, Enero de 2003), los problemas más comunes encontrados durante la puesta a punto de los sistemas de climatización en edificios residenciales suelen ser los siguientes:

En sistemas de distribución de aire son comunes las fugas en conductos, el aplastamiento de tramos de aislamiento y otros defectos resultados de una mala instalación.

En cuanto a los equipos de refrigeración, raras veces se comportan tal y como se había previsto. En particular, los niveles de carga de refrigerante y los caudales de aire que atraviesan las baterías, no cumplen las especificaciones de uso fijadas por los fabricantes. Por tanto la capacidad y la eficiencia de los equipos disminuyen con respecto a las de diseño.

Los equipos de calefacción por combustión deben ser ventilados adecuadamente. Una mala instalación tanto del equipo como del dispositivo para el movimiento del aire puede reducir la eficiencia del mismo, además de introducir algunos riesgos como el retorno de llama o el derrame de combustible.

Según la Guía para las buenas prácticas en las instalaciones de sistemas de climatización en edificios residenciales (DOE, 2004), se requiere la toma de medidas físicas, la inspección visual y la encuesta sobre el uso al usuario para poder diagnosticar correctamente el estado de las instalaciones, lo que permitiría

incluir dentro del catálogo de medidas de mejora acciones relacionadas con la puesta a punto de las instalaciones. Concretamente esta guía propone una serie de paquetes de medidas de mejora adecuados a tres tipos de clima: templados y cálidos secos, fríos y muy fríos, y templados y cálidos húmedos. Que se clasifican en función del grado de esfuerzo asociado a su implementación, tal y como se observa en la figura siguiente.

HOT DRY, MIXED-DRY AND MARINE		
	HVAC SYSTEM ONLY	HVAC SYSTEM PLUS ENVELOPE
RETROFIT #1	Ducts sealed (leakage decreased to <10% of air handler flow) Ducts outside conditioned space insulated to R8 (RSI 1.4) Correct refrigerant charge	Ducts sealed (leakage decreased to <10% of air handler flow) Ducts outside conditioned space insulated to R8 (RSI 1.4) Correct refrigerant charge Ducts sealed and buried in added ceiling insulation. New downsized ducts and HVAC equipment. The ducts are installed to minimize the flow resistance, i.e. correct length, good routing and preferably sheet metal construction.
RETROFIT #2	Ducts sealed (leakage decreased to <10% of air handler flow) Ducts outside conditioned space insulated to R8 (RSI 1.4) Correct refrigerant charge Added economizer	Ducts sealed (leakage decreased to <10% of air handler flow) Ducts outside conditioned space insulated to R8 (RSI 1.4) Correct refrigerant charge Ducts sealed and buried in added ceiling insulation. New downsized ducts and HVAC equipment. The ducts are installed to minimize the flow resistance, i.e. correct length, good routing and preferably sheet metal construction. Added economizer
RETROFIT #3	Ducts sealed (leakage decreased to <10% of air handler flow) Ducts outside conditioned space insulated to R8 (RSI 1.4) Correct refrigerant charge Added economizer Higher solar reflectance roof, more window shading.	Ducts sealed (leakage decreased to <10% of air handler flow) Ducts outside conditioned space insulated to R8 (RSI 1.4) Correct refrigerant charge Ducts sealed and buried in added ceiling insulation. New downsized ducts and HVAC equipment. The ducts are installed to minimize the flow resistance, i.e. correct length, good routing and preferably sheet metal construction. Added economizer Higher solar reflectance roof, more window shading.

Figura 6.18: Paquetes de medidas de mejora propuestos por "Best Practices Guide For Residential Hvac Retrofits"

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS

En este capítulo se van a resumir las principales conclusiones y aportaciones obtenidas de esta tesis. También se plantearán las líneas de desarrollo que han quedado abiertas a futuros estudios.

7.1 Conclusiones generales

Se pone de manifiesto la importancia y la necesidad de fomentar la uniformidad a la hora de representar el comportamiento energético de edificios existentes. Esto facilitaría la labor de comparación de los indicadores energéticos, ayudando al desarrollo de la normativa sobre energética edificatoria.

La insuficiencia de datos estadísticos sobre consumos de edificios existentes en la mayoría de los países europeos, incluido España, dificulta la obtención de valores de referencia relativa al stock de edificios. Este desconocimiento de la situación actual impide dirigir las actuaciones relativas al ahorro en la edificación hacia objetivos realistas. Por ello se plantea la necesidad de llevar a cabo campañas de recogida de datos sobre consumos de edificios existentes en nuestro país.

Es posible crear un marco común, dentro de la metodología de la evaluación, que sea aplicable a los diferentes métodos de caracterización del consumo energético en edificios. Al mismo tiempo pueden ser adaptados a peculiaridades nacionales y a criterios políticos. Este marco está basado en el uso de las curvas normalizadas de distribución de frecuencias para los diferentes usos de energía.

Como consecuencia, las campañas de monitorización realizadas en ciertos países pueden ser extrapoladas a otros, permitiendo definir curvas por defecto que

puedan ser usadas en países donde los correspondientes estudios no hayan sido realizados todavía.

7.2 Aportaciones

Dentro de esta tesis se puede destacar por su innovación las siguientes aportaciones:

- El desarrollo de una metodología para la obtención del escenario de comparación de consumos energéticos, adaptada a los datos estadísticos disponibles.
- La obtención de un modelo de distribución que se ajusta al comportamiento de la población de consumos de edificios existentes.
- El desarrollo de metodologías simplificadas para la estimación de los potenciales de ahorro debidos a medidas de mejora como son: la sustitución o puesta a punto de equipos de refrigeración y calefacción, y la variación del nivel de aislamiento del edificio.
- El desarrollo de una metodología simplificada para la estimación de los rendimientos medios estacionales de equipos de climatización típicos del sector residencial, mediante la corrección del rendimiento nominal en función de la variación de las condiciones de operación y de carga parcial ocurrida durante un periodo determinado.

7.3 Desarrollos futuros

Los posibles desarrollos futuros del trabajo presentado se centrarían, a juicio de la autora, en tres líneas.

En primer lugar sería muy interesante desarrollar un proyecto para estandarizar las metodologías de caracterización del comportamiento energético de edificios existentes en base a medidas. La normativa europea unifica algunos aspectos pero sólo propone algunas directrices generales al respecto, por lo que este trabajo aún no se ha desarrollado en el ámbito europeo.

La segunda línea de desarrollo posible sería la relacionada con las posibles campañas de recogida de datos sobre consumos de edificios existentes que puedan llevarse a cabo en nuestro país. En este caso se podrían aplicar algunos de los procedimientos desarrollados en la tesis, relativos al muestreo, la segregación y el tratamiento de los datos de consumo.

La tercera línea sería el intento de caracterización del comportamiento a carga parcial de edificios del sector residencial, para obtener la variación del grado de carga parcial sobre los equipos mediante su distribución en frecuencias. Para esto se propone la simulación de distintas tipologías de edificios, situados en distintos climas, y con varias condiciones de operación para obtener una muestra representativa. Esto permitiría la aplicación de la metodología desarrollada en la tesis para la estimación de potenciales de ahorro por mejora de equipos.

REFERENCIAS

AICIA - Grupo de Termotecnia. *Procedimiento de evaluación del ahorro energético asociado a la modificación de un componente de un edificio en Andalucía*. Diciembre de 2006.

AICIA, Asociación de Investigación y Cooperación Industrial de Andalucía. *Estudio del impacto de la aplicación de los nuevos requisitos sobre la limitación de la Demanda Energética en los edificios de la propuesta de Código Técnico de la Edificación (CTE) respecto a las exigencias de la actual normativa (NBE-CT-79)*. 2003.

ANGLESIO P., Caon S., Caruso S. *Determinazione delle prestazioni energetiche di condizionatori elettrici a due unità in aria invertibile: determinazione delle prestazioni energetiche*, CDA, Febrero de 2001.

ARI, Air Conditioning & Refrigeration Institute, *Unitary air-conditioning and air-source heat pump equipment*, standard 210/240, Arlington Virginia, 1989.

ASHRAE, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. *Standard Methods of Measuring and Expressing Building Energy Performance*. ANSI/ASHRAE Standard 105-1984 (RA 99). Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. 1999

ASTM. *Standard Classification for Building Floor Area Measurements for Facility Management*. E 1836-01. West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials. 2001.

- ÁVILA BARAY, H.L. *Introducción a la metodología de la investigación*. Edición electrónica. Año 2006. www.eumed.net/libros/2006c/203/
- BOMA (1996). *Standard Method for Measuring Floor Area in Office Buildings*. ANSI/BOMA Z65.1- 1996. Washington, D.C.: Building Owners and Managers Association International.
- BRE, Building Research Establishment. *Ecohomes 2006 –The environmental rating for homes*. Abril de 2006.
- BRE, Building Research Establishment. *The Government's Standard Assessment Procedure for Energy Rating of Dwellings*. 2001 Edition. <http://www.bre.co.uk/sap2001>
- BRE, Building Research Establishment. *BREEAM –environmental assessment for new office designs*. Garston, Watford, WD2 7JR, UK, 1990.
- BRE, Building Research Establishment. *Management & operation assessment prediction checklist*. Improvements to the prediction checklist in 2004. Año 2004.
- CALIFORNIA ENERGY COMISIÓN. Title 24. *2005 Building Energy Efficiency Standards for Residential and Nonresidential Buildings*. Septiembre de 2004.
- C. NEME, J. Proctor, and S. Nadel. *National Energy Savings Potential from Addressing Residential HVAC Installation Problems*. U.S. Environmental Protection Agency ENERGY STAR© Program, 1999.
- CHAKRAVARTI, Laha, and Roy. *Handbook of Methods of Applied Statistics, Volume I*, John Wiley and Sons, pp. 392-394. 1967
- CHRISTOPHER A. Cheng. *Simulation modeling handbook: a practical approach*, Industrial And Manufacturing Engineering Series, CRC Press, Florida. 2004
- CIBSE, Chartered Institution of Building Services Engineers. *Energy Efficiency Best Practice Programme: Energy Consumption Guide 19 – Energy use in offices*. Enero de 2000.
- COHEN R, Bordass W, Field J Y Francis A. *Europrosper: Developing methods for the energy certification of existing building*. EPIC 2002 AIVC Conference, Lyon. Agosto 2002

COMISIÓN EUROPEA. *Directiva 93/76/CEE relativa a la limitación de las emisiones de dióxido de carbono mediante la mejora de la eficacia energética*. Septiembre de 1993.

COMISIÓN EUROPEA. *Directiva 2002/31/CE, por la que se establecen disposiciones de aplicación de la Directiva 92/75/CEE del Consejo en lo que respecta al etiquetado energético de los acondicionadores de aire de uso doméstico*. 22 de marzo de 2002

COMISIÓN EUROPEA. DG for Energy and Transport. *European Energy and Transport trends to 2030*, Enero de 2003.

COMISIÓN EUROPEA. *Eurostat*. <http://epp.eurostat.ec.europa.eu>.

CONSORTIUM FOR ENERGY EFFICIENCY. *Specification of Energy-Efficient Installation and Maintenance Practices for Residential HVAC Systems*, White Paper. Julio de 2000.

CRAIG WRAY, Iain Walker, Max Sherman. *Guidelines for Residential Commissioning*. Environmental Energy Technologies Division Indoor Environment Department Lawrence Berkeley National Laboratory Berkeley. Enero de 2003

D. A. HOFFMEYER. *A yardstick for Consumers to measure home energy performance*. Proceedings of the 2002 ACEEE

DERU, M.; Blair, N.; Torcellini, P. *Procedure to Measure Indoor Lighting Energy Performance*. Technical Report NREL/TP-550-38602. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. www.nrel.gov/publications/. 2005.

DERU, M.; Todd, J.A. *Review of Building Energy Performance Metrics*. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. 2004

DERU, M.; Torcellini, P. *Improving Sustainability of Buildings through a Performance-Based Design Approach*. A.A.M. Sayigh, ed. Proceedings of the World Renewable Energy Congress VIII (WREC 2004), 29 August–3 September 2004, Denver, Colorado (CD-ROM). [Amsterdam]: Elsevier, Ltd.; www.nrel.gov/docs/fy04osti/36276.pdf

DERU, M.; Torcellini, P. *Procedure to Determine Source Energy and Emissions for Energy Use in Buildings*. Technical Report NREL/TP-550-38617. Año 2005 Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. www.nrel.gov/publications/

- DERU, M.; Torcellini, P. *Standard Definitions of Building Geometry for Energy Evaluation Purposes*. Technical Report NREL/TP-550-38600. Golden, CO: National Renewable Energy Lab. Año 2005. www.nrel.gov/publications/.
- DOE, Department of Energy. *Professional Engineer's Guide to the ENERGY STAR® Label for Buildings*. Noviembre de 2006
- DOE, Department of Energy. *Best Practices Guide for Residential HVAC Retrofits*. Technical Reports. U.S. Department of Energy, Energy Efficiency and Renewable Energy. Building Technologies Program. Año 2004
- DOE, Department of Energy. *Stronger Manufacturers' Energy Efficiency Standards for Residential Air Conditioners Go Into Effect Today*. January 23, 2006, <http://www.energy.gov/news/3097.htm>
- DPM, The Office of the Deputy Prime Minister. *English House Condition Survey*. July 2003. ISBN 1 85112 655 4
- EIA, Energy Information Administration. *Residential Energy Consumption Survey*. Quality Profile, March 1996
- EIA, Energy Information Administration. *Appendix D. End-Use Estimation methodology of Household Energy Consumption and Expenditures* 1990. Año 1993
- EIA, Energy Information Administration. *Household Energy Consumption and Expenditures* (DOE/EIA-0321(93), U.S. Department of Energy. Año 1993.
- EIA, Energy Information Administration. *Residential Energy Consumption Survey 1993*. <http://www.eia.doe.gov/emeu/recs/recs1993>
- EIA, Energy Information Administration. *Residential Energy Consumption Survey 2001*. <http://www.eia.doe.gov/emeu/recs/recs2001>
- EPA, Environmental Protection Agency. *ENERGYSTAR Portfolio Manager*. Washington. <http://www.energystar.gov>. Accessed August 2005.
- EPA, Environmental Protection Agency. *Technical Description for the Office Model*. available at <http://www.energystar.gov>. Washington, DC. 2001
- EPA, Environmental Protection Agency. *Energy Star Label of buildings*. <http://www.epa.gov/buildings/label/>

- EURECO, *End-use metering campaign in 400 Households of the European Community* Comisión Europea. Comisión Europea. Enero de 20002.
- EUROCLASS, *Development of an European Methodology to Experimentally Assess and Classify Existing Residential Buildings Based on their Actual Energy Consumption*. Comisión Europea. Julio de 2001.
- F. FLOUQUET, *Local weather correlations and bias in building parameter estimates from energy signature models*, Energy and buildings 19 (1992) pp113-123
- FLANDERS, L. Assistant Director (UN Division for SD) en la conferencia: Sustainable Development of Coastal Zones and Instruments for its Evaluation, Alemania, 23-26 Oct. 2000.
- G. HENDERSON y otros. *Energy labelling of Existing Buildings*. Proceedings of the 2001 eceee summer study
- HENDERSON, H.I. *Simulating Combined Thermostat, Air Conditioner, and Building Performance in a House*. ASHRAE Trans. 1992, vol.98, Part 1, Paper number 3579, 370-380, 5 figs., 11 tabs., refs. 1992)
- HENDERSON, H.I., Y.J. Huang, and D. Parker. 1999. *Residential Equipment Part-Load Curves for Use in DOE-2*. LBNL. February.)
- HSIAO C, Mountain DC, Illman KH. *Bayesian integration of end-use metering and conditional demand analysis*. Journal of Business and Economic Statistics 13(3):315-326. Año 1995
- IDAE, Instituto para la Diversificación y el Ahorro de Energía y Ministerio de Fomento. *Fundamentos Técnicos de la Calificación Energética de Viviendas*. Fondo Editorial del IDEA. Año 1999
- IDAE, Instituto para la Diversificación y el Ahorro de Energía. *Curso etiquetado energético de los electrodomésticos*. <http://www.idae.es>
- IDAE, Instituto para la Diversificación y el Ahorro de Energía. *Guía Técnica sobre Procedimientos de Inspección Periódica de Eficiencia Energética para la Determinación del Rendimiento de Plantas Enfriadoras de Agua y Equipos Autónomos de Tratamiento de Aire*. 2005. Documento de Trabajo
- INE, Instituto Nacional de Estadística. *Censos de Población y Viviendas 2001*. Resultados definitivos. <http://www.ine.es/censo/es/inicio.jsp>. Febrero de 2004.

- J.R. STEIN, A. Meier. *Accuracy of home energy rating system*. Energy, Volume 25, Issue 4, April 2000, Pages 339-354
- JOHNSON, R.A., Freund, J.E., and Miller, I. (1999), *Miller and Freund's Probability and Statistics for Engineers*, Pearson Education, New York.
- JUAN F. CORONEL, Ismael Rodriguez y otros. *Simulación de sistemas de climatización basada en curvas características de equipos*. Climamed 2006.
- JUÁREZ ALONSO, Carlos Alberto, *Fusión de Datos: Imputación y Validación*, Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, Marzo de 2005
- KARL V. Bury., Robert E. Krieger. *Statistical Models in Applied Science*, Pub. Co. 1986
- K. ENGELUND THOMSEN, K.B. Wittchen y otros. *Applying the EPBD to improve the Energy Performance Requirements to Existing Buildings – ENPER-EXIST; "Building stock knowledge"*. November 2006
- LBL-19735, *OVERVIEW OF THE DOE-2 BUILDING ENERGY ANALYSIS PROGRAM, VERSION 2.1D*, B. Birdsall, W.F. Buhl, K.L. Ellington, A.E. Erdem and F.C. Winkelmann, Feb. 1990.
- LBL-34947, *DOE-2 SUPPLEMENT, VERSION 2.1E*, W.F. Buhl, B. Birdsall, A.E. Erdem, K.L. Ellington and F.C. Winkelmann, and Hirsch & Associates, November 1993.
- M. AYDINALP, V.I. Ugursal, A.S. Fung. *Modelling of residential energy consumption at the national level*. International Journal of Energy Research. 27(4): 441-453. Año 2003.
- MACDONALD, J. M., and S. E. Livengood. *Residential Energy Performance Benchmarking Analysis*, informal report from Oak Ridge National Lab to EPA. Año 2001.
- MACDONALD, J. M., and S. E. Livengood, *Benchmarking Residential Energy Use*, Proceedings of the 2000 ACEEE Summer Study, pp 1.175 – 1.185, ACEEE: Washington, DC. Año 2000.
- MATHWAVE TECHNOLOGIES; <http://www.mathwave.com/products/easyfit.html>; August 2006.

MINISTERIO DE ECONOMÍA, *Estrategia de ahorro y eficiencia energética en España 2002-2012, Sector Edificación*, Noviembre de 2003.

MINISTERIO DE INDUSTRIA. *Plan de Acción 2005-2007 de la Estrategia de Ahorro y Eficiencia en España 2004-2012*. Julio de 2005.

MINISTERIO DE LA VIVIENDA. *Código Técnico de la Edificación*. Marzo de 2006.

NIST/SEMATECH. *e-Handbook of Statistical Methods. Engineering Statistical Handbook*, <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/>, Mayo de 2006

NREL, National Renewable Energy Laboratory. *Procedure for Measuring and Reporting Commercial Building Energy Performance*. Octubre de 2005

NREL, National Renewable Energy Laboratory. *Technical Report Standard Definitions of Building Geometry for Energy Evaluation*.

OPET, *Danish Experience in Energy Labelling of Buildings*. Septiembre de 2003.

PCSD, President's Council on Sustainable Development. *U.S. Interagency Working Group on Sustainable Development Indicators, Council on Environmental Quality. Presidents Council on Sustainable Development. Final Report*. Año 1999.

prEN 15203. *Energy performance of buildings -Assessment of energy use and definition of ratings*.

prEN 15217. *Energy performance of buildings - Methods for expressing energy performance and for energy certification of buildings*.

prEN 14511. *Acondicionadores de aire, enfriadoras de líquido y bombas de calor con compresor accionado por motor eléctrico para calefactar y enfriar espacios*.

R. COHEN, W. Bordass y J. Field. *EPLabel: a graduated response procedure based for producing energy certificate based on an operational rating*. Improving Energy Efficiency in Commercial Building, IEECB'06. Abril de 2006.

Real Decreto 1326/1995, de 28 de julio, *por el que se regula el etiquetado energético de frigoríficos, congeladores y aparatos combinados electrodomésticos*.

Real Decreto 275/1995, *por el que se dicta las disposiciones de aplicación de la Directiva del Consejo de las Comunidades Europeas 92/42/CEE, relativa a los*

- requisitos de rendimiento para las calderas nuevas de agua caliente alimentadas con combustibles líquidos o gaseosos.* 24 de Febrero de 1995.
- RICK KARG R.J. Karg Associates and John Krigger Saturn Resource Management. *Specification of Energy-Efficient Installation and Maintenance Practices for Residential HVAC Systems White Paper Consortium for Energy Efficiency.* Julio de 2000
- ROULET C.-A, Flourentzou F, Labben H.H. *ORME: A multicriteria rating methodology for buildings.* Building and Environment 37 (2002) 579 – 586
- SALKIND, N.S. *Métodos de investigación.* 3ª edición, México: Prentice-Hall. Año 1999.
- SHARP, T. R. *Energy Benchmarking in Commercial Office Buildings,* Proceedings of the 1996 ACEEE Summer Study, pp 4.321–4.329, ACEEE: Washington, DC..
- SHARP, T. R. *Benchmarking Energy Use in Schools,* Proceedings of the 1998 ACEEE Summer Study, pp 3.305–3.316, ACEEE: Washington, DC..
- SNEDECOR, George W. and Cochran, William G. *Statistical Methods,* 8ª Edición, Iowa State University Press. Año 1989.
- STEPHEN B. Vardeman, *Statistics for Engineering problem solving,* PWS Pub. Co. 1994
- STEWART, R.; Stewart, S.; Joy, R. *Energy Audit Input Procedures and Forms.* ASHRAE Transactions 90(1A):350-62. Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. Año 1984.
- US GREEN BUILDING COUNCIL. *Rating System For Pilot Demonstration of LEED® for Homes Program.* Septiembre de 2005.
- VELAZQUEZ R. *Apuntes de análisis térmico y de sistemas de climatización.* Departamento de Ingeniería Energética y Mecánica de fluidos, Grupo de Termotecnia. Universidad de Sevilla. Año 1997.

ANEXO A. RESUMEN DE SISTEMAS DE CERTIFICACIÓN

a.1. Descripción general

A continuación se muestra una tabla resumen con las características principales de los sistemas de certificación existentes en otros países. Concretamente se presenta la siguiente información:

1. País de implantación.
2. Nombre
3. Exigencia legal
4. Sectores edificatorios que abarca
5. Método de cálculo empleado
6. Conceptos evaluados
7. Magnitudes evaluadas o Indicadores evaluados
8. Escenario de comparación
9. Criterios de evaluación

País	Nombre	Exigencia legal	Sectores edificatorios	Método de cálculo	Conceptos evaluados	Magnitudes evaluadas	Escenario de comparación	Criterios de evaluación	
Reino Unido	SAP	Obligatorio	Residencial Nuevo	Basado en BREDEM Compatible con EN832 ³⁶	Calefacción ACS	Coste energético (£/m ²) Emisiones de CO ₂	Niveles de Referencia	SAP (£/m ²): 1-120 CI (kg CO ₂ /m ²): 0.0-10.0	
		Voluntario	Residencial Existente				Ambas de acuerdo a formula logarítmica		
	NHERS	Voluntario	Residencial Nuevo y Existente		Calefacción ACS Iluminación Electrodomésticos	Coste energético (£/m ²) Emisiones de CO ₂	Niveles de Referencia	NHER (£/m ²): 0-10 CI(kg CO ₂ /m ²): 0.0-10.0	
									Ambas de acuerdo a formula logarítmica
	EcoHomes	Voluntario	Residencial Nuevo y Existente		---	Medio Ambiente: - Transporte - Energía - Emisiones - Agua - Materiales Salud pública: - Calidad Ambiente interior - Confort térmico - Iluminación	En Energía: - Demanda anual de energía (kWh/m ²) - Emisiones de CO ₂	Baremo fijo por categoría	EcoHomes RATING: PASS GOOD VERY GOOD EXCELLENT En función de la puntuación obtenida
	BREAM	Voluntario	No Residencial Nuevo y Existente	---	Gestión y operación Medio Ambiente: - Transporte - Energía - Emisiones - Agua - Materiales Salud pública Ambiente interior	En Energía: - Demanda anual de energía (kWh/m ²) - Emisiones de CO ₂	Baremo fijo por categoría (Niveles de referencia del ECONs 19 para emisiones de CO ₂)	EPI (comportamiento medioambiental): 1-10 BREAM RATING (evaluación completa): PASS GOOD VERY GOOD EXCELLENT	

³⁶ EN 832 es una norma europea para el cálculo del comportamiento energético de edificios. Esta será sustituida por la prEN ISO 13790

País	Nombre	Exigencia legal	Sectores edificatorios	Método de cálculo	Conceptos evaluados	Magnitudes evaluadas	Escenario de comparación	Criterios de evaluación
Reino Unido	ECONs 19	Voluntario	No Residencial (Oficinas) Existente	Facturas energéticas	Calefacción Refrigeración Iluminación Equipos	Consumo (kWh/m ²) Coste energético (£/m ²) Emisiones (kg CO ₂ /m ²)	4 Edificios de oficinas de referencia	No incluye calificación
Dinamarca	EM	Obligatorio	Edificios Nuevos y Existentes < 1500 m ²	Método estacionario Compatible con EN832	Calefacción Usos Eléctricos Agua	Calefacción (kWh/m ²) Eléctrico (kWh/m ²) Agua (m ³ /m ²) Emisiones (kg CO ₂)	Edificios de similares características de análisis estadísticos	Calefacción: A1-C5 Eléctrico: A-C Agua: A-C Emisiones: A-C
	ELO	Obligatorio	Edificios Nuevos y Existentes > 1500 m ²	Facturas energética & Método estacionario Compatible con EN832	Calefacción Usos Eléctricos Agua	Calefacción (kWh/m ²) Eléctrico (kWh/m ²) Agua (m ³ /m ²) Emisiones (kg CO ₂)	Edificios de similares características de análisis estadísticos	Calefacción: A-M Eléctrico: A-M Agua: A-M Emisiones: A-M
Alemania	Passiv Hauss	Voluntario	Residencial Nuevo	Simulación dinámica	Calefacción Iluminación ACS Ventilación	Consumos anuales (kWh/m ²)	Nivel de referencia fijo	Certificado "Passiv Haus" si: Calefacción < 15 kWh/m ² Consumo total < 30 kWh/m ²
Holanda	EPA	Residencial Existente	Voluntario	Método estacionario Compatible con EN832	Calefacción ACS Iluminación	Consumo de energía primaria (kWh/m ²)	15 Edificios residenciales de referencia	Energie-Index: 1.1-1.4 Relación entre el consumo avaluado y el de referencia
Irlanda	HER	Residencial Nuevo	Voluntario	Método estacionario Compatible con EN832	Calefacción ACS	Consumos finales (kWh/m ²)	Nivel de referencia variable con la compacidad	Certifica si: Consumo < Referencia
	ERBM	Residencial Nuevo y Existente	Voluntario	Simulación dinámica	Calefacción ACS	Consumo de energía primaria (kWh/m ²) Emisiones (tn CO ₂ año)	No publicado	No publicado

País	Nombre	Exigencia legal	Sectores edificatorios	Método de cálculo	Conceptos evaluados	Magnitudes evaluadas	Escenario de comparación	Criterios de evaluación
EEUU	HERS	Voluntario	Residencial Nuevo y Existente	Herramientas de simulación acreditadas ³⁷	Calefacción Refrigeración ACS	Calefacción (kWh) Refrigeración (kWh) ACS (kWh)	Edificio de referencia de similares características	Puntuación: 0-100 Estrellas: 1-6 (en función de la puntuación)
	LEED	Voluntario	Residencial y No residencial. Nuevo y existente	---	Medio Ambiente: - Transporte - Energía - Emisiones - Agua - Materiales Salud pública: - Calidad Ambiente interior - Confort térmico - Iluminación	En Energía: - Consumo de energía primaria (kBTU)	Baremo común (Puntuación en Energía de acuerdo con el Energy Star)	Certificado LEED Certificado LEED plata Certificado LEED oro Certificado LEED platino En función de la puntuación
	ENERGY STAR	Voluntario	No residencial Nuevo y Existente	Normaliza en base a modelos de regresión	Calefacción Refrigeración Iluminación Equipos Calidad de aire interior (de acuerdo a la normativa)	Consumo de energía primaria (kBTU)	Edificios de similares características de análisis estadísticos	Puntuación: 0-100 La puntuación indica el %de edificios que consumen por encima >75 % → ENERGY STAR
Canadá	EnerGuide	Voluntario	Residencial Nuevo y Existente	Simulación dinámica (HOT@2XP)	Calefacción ACS Iluminación	Consumo anual por tipo de energía (Wh)	Edificio de referencia de similares características	Puntuación: 0-100

³⁷ Certificación de herramientas de simulación mediante el HERS-BESTEST

ANEXO B. DESCRIPCIÓN DE BASES DE DATOS RECS

b.1. Descripción general

Las bases de datos utilizadas se han tomado de las encuestas realizadas por la Agencia de Información Energética (EIA) para el Departamento de Energía (DOE) de Estados Unidos. Estas encuestas reúnen información acerca de las características físicas de los edificios, de sus patrones de uso y ocupación, de los principales equipos empleados y de los tipos de energía utilizados para cada uso posible. Los datos relativos al consumo energético de cada edificio encuestado son proporcionados por las compañías suministradoras de energía.

La encuesta se lleva a cabo sobre una muestra de edificios escogida para representar la totalidad del parque edificatorio estadounidense. Esta consta de dos etapas fundamentales: la encuesta a propietarios y la encuesta a los suministradores energéticos. La primera es la que reúne los datos relativos a las características de los edificios, que se elabora mediante entrevistas personales a propietarios o inquilinos. En la segunda se procede a obtener datos acerca del consumo energético y el gasto asociado al mismo registrados por las empresas suministradoras mediante encuestas por correo.

Para respetar la confidencialidad de los edificios de la muestra la EIA no recibe información acerca de la dirección o el nombre del encuestado o cualquier dato específico que pueda relacionarse claramente con algún edificio de la muestra. Los datos entregados a la EIA no contienen ningún identificador geográfico, la

única información geográfica que se le proporciona es la relativa al nivel de censo y la zona climática a la que pertenece cada edificio de la muestra (ver 0y 0). Tampoco se le facilitan aquellas características del edificio, como número de plantas, superficie o número de trabajadores, que puedan identificar potencialmente alguno de los edificios de la muestra.

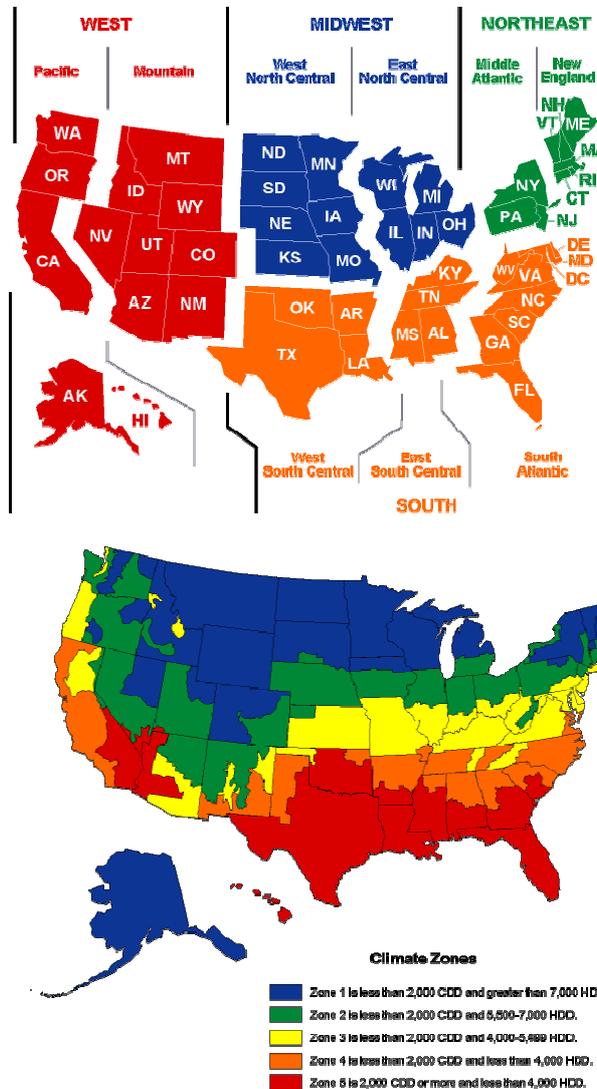


Figura b.1. Divisiones en niveles de censo de EEUU y zonas climáticas de EEUU.

Los datos disponibles abarcan dos sectores fundamentales dentro de la población de edificios existente: el sector comercial y el residencial. Ambos sectores han sido abarcados de manera independiente, aunque siguiendo la misma metodología general. Existe una tercera base de datos de menor entidad que engloba únicamente edificios federales.

A continuación se detallarán los contenidos más importantes y el número de registros de cada base de datos.

b.2. Sector residencial: RECS

En esta encuesta se recoge información de datos energéticos de primeras viviendas. Estos datos se han obtenido mediante tres fuentes diferentes: entrevistas en persona dirigidas a la vivienda particular, entrevistas telefónicas con los propietarios de viviendas alquiladas en las que el consumo energético esté incluido en el alquiler y cuestionarios por correo dirigidos a los suministradores de energía.

Las variables recogidas por estos registros incluyen tanto características físicas de la vivienda como de los electrodomésticos empleados en las mismas.

Estas bases de datos incluyen información relacionada con el consumo energético en el sector residencial.

En primer lugar constan de datos obtenidos mediante encuestas como por ejemplo:

- Las características físicas de las viviendas
- Los electrodomésticos utilizados, incluyendo los equipos para la calefacción y refrigeración de la vivienda
- Las características demográficas de la vivienda
- El tipo de energía empleada

También muestran campos relacionados con los consumos y los costes energéticos, con datos obtenidos de las empresas suministradoras.

Esta encuesta sobre consumos energéticos en el sector residencial se ha realizado en 1978, 1979, 1980, 1981, 1982, 1984, 1987, 1990, 1993 y 1997.

b.2.1. Organización y contenido de ficheros

Los ficheros de 1987, 1990 y 1993 se encuentran en formato dbase y suman un total de 12136 registros. En el caso de los datos más actuales de 1997 y 2001 constan de 5900 registros y se encuentran almacenados en formato ACCESS.

Contenido general de los ficheros de RECS-1997

Estos últimos datos se encuentran agrupados en distintas tablas, descritas a continuación:

- Características del aire acondicionado

- Uso de energías para equipos auxiliares
- Características del uso de bombona de gas
- Características del uso de electricidad
- Ayudas energéticas
- Uso de sellos energéticos
- Representatividad del edificio
- Costes energéticos
- Características del uso de Fuel Oil
- Características de propietarios
- Estructura de la vivienda
- Indicadores de variables imputadas
- Observaciones del entrevistador
- Características del uso de keroseno
- Electrodomésticos de la cocina
- Iluminación, ventanas y aislamiento
- Localización y clima
- Características del uso de gas natural
- Otros electrodomésticos
- Características del uso de otros tipos de energías
- Características del uso de energía solar
- Características de la calefacción
- Dirección de la entrevista
- Características del Agua Caliente Sanitaria
- Características del uso de madera

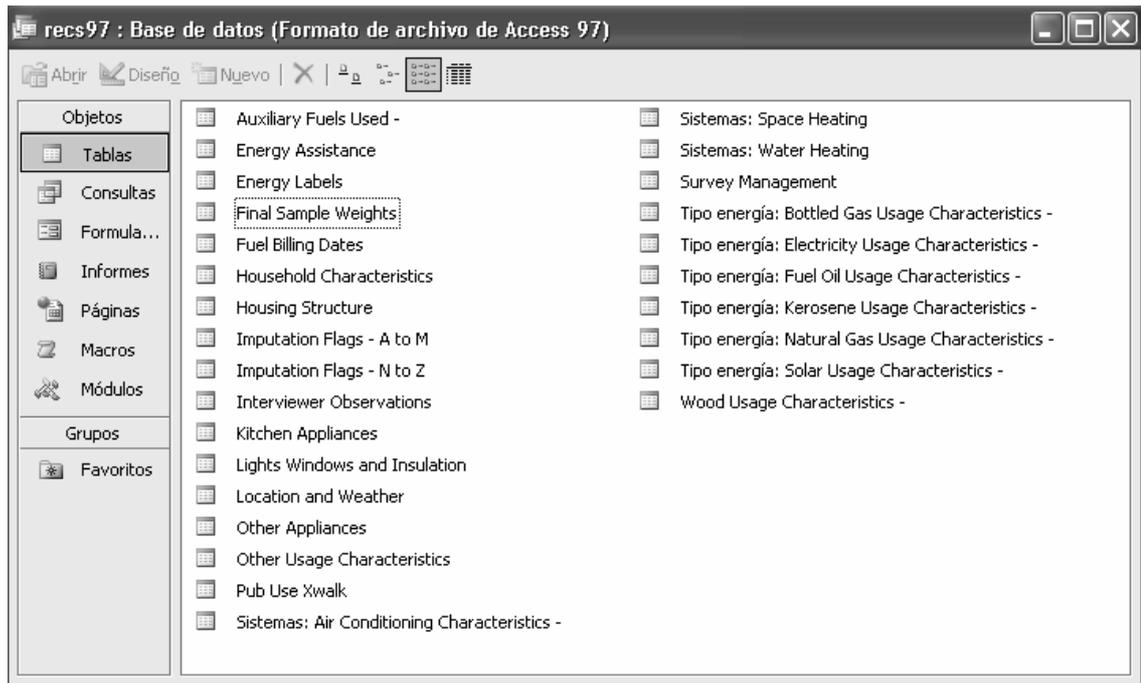


Figura b.2: Esquema de tablas correspondientes a la base de datos RECS 1997

Descripción de variables comunes a todos los ficheros

Todos los ficheros de los que consta la base de datos comparten una serie de variables generales que sirven para enlazar unos ficheros con otros. Estas se describen a continuación:

DOEID: Número identificador del registro

NWEIGHT: Representatividad del registro

WQRESULT: Código del cuestionario enviado

REGIONC y DIVISION: Nivel de censo al que pertenece el edificio

LRGSTATE: Pertenencia a uno de los cuatro estados mayores

CDD65: Grados-día de verano (base 65°F)

HDD65: Grados-día de invierno (base 65°F)

TYPEHUQ: Tipo de vivienda

ANEXO C. CURVAS DE COMPORTAMIENTO DE EQUIPOS

En este anexo se explica el procedimiento de obtención de las curvas que caracterizan el funcionamiento fuera de las condiciones nominales de diversos equipos. Concretamente se estudian las calderas y los equipos autónomos aire-aire.

c.1. Calderas

Para la obtención del consumo de calderas de calefacción y de agua caliente sanitaria mediante simulación horaria es necesario conocer el rendimiento nominal de la caldera y la variación de este rendimiento a carga parcial. Revisada toda la información disponible sobre el comportamiento de las calderas fuera de condiciones nominales, es decir, cuando la potencia no es la máxima y cuando cambia la temperatura del fluido que está siendo calentado, no se han encontrado datos con la suficiente validez como para ser representativos del comportamiento de la mayoría de las calderas existentes. Por esta razón se utilizan los únicos datos fiables y que deben cumplir como valores mínimos todas las calderas, estos datos son los que se obtienen del Real Decreto 275/1995.

Tras la revisión de los rendimientos térmicos mínimos exigibles para los distintos tipos de calderas de calefacción y agua caliente sanitaria, se procede a la obtención de las curvas que caractericen el comportamiento a carga parcial de cada una de ellas, que deberá cumplir los requerimientos exigidos por el R.D. 275/1995.

Según el R.D. 275/1995 se establecen unos rendimientos mínimos para condiciones nominales y para cargas del 30% de la nominal. En ambos casos los rendimientos varían en función del tipo de caldera y de la potencia nominal de la caldera.

Tabla c.1. Rendimientos mínimos de calderas según R.D. 275/1995.

Tipo de Caldera	Potencias (kW)	Rendimiento Nominal		Rendimiento al 30%	
		$T_m(^{\circ}\text{C})^{38}$	η_{nom}	$T_m(^{\circ}\text{C})$	η_{30}
Estándar	4 a 400	70	$84.0 + 2.0 \cdot \log P_n$	50	$80.0 + 3.0 \cdot \log P_n$
Baja Temperatura	4 a 400	70	$87.5 + 1.5 \cdot \log P_n$	40	$87.5 + 1.5 \cdot \log P_n$
Condensación (gas)	4 a 400	70	$91.0 + 1.0 \cdot \log P_n$	30^{39}	$97.0 + 1.0 \cdot \log P_n$

El consumo actual (en una hora determinada) de la caldera se puede representar como la carga sobre la caldera dividida por el rendimiento actual de la caldera. De manera que:

$$\text{CONSUMO}_{\text{ACTUAL}} = \frac{\text{CAP}_{\text{ACTUAL}}}{\eta_{\text{ACTUAL}}} = \frac{\text{CAP}_{\text{NOM}} \cdot f_{\text{cp}}}{\eta_{\text{NOM}} \cdot r_{\text{fcp}}}$$

Siendo:

f_{cp} : el factor de carga parcial, es decir, la relación entre la carga actual sobre la caldera y la capacidad en las condiciones actuales.

η^* : la relación entre el rendimiento actual de la caldera y el rendimiento en condiciones nominales. Este parámetro variará en función del factor de carga parcial.

$$f_{\text{cp}} = \frac{Q_{\text{actual}}}{\text{CAP}_{\text{actual}}} \quad r_{\text{fcp}} = \frac{\eta_{\text{actual}}}{\eta_{\text{no\ min\ al}}}$$

Se desea obtener unas curvas que representen el comportamiento medio de cada tipo de calderas, para ello se determinan los valores medios de los rendimientos mínimos exigidos y la relación entre el rendimiento medio al 30% de carga y el rendimiento medio nominal. Esta relación deberá ser cumplida por la curva de comportamiento a carga parcial de cada tipo de caldera.

³⁸ Temperatura media de la caldera.

³⁹ Temperatura de entrada a la caldera.

Tabla c.2. Valores medios de los rendimientos mínimos de calderas según R.D. 275/1995.

Tipo de Caldera	Rendimiento Nominal Medio	Rendimiento al 30% Medio	$\frac{\eta_{30}}{\eta_{nom}}$
	η_{nom}	η_{30}	
Estándar	88.369	86.55	0.979
Baja Temperatura	90.777	90.777	1.00
Condensación (gas)	93.185	99.185	1.064

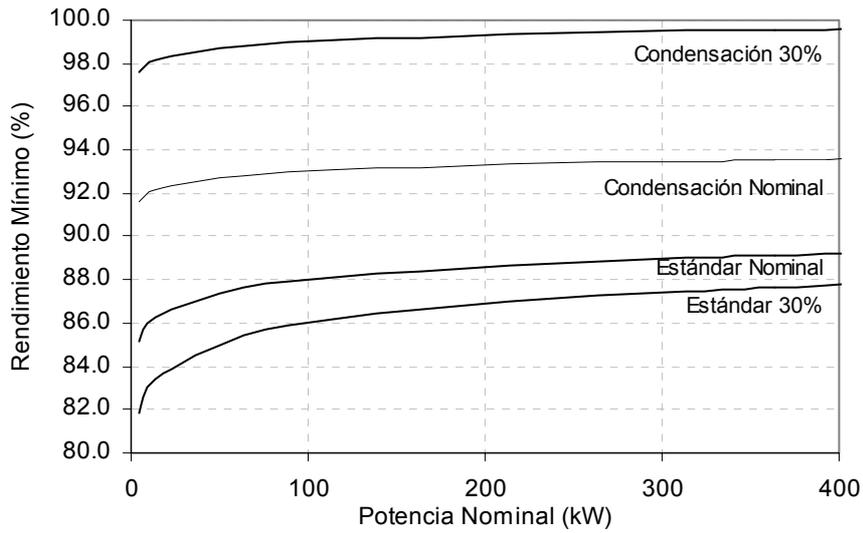


Figura c.1: Variación frente a la potencia nominal de los rendimientos mínimos de calderas según R.D. 275/1995

Por tanto, cada una de las curvas deberá pasar por los tres puntos siguientes:

1. Para $f_{cp} = 1$; $r_1 = \frac{\eta_{100\%}}{\eta_{NOMINAL}} = 1$
2. Para $f_{cp} = 0.3$; $r_{0.3} = \frac{\eta_{30\%}}{\eta_{NOMINAL}} = \begin{cases} 0.979 & \text{Caldera convencional} \\ 1.00 & \text{Caldera de Baja temperatura} \\ 1.064 & \text{Caldera de condensación} \end{cases}$
3. Para $f_{cp} = 0$; $r_0 = \frac{\eta_{0\%}}{\eta_{NOMINAL}} = 0$

Una vez obtenidas las curvas anteriores el siguiente paso será transformarlas al formato requerido por el programa DOE-2 para su simulación. Este formato parte de la obtención del consumo de la caldera a partir de la siguiente expresión:

$$\text{CONSUMO}_{\text{ACTUAL}} = \text{CAP}_{\text{NOM}} \cdot \text{HIR}_{\text{NOM}} \cdot \text{HIR}(f_{cp})$$

Donde:

CAP_{NOM} es la capacidad de la caldera en condiciones nominales.

HIR_{NOM} es la inversa del rendimiento nominal de la caldera: $HIR_{NOM} = \frac{1}{\eta_{NOM}}$

HIR(fcp) es la nueva curva que caracteriza el comportamiento a carga parcial de la caldera.

La nueva curva, necesaria para la simulación de las calderas en CALENER (HIR(fcp)) se relaciona con la curva que define el factor corrector del rendimiento a carga parcial (rfcp) de la siguiente forma:

$$HIR(fcp) = \frac{fcp}{r_{fcp}}$$

Se han considerado un total de cuatro curvas para caracterizar cada uno de los cuatro tipos de caldera utilizados para la realización del presente estudio, caldera estándar antigua, caldera estándar nueva, caldera de baja temperatura y caldera de condensación.

A continuación se representan las curvas que definen el factor corrector del rendimiento a carga parcial para cada tipo de caldera.

Se puede comprobar en la figura como todas ellas cumplen los valores exigidos por la norma para el punto correspondiente a un 30% de carga parcial (fcp = 0.3).

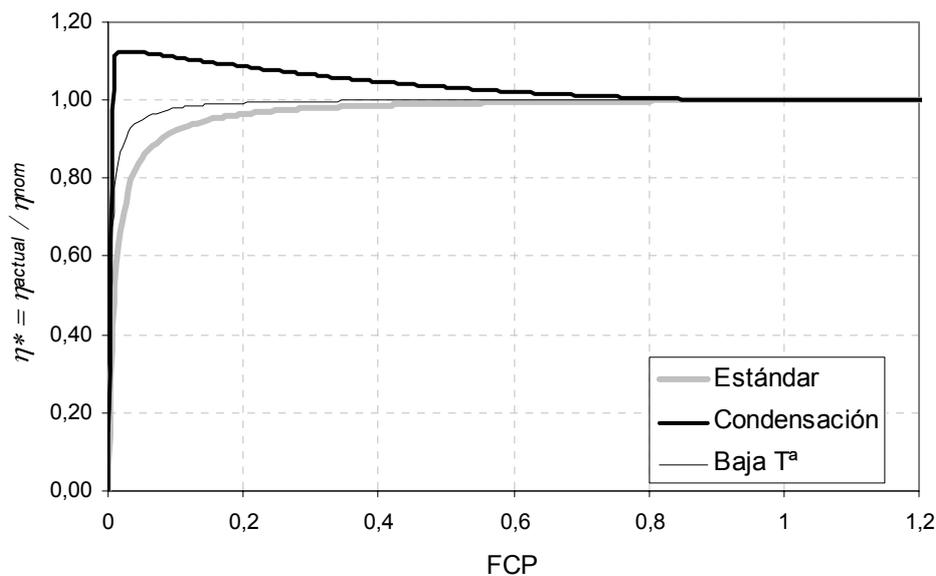


Figura c.2: Variación del rendimiento de la caldera en función del factor de carga parcial.

Para la transformación al formato requerido por CALENER se han ajustado tres curvas que representan la variación de la relación entre el factor de carga parcial y el factor corrector del rendimiento para cada tipo de caldera. El ajuste se ha realizado mediante la siguiente expresión cuadrática:

$$\text{HIR}(\text{fcp}) = A + B \text{ fcp} + C \text{ fcp}^2 + D \text{ fcp}^3$$

Tabla c.3. Coeficientes del ajuste de la función $\text{HIR}(\text{fcp})$.

Tipo de Caldera	A	B	C	D
Estándar antigua	0.082597	0.996764	-0.079361	0.00
Estándar nueva	0.009117	0.992645	-0.006778	0.0048761
Baja Temperatura	0.003000	0.990200	0.008700	-0.001000
Condensación (gas)	0.000200	0.876100	0.242800	-0.119

c.2. Equipos Autónomos aire-aire

Para simular los consumos correspondientes a los casos que disponen de equipos autónomos tanto para refrigeración como para calefacción, se ha utilizado directamente la herramienta Calener. En este caso las curvas que caracterizan su comportamiento a carga parcial y fuera de las condiciones nominales son las siguientes:

$\text{CAP}_f(T_1, T_2)$ es la curva que corrige la capacidad frigorífica del equipo autónomo en función de la temperatura húmeda del aire del local (T_1) y la temperatura seca del aire exterior (T_2).

$\text{CAP}_c(T_1, T_2)$ es la curva que corrige la capacidad calorífica del equipo autónomo como bomba de calor en función de la temperatura seca del aire del local (T_1) y la temperatura seca del aire exterior (T_2).

$\text{EIR}(T_1, T_2)$ es la curva que caracteriza la variación del consumo del equipo autónomo en función de las condiciones de operación, que vendrá representadas por la temperatura húmeda del aire del local (T_1) y la temperatura seca del aire exterior (T_2).

$\text{HEIR}(T_1, T_2)$ es la curva que caracteriza la variación del consumo de la bomba de calor en función de las condiciones de operación, que vendrán representadas por la temperatura seca del aire del local (T_1) y la temperatura seca del aire exterior (T_2).

$\text{EIR}(\text{fcp})$ es la curva que caracteriza la variación del consumo a carga parcial del equipo autónomo, donde "fcp" es el factor de carga parcial del equipo y representa la relación entre la carga frigorífica actual sobre el equipo frente a la capacidad frigorífica en las condiciones actuales

HEIR(fcp) es la curva que caracteriza la variación del consumo a carga parcial de la bomba de calor, donde "fcp" es el factor de carga parcial del equipo y representa la relación entre la carga actual sobre el frente a la capacidad calorífica en las condiciones actuales.

A continuación se muestra el conjunto de curvas que caracterizan el comportamiento del equipo autónomo en régimen de refrigeración y de calefacción (bomba de calor).

c.2.1. Refrigeración

$$EIR(fcp)=A+B \cdot fcp+C \cdot fcp^2+D \cdot fcp^3$$

Tabla c.4. Coeficientes del ajuste de la función EIR(fcp).

Régimen	Control	A	B	C	D
Refrigeración	Defecto DOE	0.20123007	-0.0312175	1.9504979	-1.1205104
Refrigeración	On-off	0.0102	1.18131	-0.246748	0.0555745
Refrigeración	Modulante	0.0301	0.6641167		

$$EIR(T1, T2)=A+B \cdot T1+C \cdot T1^2+D \cdot T2+E \cdot T2^2+F \cdot T1 \cdot T2$$

Tabla c.5. Coeficientes del ajuste de la función EIR(T1, T2).

Régimen	A	B	C	D	E	F
Refrigeración	-1.063931	0.030658	-0.000127	0.015421	0.000049	-0.00021

$$CAP(T1, T2)=A+B \cdot T1+C \cdot T1^2+D \cdot T2+E \cdot T2^2+F \cdot T1 \cdot T2$$

Tabla c.6. Coeficientes del ajuste de la función CAP(T1, T2).

Régimen	A	B	C	D	E	F
Refrigeración	0.874030	-0.001142	0.000171	-0.002957	0.000010	-0.000059

A continuación se representan las curvas que caracterizan la variación del EER en función del factor de carga parcial para el caso de equipos autónomos en régimen de refrigeración.

Suponiendo que el equipo autónomo se encuentra trabajando en condiciones nominales, el EER actual del mismo se puede calcular en función del factor de carga parcial como:

$$EER_{ACTUAL} = EER_{NOM} \cdot \frac{fcp}{EIR(fcp)}$$

Concretamente lo que se muestra en la siguiente curva es el factor que corrige el EER cuando el equipo no trabaja a plena carga. Por ello esta curva se encuentra normalizada para un factor de carga parcial del 100% (fcp=1), en cuyo caso el factor corrector tiene valor unidad, lo que significa que el EER es igual al nominal.

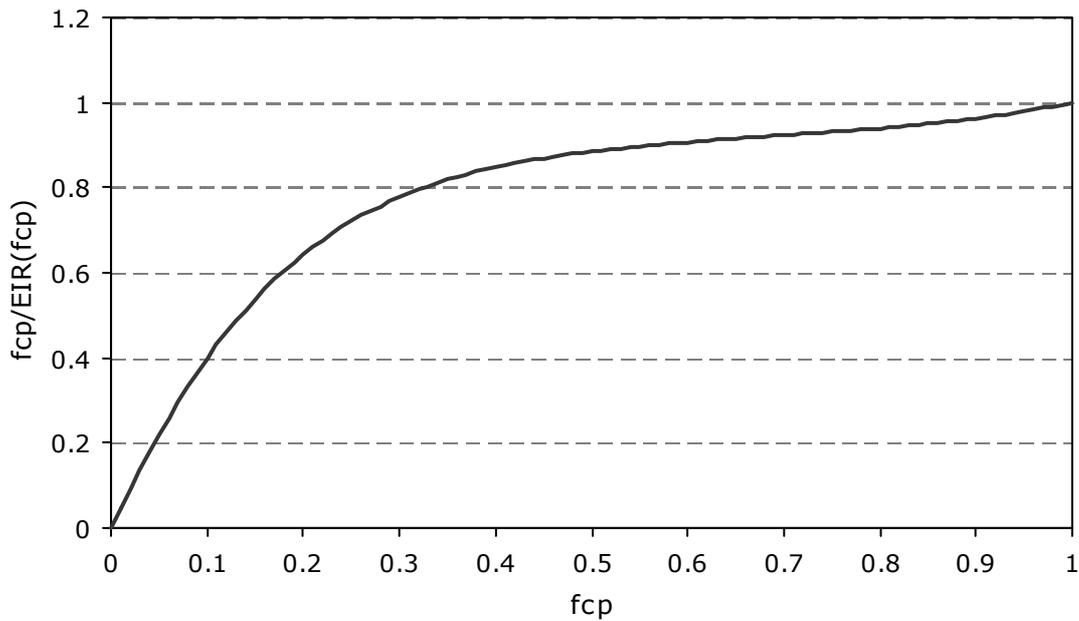


Figura c.3. Variación del EER del equipo autónomo en función del factor de carga parcial.

c.2.2. Calefacción (bomba de calor)

$$HEIR(fcp)=A+B \cdot fcp+C \cdot fcp^2+D \cdot fcp^3$$

Tabla c.7. Coeficientes del ajuste de la función HEIR(fcp).

Régimen	A	B	C	D
Calefacción	0.08565215	0.93881371	-0.1834361	0.15897022

$$HEIR(T1, T2)=A+B \cdot T1+C \cdot T1^2+D \cdot T2+E \cdot T2^2+F \cdot T1 \cdot T2$$

Tabla c.8. Coeficientes del ajuste de la función HEIR(T1, T2).

Régimen	A	B	C	D	E	F
Calefacción	2.314321	0.0000	0.0000	-0.043743	0.000336	0.0000

$$CAP(T1, T2)=A+B \cdot T1+C \cdot T1^2+D \cdot T2+E \cdot T2^2+F \cdot T1 \cdot T2$$

Tabla c.9. Coeficientes del ajuste de la función CAP(T1, T2).

Régimen	A	B	C	D	E	F
Calefacción	0.206811	0.0000	0.0000	0.016408	0.00001	0.0000

A continuación se representan las curvas que caracterizan la variación del COP en función del factor de carga parcial para el caso de equipos autónomos en régimen de calefacción (bomba de calor).

Suponiendo que el equipo autónomo se encuentra trabajando en condiciones nominales, el COP actual del mismo se puede calcular en función del factor de carga parcial como:

$$COP_{ACTUAL} = COP_{NOM} \cdot \frac{fcp}{HEIR(fcp)}$$

Concretamente lo que se muestra en la siguiente curva es el factor que corrige el COP cuando el equipo no trabaja a plena carga. Por ello esta curva se encuentra normalizada para un factor de carga parcial del 100% (fcp=1), en cuyo caso el factor corrector tiene valor unidad, lo que significa que el COP es igual al nominal.

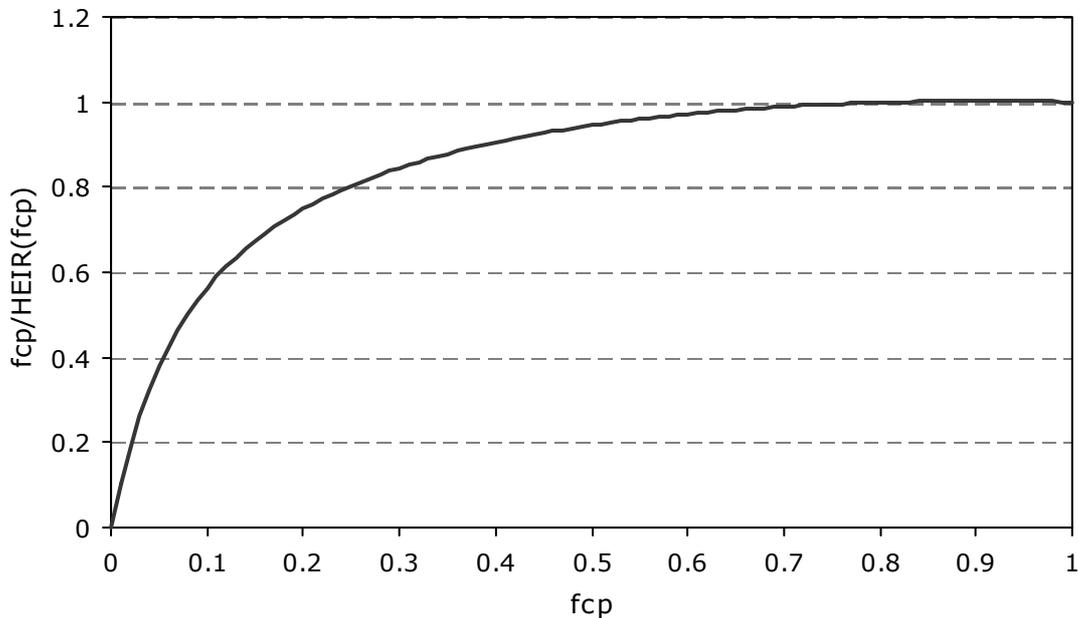


Figura c.4: Variación del COP del equipo autónomo como bomba de calor en función del factor de carga parcial.

ANEXO D. DESCRIPCIÓN DE CASOS SIMULADOS

d.1. Programa de simulación. DOE2.2

El programa utilizado para la obtención de las cargas, las demandas y los consumos de energía es el DOE2-2 en su versión 4.1j (2004).

d.2. Descripción de los edificios

En los siguientes apartados se describirá la geometría, calidades térmicas y condiciones funcionales y operacionales del edificio seleccionado para el presente trabajo.

d.2.1. Edificio residencial unifamiliar: Vivienda adosada

Se trata de un edificio de viviendas adosado constituido por dos plantas y un semisótano no acondicionado. El semisótano está destinado a garaje y trastero. En la planta baja se sitúa el salón, la cocina, el aseo y el recibidor, el aseo y la cocina se han unido en un único espacio ya que ambos poseen la misma orientación y se han considerado no acondicionados. En la planta primera se encuentran cuatro dormitorios, un baño y el distribuidor. Al tratarse de una vivienda adosada sólo posee dos fachadas al exterior, la orientación de ambas es norte y sur.

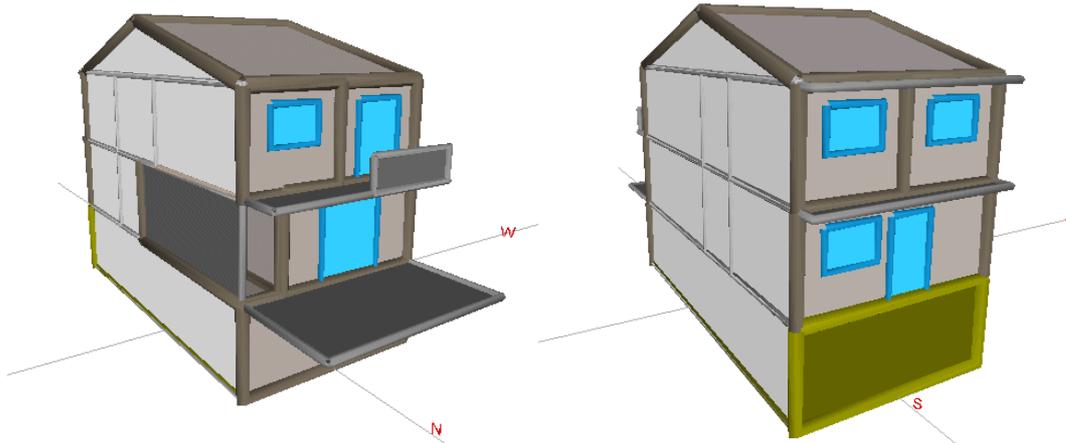


Figura d.1: Vista en tres dimensiones de la fachada norte (izquierda) y sur (derecha) de la vivienda adosada.

Geometría y zonificación

Planta	Espacio	Área (m ²)	Altura (m)	Localización	Tipo	Descripción
PLANTA_0-	ESP_0-01	57.50	2.40	Todas	NA	Sótano
PLANTA_0+	ESP_0+01	16.90	2.55	Sur	NA	Cocina y Aseo
PLANTA_0+	ESP_0+02	9.81	2.55	Interna	NA	Recibidor
PLANTA_0+	ESP_0+03	24.58	2.55	Norte	A	Salón
PLANTA_1+	ESP_1+01	8.21	2.55	Sur	A	Dormitorio
PLANTA_1+	ESP_1+02	8.68	2.55	Sur	A	Dormitorio
PLANTA_1+	ESP_1+03	7.28	2.55	Interna	NA	Distribuidor
PLANTA_1+	ESP_1+04	5.75	2.55	Interna	NA	Baño
PLANTA_1+	ESP_1+05	14.97	2.55	Norte	A	Dormitorio
PLANTA_1+	ESP_1+06	12.60	2.55	Norte	A	Dormitorio
PLANTA_2+	ESP_2+01	57.50	0.8	Todas	NA	Desván no hab.
Total		166.28				

Tabla d.1: Características geométricas de los espacios de la vivienda adosada.

En la tabla anterior aparecen los espacios que se han considerado en el edificio, la planta a la que pertenecen, el área y el tipo de espacio (NA: No acondicionado, A: Acondicionado) y una breve descripción del uso del servicio. El área total de suelo ha sido calculada sin incluir el área del desván no habitable bajo cubierta. De los 166.28 m² totales del edificio 96.88 m² (58.3 %) son no acondicionados y 69.4 m² (41.7 %) son acondicionados.

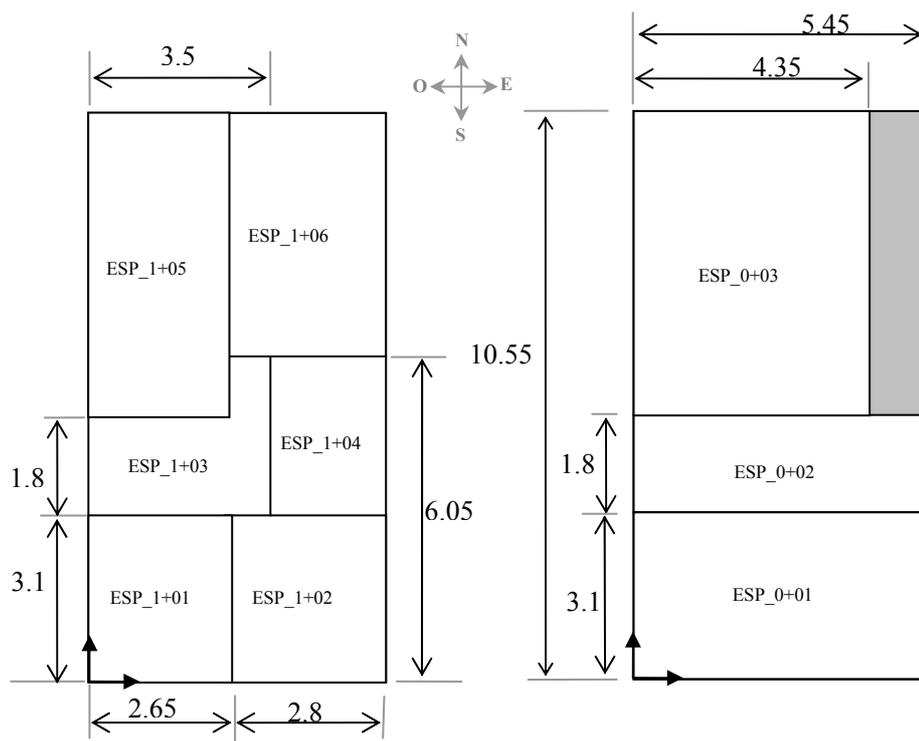


Figura d.2: Plano acotado de las plantas baja (0+) y primera (1+) de la vivienda adosada.

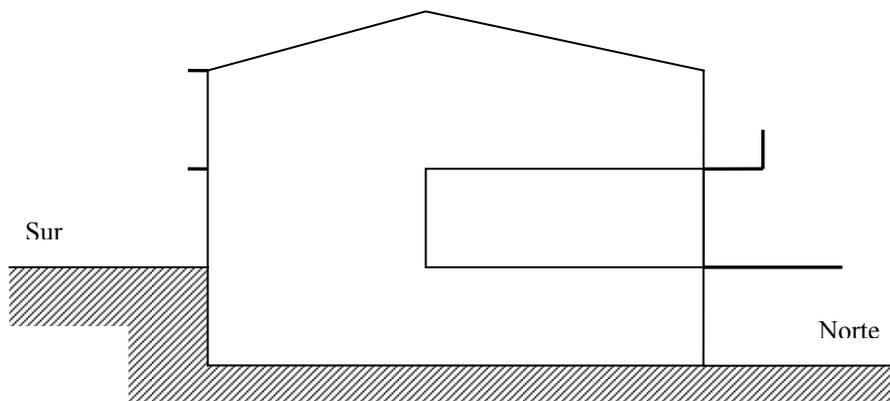


Figura d.3: Plano de alzado lateral de la vivienda adosada.

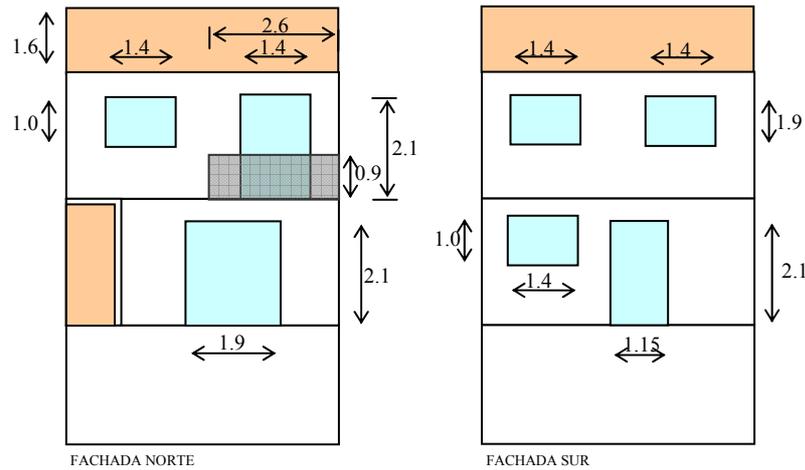


Figura d.4: Plano de alzados de la vivienda adosada.

Composición de los cerramientos

Fachadas exteriores, absorptividad exterior 0.7 (de fuera a dentro) – “Muro exterior”					
Descripción	Espesor (m)	Conduct. (W/mK)	Densidad (kg/m ³)	Calor Esp. (J/kgK)	Resistencia (m ² K/W)
Ladrillo macizo(Fabrica)	0.11	0.8700	1800	1,380.0	0.1264
Mortero de cemento	0.01	1.4000	2000	1,050.0	0.0071
Poliestireno expandido Tipo II	0.076	0.0430	12.0	1,450.0	
Ladrillo hueco(Fabrica)	0.03	0.4900	1200	920.0	0.0612
Enlucido de yeso	0.01	0.3000	800.0	920.0	0.0333

Muro en contacto con el Terreno (de fuera a dentro) – “Forjado terreno”					
Descripción	Espesor (m)	Conduct. (W/mK)	Densidad (kg/m ³)	Calor Esp. (J/kgK)	Resistencia (m ² K/W)
Encanchado	0.15	1.4	2000	1000	0.1071
Hormigón armado	0.02	0.09	305	1050	0.2222
Mortero cemento	0.02	1.4	2000	1050	0.0143
Poliestireno expandido Tipo II	0.076	0.0430	12.0	1,450.0	1.7674
Terrazo	0.02	1.16	2000	1050	0.0172

Forjado sobre el garaje (de arriba a abajo) – “Forjado espacio NA”					
Descripción	Espesor (m)	Conduct. (W/mK)	Densidad (kg/m ³)	Calor Esp. (J/kgK)	Resistencia (m ² K/W)
Terrazo	0.02	1.16	2000	1050	0.017
Hormigón armado	0.02	1.4	2000	1050	0.014
Poliestireno expandido Tipo II	0.076	0.0430	12.0	1,450.0	
Forjado ceramico	0.11	0.4	1250	880	0.2750
Enlucido yeso	0.015	0.3000	800.0	920.0	0.0500

Cubierta (de arriba abajo), absortividad exterior 0.7 – “Cub incl lad hueco/h Aisl 3cm”					
Descripción	Espesor (m)	Conduct. (W/mK)	Densidad (kg/m³)	Calor Esp. (J/kgK)	Resistencia (m²K/W)
Teja arcilla	0.1	1.0	2000	800	0.1000
Impermeabilizante	.003	0.23	1000	1680	0.0130
Mortero de cemento	0.01	1.4	2000	1050	0.0071
Ladrillo hueco(fabrica)	0.04	0.4900	1200	920.0	0.0816
Camara aire horizontal (>15 cm)					0.16
Poliestireno expandido Tipo II	0.076	0.0430	12.0	1,450.0	1.7674
Forjado de hormigón	0.21	1.38	1500	1000	0.1522
Enlucido de yeso	0.01	0.3000	800.0	920.0	0.0333

Tabla d.2: Características térmicas de los cerramientos opacos de la vivienda adosada.

La separación entre espacios está constituida por un tabique con coeficiente global de transferencia $U = 3.317 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ y las puertas al exterior de la planta baja pueden considerarse con un $U = 1.876 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

Acristalamientos

Los marcos son de un espesor muy pequeño comparado con el área total del vidrio y Las ventanas no cuentan con ningún tipo de cortina, persiana o protección solar, excepto durante el periodo de verano (junio a septiembre) en el cual se considera que en todas las ventanas se colocan cortinas / persianas que reducen la ganancia solar a través de ventanas a un 30%.

Características ocupacionales y funcionales

La siguiente tabla muestra las características de ocupación, equipamiento diverso, iluminación e infiltración de todos los espacios de la vivienda:

Espacio	Ocupación (m²/persona)	Sensible ocupante (W/persona)	Latente ocupante (W/persona)	Equipos (W/m²)	Iluminac. (W/m²)	Infiltrac. (rnv/h)
ESP_0-01	300	71.79	45.42	4.40	4.40	0.5
ESP_2+01	-	-	-	0	0	0.5
Resto	23.23	71.79	45.42	4.40	4.40	0.5

Tabla d.3: Características ocupacionales y funcionales de la vivienda adosada.

El desván (ESP_2+01) no tiene cargas internas de ningún tipo y el garaje (ESP_0-01) tiene una carga de ocupación menor que el resto de la vivienda.

Las cargas internas para el resto de los espacios de la vivienda debidas a ocupación, iluminación y equipo eléctrico, varían durante el día en porcentaje respecto al valor nominal indicado en la tabla anterior. Está variación horaria y los valores nominales han sido tomados del Código Técnico de la Edificación para edificios residenciales. La carga interna (ocupación + iluminación + equipos) media para los espacios habitables es de $5 \text{ W}/\text{m}^2$ de sensible y $1.16 \text{ W}/\text{m}^2$ de latente

La infiltración se considera constante e igual a 0.5 renovaciones/hora para todas las horas del día para el desván y el garaje. El nivel de infiltración para el resto de los espacios cambia con la calidad de las carpinterías pero durante las noches de verano se ha considerado que el efecto de apertura de ventanas aumenta el caudal de infiltración a 4 rnv/h (hipótesis tomada del Código Técnico de la edificación para edificios residenciales).

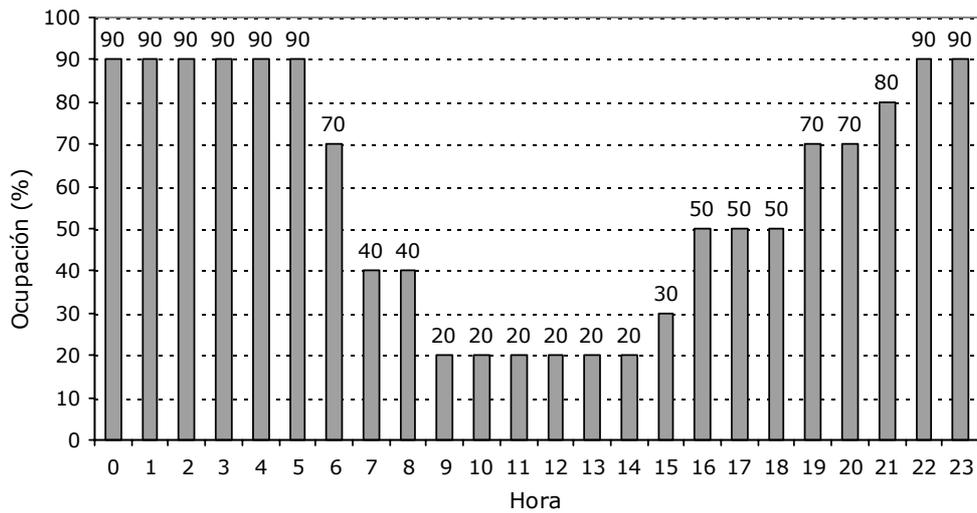


Figura d.5: Variación horaria de la ocupación en la vivienda adosada.

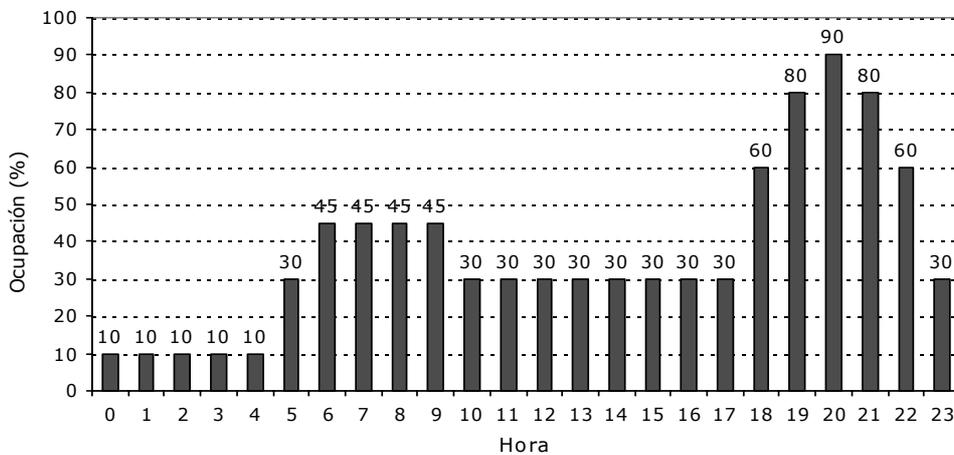


Figura d.6: Variación horaria de la carga debida a iluminación y equipos en la vivienda adosada.

d.2.2. Edificio residencial multifamiliar: Vivienda en bloque

Se trata de un bloque de viviendas de tres plantas que descansa sobre una planta baja destinada a uso comercial y a garajes que se considera no a condicionada. El bloque está compuesto por un total de seis viviendas. Cada planta consta de dos viviendas de idéntica distribución entorno a un patio de luz al que asoman tres de los cuatro dormitorios y el descansillo de la escalera de cada planta. Cada vivienda consta de salón, cocina, baño, aseo, cuatro dormitorios y un

pasillo de distribución. Por tener la misma funcionalidad y la misma orientación el aseo y el baño se han modelado como un único espacio, así como los dos dormitorios que asoman al patio de luz.

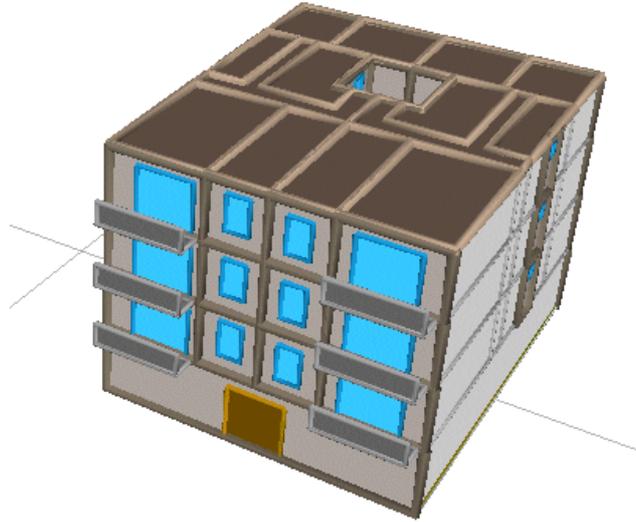


Figura d.7: Vista en tres dimensiones de la fachada este de la vivienda en bloque.

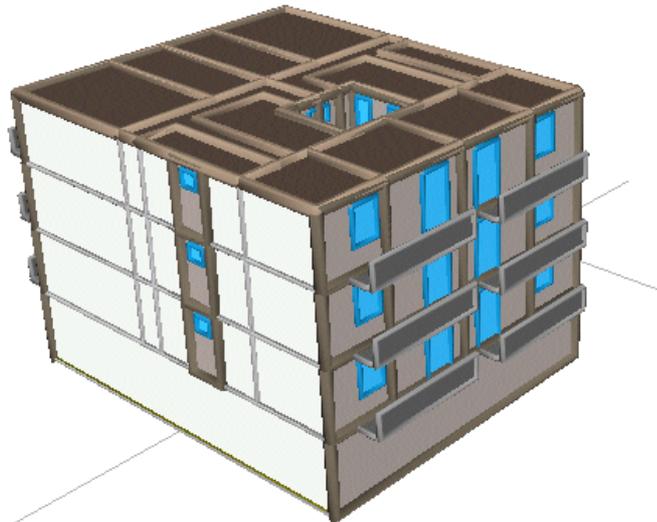


Figura d.8: Vista en tres dimensiones de la fachada oeste de la vivienda en bloque.

Geometría y zonificación

En la siguiente tabla aparecen los espacios que se han considerado en el edificio, la planta a la que pertenecen, el área y el tipo de espacio (NA: No acondicionado, A: Acondicionado) y una breve descripción del uso del servicio.

Planta	Espacio	Área (m ²)	Altura (m)	Localización	Tipo	Descripción
PLANTA_0+	ESP_0+01	146.30	2.5	Todas	NA	Locales y portal
PLANTA_1+	ESP_1+01	6.96	2.30	Suroeste	A	Dormitorio
PLANTA_1+	ESP_1+02	5.59	2.30	Sur	NA	Aseo y trastero
PLANTA_1+	ESP_1+03	9.22	2.30	Interior	NA	Zona de paso
PLANTA_1+	ESP_1+04	17.68	2.30	Sureste	A	Salón
PLANTA_1+	ESP_1+05	8.99	2.30	Oeste	A	Dormitorio
PLANTA_1+	ESP_1+06	9.44	2.30	Interior	A	Dormitorio
PLANTA_1+	ESP_1+07	10.92	2.30	Este	NA	Cocina
PLANTA_1+	ESP_1+08	8.99	2.30	Oeste	A	Dormitorio
PLANTA_1+	ESP_1+09	9.44	2.30	Interior	A	Dormitorio
PLANTA_1+	ESP_1+10	9.22	2.30	Interior	NA	Zona de paso
PLANTA_1+	ESP_1+11	10.92	2.30	Este	NA	Cocina
PLANTA_1+	ESP_1+12	6.96	2.30	Noroeste	A	Dormitorio
PLANTA_1+	ESP_1+13	5.59	2.30	Norte	NA	Aseo y trastero
PLANTA_1+	ESP_1+14	17.68	2.30	Noreste	A	Salón
PLANTA_2+	ESP_2+01	6.96	2.30	Suroeste	A	Dormitorio
PLANTA_2+	ESP_2+02	5.59	2.30	Sur	NA	Aseo y trastero
PLANTA_2+	ESP_2+03	9.22	2.30	Interior	NA	Zona de paso
PLANTA_2+	ESP_2+04	17.68	2.30	Sureste	A	Salón
PLANTA_2+	ESP_2+05	8.99	2.30	Oeste	A	Dormitorio
PLANTA_2+	ESP_2+06	9.44	2.30	Interior	A	Dormitorio
PLANTA_2+	ESP_2+07	10.92	2.30	Este	NA	Cocina
PLANTA_2+	ESP_2+08	8.99	2.30	Oeste	A	Dormitorio
PLANTA_2+	ESP_2+09	9.44	2.30	Interior	A	Dormitorio
PLANTA_2+	ESP_2+10	9.22	2.30	Interior	NA	Zona de paso
PLANTA_3+	ESP_2+11	10.92	2.30	Este	NA	Cocina
PLANTA_3+	ESP_2+12	6.96	2.30	Noroeste	A	Dormitorio
PLANTA_3+	ESP_2+13	5.59	2.30	Norte	NA	Aseo y trastero
PLANTA_3+	ESP_2+14	17.68	2.30	Noreste	A	Salón
PLANTA_3+	ESP_3+01	6.96	2.30	Suroeste	A	Dormitorio
PLANTA_3+	ESP_3+02	5.59	2.30	Sur	NA	Aseo y trastero
PLANTA_3+	ESP_3+03	9.22	2.30	Interior	NA	Zona de paso
PLANTA_3+	ESP_3+04	17.68	2.30	Sureste	A	Salón
PLANTA_3+	ESP_3+05	8.99	2.30	Oeste	A	Dormitorio
PLANTA_3+	ESP_3+06	9.44	2.30	Interior	A	Dormitorio
PLANTA_3+	ESP_3+07	10.92	2.30	Este	NA	Cocina
PLANTA_3+	ESP_3+08	8.99	2.30	Oeste	A	Dormitorio
PLANTA_3+	ESP_3+09	9.44	2.30	Interior	A	Dormitorio
PLANTA_3+	ESP_3+10	9.22	2.30	Interior	NA	Zona de paso
PLANTA_3+	ESP_3+11	10.92	2.30	Este	NA	Cocina
PLANTA_3+	ESP_3+12	6.96	2.30	Noroeste	A	Dormitorio
PLANTA_3+	ESP_3+13	5.59	2.30	Norte	NA	Aseo y trastero
PLANTA_3+	ESP_3+14	17.68	2.30	Noreste	A	Salón
Total		559				

Tabla d.4: Características geométricas de los espacios de la vivienda en bloque.

De los 559 m² totales del edificio 300.58 m² (53.7 %) son no acondicionados y 258.4 m² (46.3 %) son acondicionados.

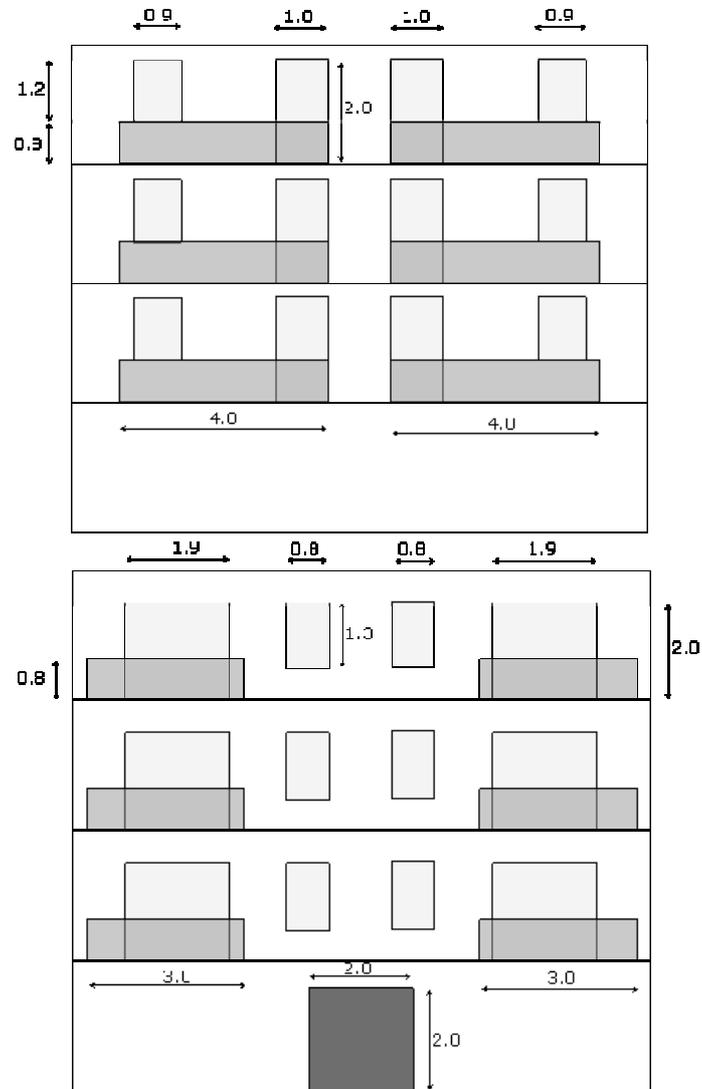


Figura d.10: Plano de alzados de la vivienda en bloque

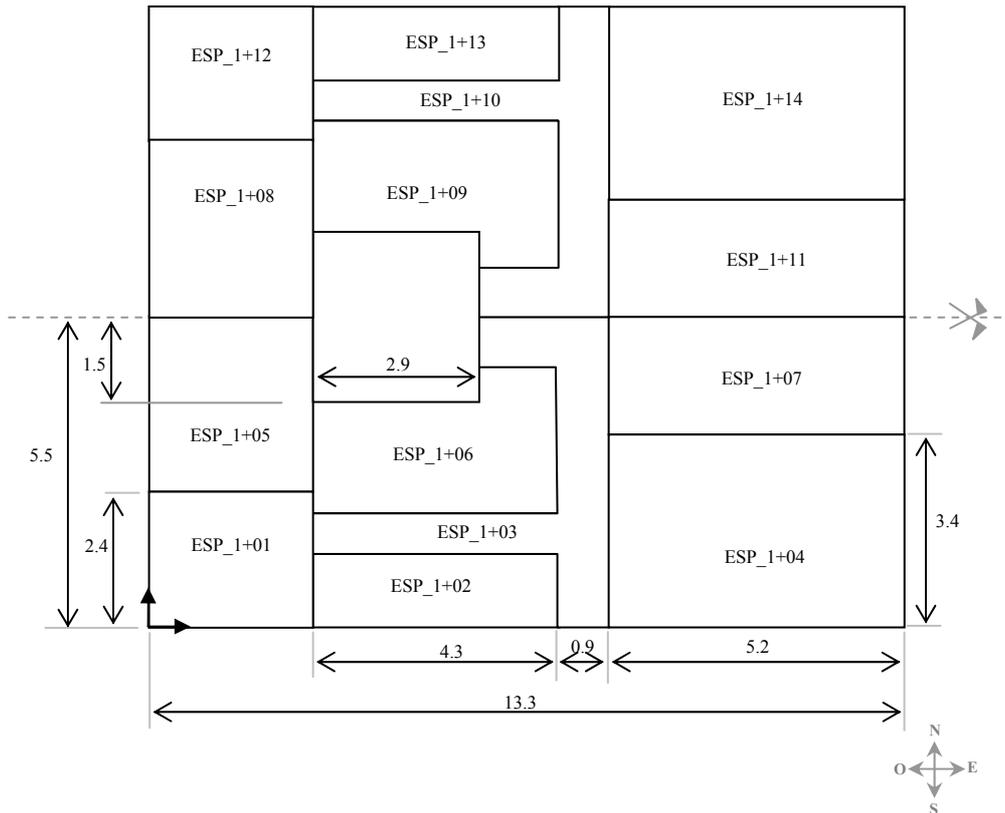


Figura d.9: Plano acotado de las plantas primera (1+), segunda (2+) y tercera (3+) de la vivienda en bloque.

Composición de los cerramientos

Fachadas exteriores, absorptividad exterior 0.7 (de fuera a dentro) – “Muro exterior”					
Descripción	Espesor (m)	Conduct. (W/mK)	Densidad (kg/m ³)	Calor Esp. (J/kgK)	Resistencia (m ² K/W)
Ladrillo macizo(Fabrica)	0.11	0.8700	1800	1,380.0	0.1264
Mortero de cemento	0.01	1.4000	2000	1,050.0	0.0071
Poliestireno expandido Tipo II	0.076	0.0430	12.0	1,450.0	
Ladrillo hueco(Fabrica)	0.03	0.4900	1200	920.0	0.0612
Enlucido de yeso	0.01	0.3000	800.0	920.0	0.0333

Muro en contacto con el Terreno (de fuera a dentro) – “Forjado terreno”					
Descripción	Espesor (m)	Conduct. (W/mK)	Densidad (kg/m ³)	Calor Esp. (J/kgK)	Resistencia (m ² K/W)
Encanchado	0.15	1.4	2000	1000	0.1071
Hormigón armado	0.02	0.09	305	1050	0.2222
Mortero cemento	0.02	1.4	2000	1050	0.0143
Poliestireno expandido Tipo II	0.076	0.0430	12.0	1,450.0	1.7674
Terrazo	0.02	1.16	2000	1050	0.0172

Forjado sobre el garaje (de arriba a abajo) – “Forjado espacio NA”					
Descripción	Espesor (m)	Conduct. (W/mK)	Densidad (kg/m ³)	Calor Esp. (J/kgK)	Resistencia (m ² K/W)
Terrazo	0.02	1.16	2000	1050	0.017
Hormigón armado	0.02	1.4	2000	1050	0.014
Poliestireno expandido Tipo II	0.076	0.0430	12.0	1,450.0	
Forjado ceramico	0.11	0.4	1250	880	0.2750
Enlucido yeso	0.015	0.3000	800.0	920.0	0.0500

Cubierta (de arriba abajo), absortividad exterior 0.7 – “Forj horm plano Aisl 3cm”					
Descripción	Espesor (m)	Conduct. (W/mK)	Densidad (kg/m ³)	Calor Esp. (J/kgK)	Resistencia (m ² K/W)
Baldosin catalán (plaquetas)	0.02	1.05	2000	880	0.0190
Mortero de cemento	0.01	1.4	2000	1050	0.0071
Poliestireno expandido Tipo II	0.076	0.0430	12.0	1,450.0	1.7674
Láminas bituminosas	0.003	0.19	1100	1680	0.0158
Mortero de cemento	0.01	1.4	2000	1050	0.0071
Hormigón celular sin áridos	0.02	.09	305	1050	0.2222
Forjado de hormigón	0.21	1.38	1500	1000	0.1522
Enlucido de yeso	0.01	0.3000	800.0	920.0	0.0333

Tabla d.5: Características térmicas de los cerramientos opacos de la vivienda en bloque.

La separación entre espacios está constituida por un tabique con coeficiente global de transferencia $U = 3.317 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ y las puertas al exterior de la planta baja pueden considerarse con un $U = 1.876 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

Acristalamientos

Los marcos son de un espesor muy pequeño comparado con el área total del vidrio y Las ventanas no cuentan con ningún tipo de cortina, persiana o protección solar, excepto durante el periodo de verano (junio a septiembre) en el cual se considera que en todas las ventanas se colocan cortinas / persianas que reducen la ganancia solar a través de ventanas a un 30%.

Características ocupacionales y funcionales

La siguiente tabla muestra las características de ocupación, equipamiento diverso, iluminación e infiltración de todos los espacios de la vivienda:

Espacio	Ocupación (m ² /persona)	Sensible ocupante (W/persona)	Latente ocupante (W/persona)	Equipos (W/m ²)	Iluminac. (W/m ²)	Infiltrac. (rnv/h)
ESP 0+01	23.23	71.79	45.42	4.40	4.40	0.5
Resto	23.23	71.79	45.42	4.40	4.40	0.5

Tabla d.6: Características ocupacionales y funcionales de la vivienda en bloque.

El espacio de la planta baja destinado a zona comercial (ESP_0+01) se ha considerado con la misma carga interna que las viviendas.

Las cargas internas para el resto de los espacios de la vivienda debidas a ocupación, iluminación y equipo eléctrico, varían durante el día en porcentaje respecto al valor nominal indicado en la tabla anterior. Está variación horaria y los valores nominales han sido tomados del Código Técnico de la Edificación para edificios residenciales. La carga interna (ocupación + iluminación + equipos) media para los espacios habitables es de $5 \text{ W}/\text{m}^2$ de sensible y $1.16 \text{ W}/\text{m}^2$ de latente

La infiltración se considera constante e igual a 0.5 renovaciones/hora para todas las horas del día para el espacio ESP_0+01. El nivel de infiltración para el resto de los espacios cambia con la calidad de las carpinterías pero durante las noches de verano se ha considerado que el efecto de apertura de ventanas aumenta el caudal de infiltración a 4 rnv/h (hipótesis tomada del Código Técnico de la edificación para edificios residenciales).

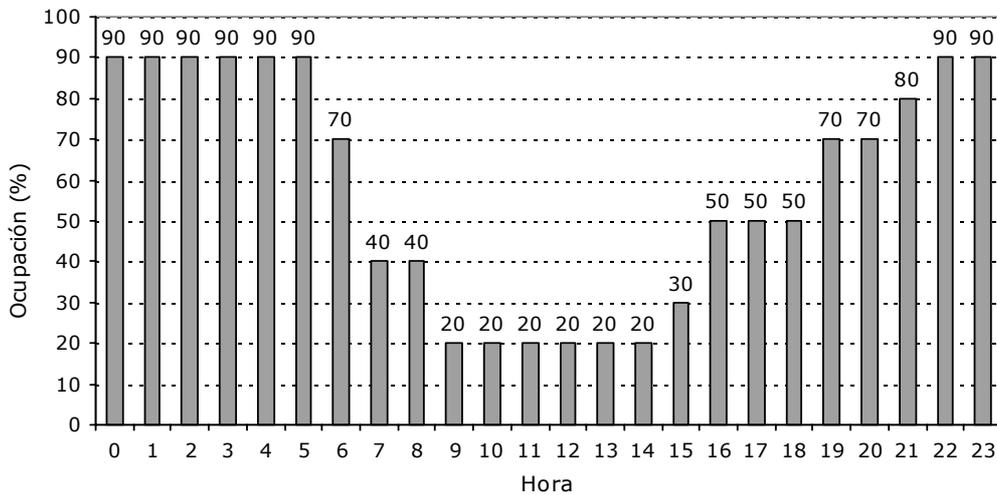


Figura d.11: Variación horaria de la ocupación en la vivienda en bloque.

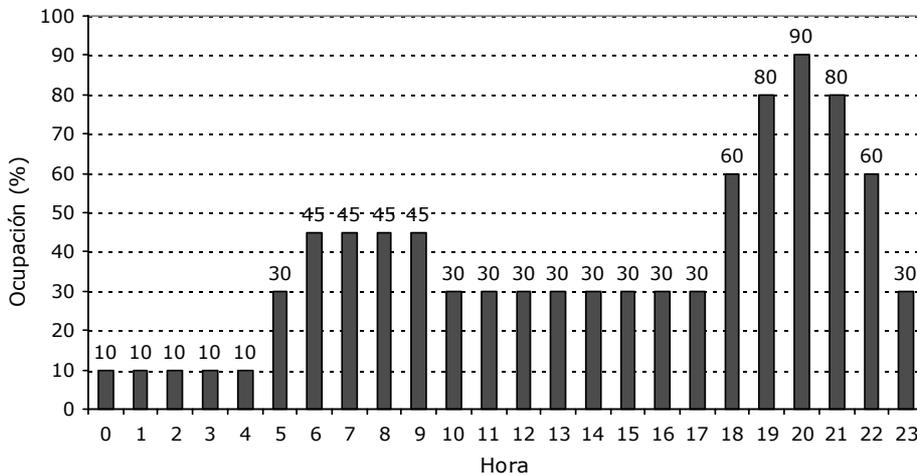


Figura d.12: Variación horaria de la carga debida a iluminación y equipos en la vivienda en bloque.

d.3. Definición de los sistemas

Procederemos en esta apartado a la descripción de los sistemas de climatización y ACS que serán simulados en cada uno de los edificios.

Se han seleccionado los tipos de sistemas más habituales en el sector residencial.

Calefacción:

- Eléctrica: Sistema de calefacción por efecto Joule, con un rendimiento del 98%.
- Caldera: Calefacción por radiadores con caldera.
- Bomba de calor a-a: Calefacción por bomba de calor aire-aire con un COP en condiciones Eurovent (Temperatura seca interior 20°C, Temperatura seca exterior 7°C, Temperatura de bulbo húmedo exterior 6°C)
- Las calderas para el caso del bloque pueden ser individuales (ind.) una por vivienda o centralizadas (cent.) una para todo el bloque.

Las calderas en los dos edificios residenciales pueden ser mixtas, es decir, suministran servicio de calefacción y A.C.S.

Para las bombas de calor aire-aire existe la posibilidad de que sean individuales (ind.), es decir, un sistema compacto, split o multisplit con un condensador en cada espacio a calefactor controlado por un termostato en dicho espacio, puede ser un solo equipo multisplit o varios equipos compactos o split, ó centralizadas, es decir, un solo equipo compacto o split por vivienda que suministra aire a cada uno de los espacios a través de una pequeña red de conductos. El control de la temperatura de impulsión se realiza a través de un termostato colocado en el salón y por tanto en muchas ocasiones se produce la salida de condiciones de confort de las restantes zonas acondicionadas.

Refrigeración:

- Autónomo a-a : Sistema autónomo en expansión directa aire-aire con un EER en condiciones Eurovent (Temperatura seca interior 27°C, Temperatura de bulbo húmedo interior 19°C, Temperatura seca exterior 35°C)

El sistema de refrigeración puede ser individual (ind.), es decir, un sistema compacto, split o multisplit con un evaporador en cada espacio a refrigerar controlado por un termostato en dicho espacio, puede ser un solo equipo multisplit o varios equipos compactos o split, ó centralizado, es decir, un solo equipo compacto o split por vivienda que suministra aire a cada uno de los espacios a través de una pequeña red de conductos. El control de la temperatura de impulsión se realiza a través de un termostato colocado en el salón y por tanto en muchas

ocasiones se produce la salida de condiciones de confort de las restantes zonas acondicionadas.

Tanto los sistemas autónomos como los sistemas de bomba de calor se consideran sin aporte de aire exterior.

d.4. Estados de carga parcial

A continuación se muestran los datos relativos a la distribución infrecuencias del grado de carga parcial al que quedan sometidos los sistemas simulados en determinadas circunstancias.

Estos resultados han sido empleados para ilustrar la metodología propuesta para la estimación de potenciales de mejora debido a cambios en los equipos desarrollada en el capítulo 5.

Tabla d.7. Frecuencia observada de caldera dentro de cada rango de carga parcial (Sevilla)

Clase	Rango de carga parcial	Adosada	Bloque
1	0-10%	30.11%	27.41%
2	10-20%	25.76%	27.49%
3	20-30%	21.77%	21.30%
4	30-40%	10.21%	10.83%
5	40-50%	4.99%	5.01%
6	50-60%	3.05%	2.87%
7	60-70%	1.94%	2.36%
8	70-80%	0.94%	1.47%
9	80-90%	0.65%	0.52%
10	90-100%	0.47%	0.66%
11	>100%	0.12%	0.07%

Tabla d.8. Frecuencia observada de caldera sobredimensionada dentro de cada rango de carga parcial (Sevilla)

Clase	Rango de carga parcial	Adosada	Bloque
1	0-10%	35.49%	35.62%
2	10-20%	35.25%	33.19%
3	20-30%	16.75%	17.33%
4	30-40%	6.11%	6.56%
5	40-50%	3.53%	3.39%

6	50-60%	1.70%	2.51%
7	60-70%	0.88%	0.81%
8	70-80%	0.29%	0.59%
9	80-90%	0.00%	0.00%
10	90-100%	0.00%	0.00%
11	>100%	0.00%	0.00%

Tabla d.9. Frecuencia observada de autónomo, refrigeración, dentro de cada rango de carga parcial (Sevilla)

Clase	Rango de carga parcial	Adosada	Bloque
1	0-10%	4.14%	1.68%
2	10-20%	9.63%	6.12%
3	20-30%	12.55%	8.38%
4	30-40%	11.55%	12.07%
5	40-50%	11.13%	13.17%
6	50-60%	11.48%	12.13%
7	60-70%	11.55%	14.79%
8	70-80%	11.13%	16.87%
9	80-90%	12.98%	11.61%
10	90-100%	3.78%	3.12%
11	>100%	0.07%	0.06%

Tabla d.10. Frecuencia observada de autónomo sobredimensionado, refrigeración, dentro de cada rango de carga parcial (Sevilla)

Clase	Rango de carga parcial	Adosada	Bloque
1	0-10%	6.28%	3.12%
2	10-20%	15.06%	8.67%
3	20-30%	15.85%	14.39%
4	30-40%	13.78%	17.51%
5	40-50%	15.63%	17.51%
6	50-60%	14.28%	19.54%
7	60-70%	15.99%	16.99%
8	70-80%	3.14%	2.25%
9	80-90%	0.00%	0.00%
10	90-100%	0.00%	0.00%
11	>100%	0.00%	0.00%