

Proyecto Fin de Grado

Ingeniería de la Energía

Optimización de Sistema de almacenamiento de Energía Termoeléctrico integrado con Renovables

Autor: Andrés Carro Paulete

Tutor: Ricardo Chacartegui Ramírez

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

Sevilla, 2017



Proyecto Fin de Carrera
Ingeniería de la Energía

Optimización de Sistema de almacenamiento de Energía Termoeléctrico integrado con Renovables

Autor:

Andrés Carro Paulete

Tutor:

Ricardo Chacartegui Ramírez

Profesor titular

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

Sevilla, 2017

Proyecto Fin de Grado: Optimización de Sistema de almacenamiento de Energía
Termoeléctrico integrado con Renovables

Autor: Andrés Carro Paulete
Tutor: Ricardo Chacartegui Ramírez

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2017

El Secretario del Tribunal

Índice

Índice de Tablas	10
Índice de Figuras	13
Índice de Ecuaciones.....	16
Índice de Código.....	17
Notación	18
1. Introducción	22
1.1 Principio del sistema	22
1.2 Integración de los ciclos de carga y descarga	22
1.3 Almacenamiento.....	23
2. Caso base: ciclo transcrito de dióxido de carbono.....	24
2.1 Descripción del ciclo.....	24
2.1.1 Ciclo de carga	24
2.1.2 Ciclo de descarga	25
2.2 Fluidos de trabajo.....	25
2.2.1 Dióxido de carbono	25
2.2.2 Agua	26
2.3 Representación del ciclo	27
2.3.1 Equipos.....	27
2.3.2 Presiones del dióxido de carbono	28
2.3.3 Parámetros del agua caliente.....	28
2.3.4 Parámetros del hielo	28
2.3.5 Representación del ciclo	30
2.4 Balance de energía	32
2.4.1 Intercambio de calor en el ciclo de carga: foco caliente	32
2.4.2 Carga del foco frío: evaporador de CO ₂	34
2.4.3. Diagrama T-Q en el ciclo de carga.....	36
2.4.4 Intercambio de calor en la descarga: foco caliente.....	37
2.4.5 Intercambio de calor en la descarga del foco frío: condensador.....	38
2.4.6 Diagrama T-Q en el ciclo de descarga	40
2.5 Trabajo y calor.....	41
2.6 Eficiencia.....	41
3. Optimización del ciclo de CO ₂ y agua.	43
3.1 Balance de masas.....	43
3.1.1 Ciclo de carga.....	43
3.1.2 Ciclo de descarga	44

3.1.3 Resultados.....	45
3.2 Análisis del ciclo de carga	48
3.2.1 Presión alta de carga	48
3.2.2 Presión baja de carga	51
3.3 Optimización del ciclo de descarga	55
3.3.1 Presión alta de descarga	55
3.3.2 Presión baja de descarga	58
4. Ciclo de dióxido de carbono con refrigeración adicional de amoníaco durante la carga.	62
4.1 Configuración de la planta.....	62
4.1.1 Ciclo de carga.....	62
4.2 Fluido de trabajo: Amoníaco.....	63
4.3 Descripción de los ciclos	64
4.3.1 Equipos de la planta	64
4.3.2 Parámetros de presión.....	64
4.3.3 Nuevos parámetros en el depósito de hielo	65
4.3.4 Depósitos de agua caliente.....	66
4.3.5 Diagramas T-s	68
4.4 Balance de energía	69
4.4.1 Carga de los depósitos de agua caliente	69
4.4.2 Regeneración en la carga.....	72
4.4.3 Carga del depósito de hielo	74
4.4.5 Descarga de los depósitos de agua caliente.....	79
4.4.7 Descarga del depósito de hielo.....	83
4.5 Trabajo y calor.....	85
4.5.1 Ciclo de CO ₂ en la carga.....	85
4.5.2 Ciclo de NH ₃	85
4.5.3 Ciclo de CO ₂ en la descarga	86
4.6 Eficiencia.....	86
5. Configuración alternativa de la planta con aporte térmico.....	88
5.1 Aporte térmico.....	88
5.1.1 Integración del sistema de almacenamiento	88
5.1.2 Central termosolar	88
5.1.3 Fluido térmico	89
5.2 Configuración de la planta.....	89
5.2.1 Ciclo de carga.....	89
5.2.2 Descarga	90
5.3 Justificación.....	91

5.4 Descripción de los ciclos	92
5.4.1 Equipos de la planta	92
5.4.2 Parámetros de presión.....	92
5.4.3 Temperaturas en los depósitos de agua caliente	93
5.4.4 Temperaturas en el depósito de hielo	95
5.4.5 Diagramas T-s	97
5.5 Modos de funcionamiento	99
5.5.1 Ciclo de carga eléctrico.....	99
5.5.2 Ciclo de carga térmico	100
5.5.3 Ambos ciclos a la vez	101
5.5.4 Carga del depósito de hielo mediante el ciclo de NH ₃	102
5.5.5 Ciclo de descarga	103
5.6 Balance de energía	104
5.6.1 Carga del depósito principal de agua caliente.....	104
5.6.2 Recalentamiento	106
5.6.3 Carga del depósito agua caliente secundario.....	108
5.6.4 Regeneración en la carga	110
5.6.5 Carga del foco frío	112
5.6.7 Descarga del agua caliente.....	117
5.6.8 Descarga del hielo	121
5.6.9 Carga por la central termosolar.....	123
5.6.10 Carga de hielo extra.....	125
5.7 Trabajo y calor.....	126
5.7.1 Ciclo de CO ₂ en la carga.....	126
5.7.2 Ciclo de NH ₃ en la carga	126
5.7.3 Ciclo de CO ₂ en la descarga	127
5.8 Balance de energía	127
5.8.1 Horario de funcionamiento de la planta.....	127
5.8.2 Aporte térmico y descarga simultáneos.	128
5.8.3 Aporte térmico y descarga desfasados.	129
5.9 Eficiencia.....	130
6. Análisis económico	133
6.1 Inversión.....	133
6.2 Operación y mantenimiento.....	134
6.3 Balance de electricidad	135
6.3 Coste normalizado de la energía.....	136
7. Conclusiones	138

Referencias 140

Índice de Tablas

Tabla 1: Tabla comparativa del CO ₂ y otros fluidos. [1].....	26
Tabla 2: Comparativa del agua y otros medios de almacenamiento. [1]	26
Tabla 3: Rendimiento de los equipos en el ciclo básico [1]	27
Tabla 4: Valores de la presión en el ciclo básico. [1].....	28
Tabla 5: Estado inicial el agua caliente en el ciclo básico.	28
Tabla 6: Estado inicial del hielo en el ciclo básico.....	30
Tabla 7: Estado final del hielo en el ciclo básico.	30
Tabla 8: Parámetros de la carga del foco caliente en el ciclo básico.....	33
Tabla 9: Resultados de la carga del foco caliente en el ciclo básico.	34
Tabla 10: Parámetros de la carga del foco frío en el ciclo base.	35
Tabla 11: Resultados de la carga del foco frío en el caso base.	36
Tabla 12: Parámetros en la descarga del foco caliente en el ciclo básico.....	37
Tabla 13: Resultados de la carga del foco caliente en el ciclo básico.	38
Tabla 14: Parámetros de la descarga del foco frío en el ciclo básico.	38
Tabla 15: Resultados de la descarga del foco frío en el ciclo básico.....	39
Tabla 16: Calor y trabajo en el ciclo básico.....	41
Tabla 17: Rendimiento en el ciclo básico.....	42
Tabla 18: Influencia de la variación en la fracción másica del agua caliente en la carga.	44
Tabla 19: Influencia de la fracción másica del agua caliente en el ciclo de descarga..	45
Tabla 20: Fracción másica del agua caliente que optimiza el intercambio.	45
Tabla 21: Comparativa de resultados entre el ciclo básico y el ciclo básico con intercambio de calor optimizado.	47
Tabla 22: Rendimiento de los equipos en el caso base con refrigeración adicional con amoníaco durante la carga [1]	64
Tabla 23: Parámetros de presión en el ciclo base con refrigeración adicional con amoníaco durante la carga. [1]	64
Tabla 24: Estado intermedio en la carga del hielo en el ciclo básico con refrigeración adicional con amoníaco durante la carga.....	65
Tabla 25: Estado final en la carga del hielo en el ciclo básico con refrigeración adicional con amoníaco durante la descarga.	65
Tabla 26: Estado inicial en la carga del hielo en el ciclo básico con refrigeración adicional con amoníaco durante la descarga.	65
Tabla 27: Estado inicial en la carga del agua caliente en el ciclo básico con refrigeración adicional con amoníaco durante la carga.	66
Tabla 28: Estado del agua caliente en el depósito principal de agua caliente.	67
Tabla 29: Estado del agua caliente en el depósito secundario de agua caliente.	67
Tabla 30: Parámetros en la carga del agua caliente en el ciclo básico con refrigeración con amoníaco durante la carga.....	70
Tabla 31: Resultados de la carga del depósito principal de agua caliente en el ciclo básico con refrigeración adicional con amoníaco durante la carga.	71
Tabla 32: Resultados de la carga del depósito secundario de agua caliente en el ciclo básico con refrigeración adicional con amoníaco durante la carga.	72
Tabla 33: Parámetros en la regeneración en el ciclo de carga básico con refrigeración adicional con amoníaco durante la carga.....	73
Tabla 34: Resultados de la regeneración en el ciclo de carga básico con refrigeración adicional con amoníaco durante la carga.....	74

Tabla 35: Parámetros del intercambio hielo-CO2 en el ciclo básico con refrigeración con amoníaco durante la carga.....	75
Tabla 36: Resultados en el intercambio hielo-CO2 en el ciclo básico con refrigeración adicional con amoníaco durante la carga.....	76
Tabla 37: Parámetros en el intercambio hielo-amoníaco en el ciclo básico con refrigeración adicional con amoníaco durante la carga.	76
Tabla 38: Resultados del intercambio hielo-amoníaco en el ciclo básico con refrigeración adicional con amoníaco durante la carga.	77
Tabla 39: Parámetros en la regeneración en la descarga del ciclo básico con refrigeración adicional con amoníaco durante la carga.	78
Tabla 40: Resultados de la regeneración en la descarga del ciclo básico con refrigeración adicional con amoníaco durante la carga.	79
Tabla 41: Parámetros en la descarga del agua caliente en el ciclo básico con refrigeración adicional con amoníaco durante la descarga.	81
Tabla 42: Resultados de la descarga del depósito principal de agua caliente en el ciclo básico con refrigeración adicional con amoníaco durante la carga.	81
Tabla 43: Resultados de la descarga del depósito secundario de agua caliente en el ciclo básico con refrigeración adicional con amoníaco durante la descarga.....	83
Tabla 44: Parámetros en la descarga del hielo en el ciclo básico con refrigeración adicional con amoníaco durante la carga.....	84
Tabla 45: Resultados en la descarga del hielo en el ciclo básico con refrigeración adicional con amoníaco durante la carga.....	85
Tabla 46: Trabajo y calor del ciclo de CO2 durante la carga en el caso con refrigeración adicional con amoníaco.....	85
Tabla 47: Trabajo y calor del ciclo de NH3 durante la carga en el caso con refrigeración adicional con amoníaco.....	85
Tabla 48: Trabajo y calor en el ciclo de CO2 durante la descarga en el caso con refrigeración adicional con amoníaco.....	86
Tabla 49: Rendimientos en el caso base con refrigeración adicional de amoníaco.....	87
Tabla 50: Entrada y salida del fluido térmico de la central termosolar.....	89
Tabla 51: Rendimiento de los equipos en la configuración alternativa con aporte térmico.....	92
Tabla 52: Valores de presión en la configuración alternativa con aporte térmico.	93
Tabla 53: Estado del agua caliente en el depósito principal.....	94
Tabla 54: Estado del agua caliente en el depósito secundario.....	94
Tabla 55: Estado intermedio en la carga del hielo.....	95
Tabla 56: Estado final en la carga del hielo.....	96
Tabla 57: Estado inicial en la carga del hielo.	96
Tabla 58: Parámetros en la carga del depósito principal de agua caliente en la configuración alternativa con aporte térmico.....	105
Tabla 59: Resultados de la carga del depósito principal de agua caliente en la configuración alternativa con aporte térmico.....	106
Tabla 60: Parámetros en el recalentamiento de la configuración alternativa con aporte térmico.....	107
Tabla 61: Resultados en el recalentamiento de la configuración alternativa con aporte térmico.....	108
Tabla 62: Parámetros de la descarga del depósito secundario de agua caliente en la configuración alternativa con aporte térmico.....	108
Tabla 63: Resultados de la descarga del depósito secundario de agua caliente en la configuración alternativa con aporte térmico.....	109
Tabla 64: Comparativa del calor intercambiado en los depósitos de agua caliente...	110

Tabla 65: Parámetros en la regeneración en la carga de la configuración alternativa con aporte térmico.	110
Tabla 66: Resultados de la regeneración en la carga de la configuración alternativa con aporte térmico.	111
Tabla 67: Parámetros en el intercambio hielo-CO2 en la carga de la configuración alternativa con aporte térmico.	112
Tabla 68: Resultados del intercambio hielo-CO2 en la carga de la configuración alternativa con aporte térmico.	113
Tabla 69: Parámetros del intercambio hielo-amoníaco en la carga de la configuración alternativa con aporte térmico.	114
Tabla 70: Resultados del intercambio hielo-amoníaco en la carga de la configuración alternativa con aporte térmico.	115
Tabla 71: Parámetros de la regeneración en la descarga de la configuración alternativa con aporte térmico.	116
Tabla 72: Resultados de la regeneración en la descarga de la configuración alternativa con aporte térmico.	117
Tabla 73: Parámetros en la descarga del agua caliente en la configuración alternativa con aporte térmico.	118
Tabla 74: Parámetros de la descarga del depósito secundario de agua caliente en la configuración alternativa con aporte térmico.	119
Tabla 75: Resultados de la descarga del depósito principal de agua caliente en la configuración alternativa con aporte térmico.	120
Tabla 76: Resultados de la descarga del depósito secundario de agua caliente en la configuración alternativa con aporte térmico.	121
Tabla 77: Parámetros en la descarga de hielo en la configuración alternativa con aporte térmico.	121
Tabla 78: Resultados en la descarga de hielo en la configuración alternativa con aporte térmico.	122
Tabla 79: Parámetros en el ciclo de carga térmico en la configuración alternativa con aporte térmico.	123
Tabla 80: Parámetros en el ciclo de carga extra de hielo en la configuración alternativa con aporte térmico.	125
Tabla 81: Trabajo y calor del ciclo de CO2 durante la carga en la configuración alternativa con aporte térmico.	126
Tabla 82: Trabajo y calor en el ciclo de NH3 durante la carga en la configuración alternativa con aporte térmico.	126
Tabla 83: Trabajo y calor en el ciclo de CO2 durante la descarga en la configuración alternativa con aporte térmico.	127
Tabla 84: Precio de la electricidad con tarifa de discriminación horaria. [5].	128
Tabla 85: Rendimientos en la configuración alternativa con aporte térmico.	131
Tabla 86: Costes de inversión de la planta.	133
Tabla 87: Costes de operación y mantenimiento.	134
Tabla 88: Balance de gastos e ingresos por compra y venta de electricidad.	135
Tabla 89: Resumen de datos para el cálculo de LCOE.	136

Índice de Figuras

Ilustración 1: Representación esquemática del balance de energía de un sistema TEES con el ambiente como foco frío. [1]	22
Ilustración 2: Buena y mala integración entre el ciclo y los focos. [1]	23
Ilustración 3: Distribución de la planta durante carga (izquierda) y descarga (derecha). [1]	23
Ilustración 4: Diagrama T-s de los ciclos transcíticos de CO ₂ [1]	24
Ilustración 5: Esquema de la carga (izquierda) y la descarga (derecha) del ciclo básico.	25
Ilustración 6: Diagrama P-T con los estados del agua.	27
Ilustración 7: Rango de temperaturas del hielo en el ciclo básico.	29
Ilustración 8: Diagrama T-s del ciclo de carga (naranja) y descarga (verde)	31
Ilustración 9: Diagrama T-s del agua caliente (rojo) y del hielo (azul)	32
Ilustración 10: Diagrama T-Q de la transferencia de calor en el ciclo de carga	37
Ilustración 11: Diagrama T-Q del ciclo de descarga	40
Ilustración 12: Variación de temperaturas de carga y del calor intercambiado en el ciclo básico de carga.	43
Ilustración 13: Variación de temperatura y diferencia mínima de temperatura en el intercambio en el ciclo básico de descarga.	44
Ilustración 14: Variación de temperatura y diferencia mínima de temperaturas (2)	45
Ilustración 15: Diagrama T-Q del ciclo de carga básico con el gasto másico de agua caliente óptimo.....	46
Ilustración 16: Diagrama T-Q del ciclo básico de descarga con el gasto de agua caliente óptimo.....	47
Ilustración 17: Rendimiento y trabajo en la turbina frente a presión alta de carga del ciclo básico	49
Ilustración 18: Temperaturas y calor frente a presión alta de carga en el ciclo básico	50
Ilustración 19: Diferencia mínima de temperaturas y gasto másico del hielo frente a presión alta de carga en el ciclo básico.....	51
Ilustración 20: Trabajo en turbina y rendimiento frente a presión baja de carga en el ciclo básico.	52
Ilustración 21: Temperaturas y calor frente a presión baja de carga en el ciclo básico	53
Ilustración 22: Diferencia mínima y gasto másico de hielo frente a presión baja de carga en el ciclo básico.....	54
Ilustración 23: Diferencia mínima y gasto másico de hielo frente a presión baja de carga en el ciclo básico (2).	55
Ilustración 24: Rendimiento y trabajo en turbina frente a presión alta de descarga en el ciclo básico.	56
Ilustración 25: Calor en la descarga frente a presión alta de descarga en el ciclo básico.	57
Ilustración 26: Diferencia mínima de temperaturas y gasto másico de hielo en la descarga frente a presión alta de descarga en el ciclo básico.	58
Ilustración 27: Trabajo en turbina y rendimiento frente a presión baja de descarga en el ciclo básico.	59
Ilustración 28: Temperatura y calor frente a presión baja de descarga en el ciclo básico.	59
Ilustración 29: Diferencia de temperaturas mínima y gasto másico del hielo en la descarga frente a presión baja de descarga en el ciclo básico.	60

Ilustración 30: Diferencia de temperaturas mínima y gasto másico del hielo en la descarga frente a presión baja de descarga en el ciclo básico (2).	61
Ilustración 31: Configuración del ciclo de carga con ciclo adicional de amoníaco [2].	62
Ilustración 32: Configuración del ciclo de descarga con ciclo adicional de amoníaco en la carga. [2]	63
Ilustración 33: Diagrama T-s de la evolución del hielo	66
Ilustración 34: Diagrama T-s de la evolución del agua caliente en el ciclo con refrigeración con amoníaco en la carga.	67
Ilustración 35: Diagrama T-s del CO ₂ en los ciclos de carga (naranja) y descarga (verde) en el caso con la refrigeración adicional de amoníaco durante la carga.	68
Ilustración 36: Diagrama T-s del ciclo de refrigeración adicional con amoníaco en la carga.	69
Ilustración 37: Diagrama T-Q de la carga del agua caliente del depósito primario en el ciclo con refrigeración por amoníaco	71
Ilustración 38: Diagrama T-Q de la carga del depósito de agua caliente secundario en el ciclo con la refrigeración adicional por amoníaco.	72
Ilustración 39: Regeneración en el ciclo de carga en el caso base con refrigeración adicional de amoníaco.	74
Ilustración 40: Diagrama T-Q de la carga del hielo mediante en la evaporación del CO ₂ , en el ciclo con refrigeración adicional de amoníaco.	75
Ilustración 41: Diagrama T-Q de la carga del depósito de hielo mediante el ciclo adicional de amoníaco.	77
Ilustración 42: Regeneración en el ciclo de descarga en el caso base con refrigeración adicional con amoníaco durante la carga.	79
Ilustración 43: Balance de masa de los depósitos de agua caliente en el ciclo básico con refrigeración adicional con amoníaco durante la carga.	80
Ilustración 44: Diagrama T-Q de la descarga del depósito principal de agua caliente, en el ciclo con refrigeración adicional de amoníaco en la carga.	82
Ilustración 45: Diagrama T-Q de la descarga del depósito secundario de agua caliente, en el ciclo con refrigeración adicional de amoníaco durante la carga.	83
Ilustración 46: Diagrama T-Q de la descarga del depósito de hielo, en el ciclo con refrigeración adicional de amoníaco durante la carga.	84
Ilustración 47: Reflector cilindro-parabólico y tubo receptor de una central termosolar. [6]	88
Ilustración 48: Configuración de la planta en el ciclo de carga, ciclo con configuración alternativa y aporte térmico adicional.	90
Ilustración 49: Configuración de la planta en el ciclo de descarga, ciclo con configuración alternativa y aporte térmico adicional.	91
Ilustración 50: Diagrama T-Q de la carga del hielo completa en la configuración alternativa con aporte térmico.	92
Ilustración 51: Diagrama T-s del agua caliente en la configuración alternativa con aporte térmico.	95
Ilustración 52: Diagrama T-s del hielo en la configuración alternativa con aporte térmico.	97
Ilustración 53: Diagrama T-s de los ciclos de CO ₂ de carga y descarga en la configuración alternativa con aporte térmico.	98
Ilustración 54: Diagrama T-s del ciclo de amoníaco con la configuración alternativa y aporte térmico.	99
Ilustración 55: Esquema del ciclo de carga eléctrico.	100
Ilustración 56: Esquema del ciclo de carga térmico.	101
Ilustración 57: Esquema de la carga del ciclo conjunto.	102

Ilustración 58: Esquema de la carga extra del depósito de hielo.....	103
Ilustración 59: Esquema del ciclo de descarga	104
Ilustración 60: Diagrama T-Q de la carga del depósito principal de agua caliente con la configuración alternativa con aporte térmico.....	105
Ilustración 61: Diagrama T-Q del recalentamiento durante el ciclo de carga con la configuración alternativa y aporte térmico.....	107
Ilustración 62: Diagrama T-Q de la carga del depósito secundario de agua caliente con la configuración alternativa y aporte térmico.....	109
Ilustración 63: Diagrama T-Q de la regeneración durante el ciclo de carga con la configuración alternativa y aporte térmico.....	111
Ilustración 64: Diagrama T-Q de la carga del hielo mediante el ciclo de CO ₂ con la configuración alternativa y aporte térmico.....	113
Ilustración 65: Diagrama T-Q de la carga del hielo mediante el ciclo de amoníaco con la configuración alternativa y aporte térmico.....	115
Ilustración 66: Diagrama T-Q de la regeneración durante el ciclo de descarga con la configuración alternativa y aporte térmico.....	117
Ilustración 67: Balance de masas en los depósitos de agua caliente.....	119
Ilustración 68: Diagrama T-Q de la descarga de los depósitos de agua caliente con la configuración alternativa y aporte térmico.....	120
Ilustración 69: Diagrama T-Q de la descarga del hielo con la configuración alternativa y aporte térmico.....	122
Ilustración 70: Diagrama T-Q del calentamiento del CO ₂ por la central termosolar... ..	124
Ilustración 71: Esquema del intercambio con la central termosolar.....	125
Ilustración 72: Perfil de carga de los depósitos cuando el ciclo térmico y el de descarga comienzan al mismo tiempo.....	129
Ilustración 73: Perfil de carga de los depósitos cuando el ciclo térmico y el de descarga no comienzan al mismo tiempo.....	130

Índice de Ecuaciones

Ecuación 1: Rendimiento del compresor.....	27
Ecuación 2: Rendimiento de la turbina hidráulica.....	28
Ecuación 3: Rendimiento de la bomba.....	28
Ecuación 4: Rendimiento de la turbina.....	28
Ecuación 5: Calor cedido por el fluido caliente en el intercambio de calor	33
Ecuación 6: Calor absorbido por el fluido frío en el intercambio de calor.	33
Ecuación 7: Trabajo del compresor.....	41
Ecuación 8: Trabajo de la turbina hidráulica	41
Ecuación 9: Trabajo de compresión de la bomba	41
Ecuación 10: Trabajo de expansión en la turbina.....	41
Ecuación 11: Rendimiento del ciclo básico de carga.....	42
Ecuación 12: Rendimiento del ciclo básico de descarga.....	42
Ecuación 13: Rendimiento global del ciclo básico.....	42
Ecuación 14: Fracción másica del agua caliente.....	43
Ecuación 15: Diferencia de temperaturas mínima en la entrada del flujo caliente.	70
Ecuación 16: Diferencia de temperaturas mínima en la salida del flujo caliente.....	70
Ecuación 17: Calor de descarga proporcional a la carga	80
Ecuación 18: Relación entre calor de carga y descarga.....	80
Ecuación 19: Gasto de descarga proporcional al de carga	80
Ecuación 20: Rendimiento del ciclo de CO ₂ durante la carga en el caso base con refrigeración adicional de amoníaco	86
Ecuación 21: Rendimiento del ciclo de NH ₃ durante la carga en el caso base con refrigeración adicional de amoníaco	86
Ecuación 22: Rendimiento del ciclo de carga en el caso base con refrigeración adicional de amoníaco	86
Ecuación 23: Rendimiento del ciclo de descarga en el caso base con refrigeración adicional de amoníaco	86
Ecuación 24: Rendimiento del caso base con refrigeración adicional de amoníaco....	86
Ecuación 25: Salto entálpico del campo solar	89
Ecuación 26: Balance de masas del depósito secundario en la configuración alternativa.	119
Ecuación 27: Rendimiento del ciclo de CO ₂ durante la carga en la configuración alternativa con aporte térmico.....	131
Ecuación 28: Rendimiento del ciclo de NH ₃ durante la carga en la configuración alternativa con aporte térmico.....	131
Ecuación 29: Rendimiento del ciclo de carga en la configuración alternativa con aporte térmico.....	131
Ecuación 30: Rendimiento del ciclo de descarga en la configuración alternativa con aporte térmico.....	131
Ecuación 31: Rendimiento del caso con configuración alternativa y aporte térmico..	131
Ecuación 32: Coste normalizado de la energía	136

Índice de Código

Código 1: Intercambio de calor, conocidas las condiciones de entrada y el gasto másico.	34
Código 2: Eficiencia del intercambio de calor	34
Código 3: Precalentamiento y evaporación hasta el punto de vapor saturado.	35
Código 4: Diferencias de temperatura en el precalentamiento y evaporación.	35
Código 5: Enfriamiento y condensación hasta el punto de líquido saturado.	39
Código 6: Diferencias de temperatura en el enfriamiento y condensación.	39
Código 7: Intercambio de calor con cambio de fase, conocidas las condiciones de entrada y gastos másicos.	78

Notación

TEES	Almacenamiento de energía termo-eléctrico	(Thermoelectric energy storage)
CO ₂	Dióxido de Carbono	
NH ₃	Amoníaco	
T	Temperatura	
h	Entalpía	
x	Título	
Cp.	Capacidad calorífica a presión constante	
Q	Calor	
W	Trabajo	
η	Rendimiento	
CB	Caso básico	
CB,op	Caso básico con gasto de agua caliente optimizado.	
CB,RA	Caso básico con refrigeración adicional durante la carga	
CA,AP	Configuración alternativa con aporte térmico	
η _{compresor}	Rendimiento del compresor	
η _{hidraulica}	Rendimiento de la turbina hidráulica	
η _{bomba}	Rendimiento de la bomba	
η _{turbina}	Rendimiento de la turbina	
h _{entrada} / h _{in}	Entalpía de entrada	
h _{salida} / h _{out}	Entalpía de salida	
h _{s,salida}	Entalpía de salida si el proceso es isotrópico.	
P _{alta,CO2,carga}	Presión de alta del CO ₂ en la carga	
P _{baja,CO2,carga}	Presión de baja del CO ₂ en la carga	
P _{alta,CO2,des}	Presión de alta del CO ₂ en la descarga	
P _{baja,CO2,des}	Presión de baja del CO ₂ en la descarga	
P _{foco,caliente}	Presión del agua caliente	
P _{agua,caliente}	Presión del agua caliente	
P _{hielo}	Presión del hielo	
P _{alta,NH3}	Presión de alta del NH ₃ en la carga	
P _{baja,NH3}	Presión de baja del NH ₃ en la carga	
T _{foco,caliente,inicial}	Temperatura inicial del agua caliente	
T _{agua,caliente,inicial}	Temperatura inicial del agua caliente	
T _{agua,caliente,deposito,cargado}	Temperatura del agua al finalizar la carga	
T _{hielo,max}	Temperatura inicial del hielo en el depósito	
T _{hielo,inicial}	Temperatura inicial del hielo en el depósito	
T _{hielo,intermedia}	Temperatura intermedia del hielo	
T _{hielo,min}	Temperatura del hielo al finalizar la carga	
T _{hielo,deposito,cargado}	Temperatura del hielo al finalizar la carga	
T _{hielo,CO2,saturado}	Temperatura del hielo en el cambio de pendiente	
DT _{min}	Diferencia de temperatura mínima	

Q_{real}	Calor real en el intercambiado
Q_{max}	Calor máximo en el intercambio
ε	Eficiencia del intercambio
m_c	Gasto másico del lado caliente
m_f	Gasto másico del lado frío
$h_{c,\text{in}}$	Entalpía de entrada del fluido caliente
$h_{c,\text{out}}$	Entalpía de salida del fluido caliente
$h_{f,\text{in}}$	Entalpía de entrada del fluido frío
$h_{f,\text{out}}$	Entalpía de salida del fluido frío
m_{CO_2}	Gasto másico del dióxido de carbono
$m_{\text{H}_2\text{O}}$	Gasto másico de agua caliente por kg de CO_2
m_{hielo}	Gasto másico de hielo en el intercambio por kg de CO_2
$X_{\text{H}_2\text{O}}$	Fracción másica del agua caliente
m_{NH_3}	Gasto másico de amoníaco por kg de CO_2
$m_{\text{fluido,térmico}}$	Gasto másico del fluido térmico por kg de CO_2
Δh_{CO_2}	Incremento de entalpía del CO_2
Δh_{NH_3}	Incremento de entalpía del amoníaco
$Q_{\text{precalentamiento}}$	Calor de precalentamiento
$Q_{\text{evaporación}}$	Calor de evaporación
$T_{\text{CO}_2,\text{saturado}}$	Temperatura del CO_2 en el punto de líquido saturado
$Q_{\text{enfriamiento}}$	Calor de enfriamiento
$Q_{\text{condensación}}$	Calor de condensación
$T_{\text{in,hidraulica}}$	Temperatura de entrada en la turbina hidráulica
$T_{\text{out,hidráulica}}$	Temperatura de salida en la turbina hidráulica
$T_{\text{in,compresor}}$	Temperatura de entrada en el compresor
$T_{\text{out,compresor}}$	Temperatura de salida del compresor
$T_{\text{in,bomba}}$	Temperatura de entrada en bomba
$T_{\text{out,bomba}}$	Temperatura de salida de la bomba
$T_{\text{in,turbina}}$	Temperatura de entrada en turbina
$T_{\text{out,turbina}}$	Temperatura de salida de la turbina
$T_{\text{out,expansión,NH}_3}$	Temperatura de salida de la válvula
$W_{\text{compresion,carga}}$	Trabajo de compresión
$W_{\text{hidraulica,carga}}$	Trabajo de expansión en turbina hidráulica
$W_{\text{bomba,descarga}}$	Trabajo de compresión en bomba
$W_{\text{turbina,descarga}}$	Trabajo de expansión en turbina
$Q_{\text{foco,caliente,carga}}$	Calor cedido al agua caliente en el ciclo de carga por kg de CO_2
$Q_{\text{foco,frio,carga}}$	Calor cedido por el hielo en el ciclo de carga por kg de CO_2
$Q_{\text{foco,caliente,des}}$	Calor cedido por el agua caliente en el ciclo de descarga por kg de CO_2
$Q_{\text{foco,frio,des}}$	Calor cedido al hielo en el ciclo de descarga por kg de CO_2
$\text{COP}_{\text{carga}}$	Rendimiento del ciclo de carga
η_{descarga}	Rendimiento del ciclo de descarga
η_{total}	Rendimiento global
Depósito A	Depósito principal de agua caliente

Depósito B	Depósito secundario de agua caliente
$T_{H_2O,deposito,A}$	Temperatura del depósito A
$T_{H_2O,deposito,B}$	Temperatura del depósito B
$T_{out,CO_2,caliente,carga}$	Temperatura de salida del tren de intercambiadores de agua caliente
$T_{intermedia,CO_2}$	Temperatura intermedia del CO ₂ en los intercambios con el agua caliente.
$T_{in,enfriamiento,CO_2,des}$	Temperatura al intercambio con el hielo en el ciclo de descarga
$T_{in,precalentador,CO_2,des}$	Temperatura de entrada del tren de intercambiadores de agua caliente
$Q_{auxiliar}$	Calor auxiliar
r_Q	Coficiente de relación del gasto másico de agua en la carga y descarga
ζ_D	Tiempo de descarga en horas
ζ_C	Tiempo de carga en horas
HTF	Fluido térmico caloportador Heat transfer fluid
CCP	Concentrador cilidro-parabólico.
$T_{in,campo,solar}$	Temperatura del fluido térmico de entrada en el campo solar
$T_{out,campo,solar}$	Temperatura del fluido térmico de salida en el campo solar
$\Delta h_{campo,solar}$	Incremento e entalpía del fluido térmico
$cp_{medio,campo,sola}$	Capacidad calorífica media del fluido térmico
$T_{in,recalentamiento,CO_2,carga}$	Temperatura de entrada del CO ₂ en el recalentamiento
$T_{out,recal,CO_2,carga}$	Temperatura de salida del CO ₂ en el recalentamiento
$T_{out,recal,NH_3}$	Temperatura de salida del NH ₃ en el intercambio con el CO ₂
$\dot{Q}_{FC, carga}$	Potencia térmica de carga en el foco caliente
\dot{Q}_{FF, CO_2}	Potencia térmica de la carga del foco frío mediante el ciclo de CO ₂
$\dot{W}_C, CO_2, carga$	Potencia del compresor de CO ₂ en el ciclo de carga
$\dot{W}_H, carga$	Potencia térmica de la turbina hidráulica
$\dot{Q}_{Recal, CO_2, carga}$	Potencia térmica del recalentamiento
$\dot{Q}_{FF, NH_3, carga}$	Potencia térmica de la carga del foco frío mediante el ciclo de NH ₃
$\dot{W}_C, NH_3, carga$	Potencia del compresor de NH ₃ en el ciclo de carga
$\dot{Q}_{FF, carga}$	Potencia térmica total de la carga del foco frío
\dot{Q}_{CS}	Potencia térmica del intercambio con la central termosolar
$\dot{Q}_{FC, des}$	Potencia térmica de descarga en el foco caliente
$\dot{Q}_{FF, des}$	Potencia térmica de descarga del foco frío
\dot{W}_T, des	Potencia de la turbina en la descarga
\dot{W}_B, des	Potencia de la bomba en la descarga
$\zeta_C, elec$	Tiempo del ciclo eléctrico en horas
ζ_C, ter	Tiempo de del ciclo térmico en horas
τ, des	Tiempo de descarga en horas
LCOE	Coste normalizado de la energía (Levelized cost of Energy)
I	Inversión
Lenergía	Gastos de energía

M	Gastos de operación y mantenimiento
R	Gastos de repuestos
F	Costes de financiación
E	Energía anual producida
r	Ratio de descuento
n	Años de vida de la central

1. Introducción

1.1 Principio del sistema

El propósito de este proyecto es analizar el nuevo tipo de tecnología de almacenamiento de electricidad a gran escala, el almacenamiento electro-térmico de energía, que se basa en una bomba de calor y tecnologías de motores térmicos que utilizan ciclos transcíticos de CO₂, almacenamiento de calor mediante agua caliente, y la generación de hielo y deshielo en el extremo frío de los ciclos.

El principio de funcionamiento del sistema de almacenamiento de energía electro-térmica es que durante los períodos de exceso de generación de electricidad en la red eléctrica, un motor eléctrico acciona al compresor de un sistema de bomba de calor, transfiriendo energía eléctrica que se transforma en energía térmica a alta temperatura y a baja temperatura en el condensador y evaporador respectivamente, y que se almacena durante un período de tiempo. Durante los períodos de exceso de demanda de electricidad en la red, un motor térmico se acciona a partir de un fluido orgánico que recibe el calor almacenado a alta temperatura para generar energía eléctrica en una turbina, donde el fluido expandido se enfría a partir de la fuente de calor a baja temperatura previamente almacenada.

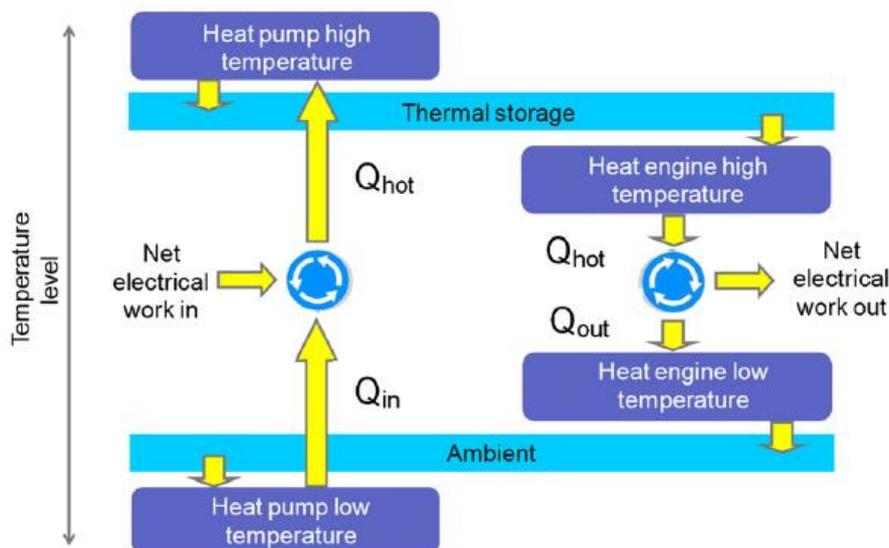


Ilustración 1: Representación esquemática del balance de energía de un sistema TEES con el ambiente como foco frío. [1]

1.2 Integración de los ciclos de carga y descarga

Con el fin de transferir el calor desde el fluido de trabajo hacia el medio de almacenamiento durante la carga, la temperatura del fluido de trabajo debe estar por encima de la temperatura de almacenamiento durante todo el proceso de transferencia de calor.

Dos ejemplos de una buena integración entre ciclo y el fluido de almacenamiento se dan en la parte inferior de la figura siguiente para el almacenamiento de calor sensible (izquierda) y de almacenamiento de calor latente (derecha). Mientras que una mala

integración se representan en la parte superior para calor sensible y latente. Una mala integración puede provocar una caída en el rendimiento de carga y descarga.

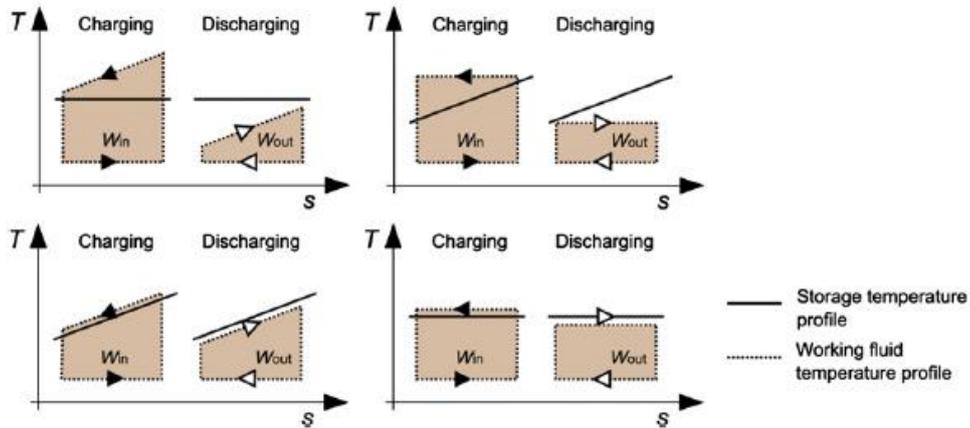


Ilustración 2: Buena y mala integración entre el ciclo y los focos. [1]

1.3 Almacenamiento

El almacenamiento caliente y el frío están separados de las máquinas térmicas formando ciclos termodinámicos mediante intercambiadores de calor que transfieren energía en forma de calor/frío desde los ciclos termodinámicos a los subsistemas de almacenamiento y viceversa como se representa en la siguiente figura.

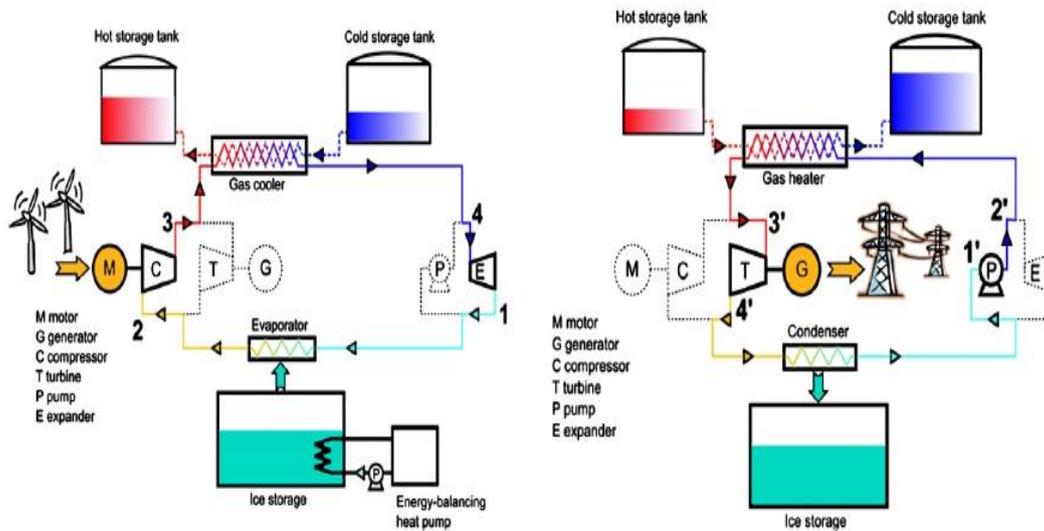


Ilustración 3: Distribución de la planta durante carga (izquierda) y descarga (derecha). [1]

2. Caso base: ciclo transcrito de dióxido de carbono.

2.1 Descripción del ciclo

2.1.1 Ciclo de carga

En la **ilustración 4** se muestra un diagrama temperatura-entropía de los ciclos de carga y descarga de CO₂.

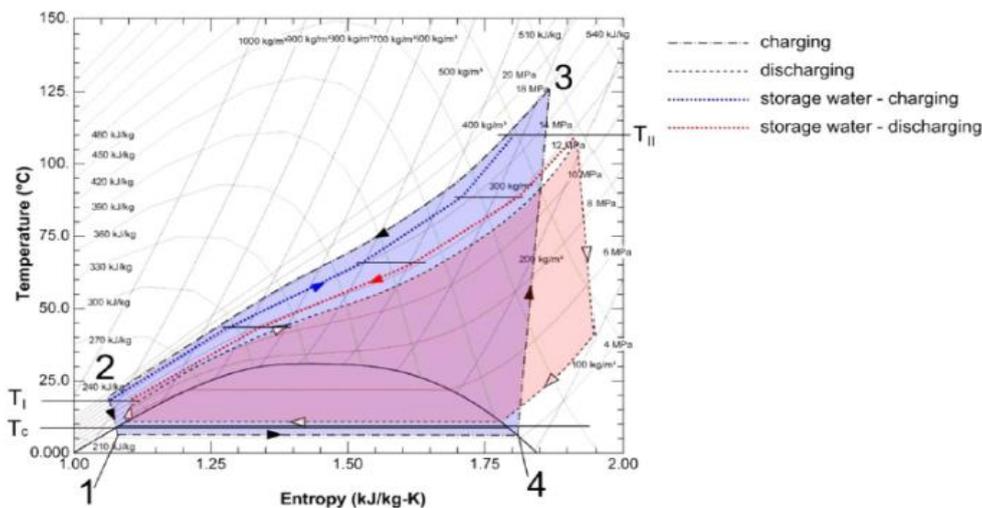


Ilustración 4: Diagrama T-s de los ciclos transcritos de CO₂ [1]

Durante la carga, el ciclo comienza en el punto 4 a la entrada del compresor (vapor saturado), donde el fluido se comprime para alcanzar una temperatura máxima por encima de 100°C. El estado final de la compresión se encuentra en la región supercrítica (3). Aquí el fluido de trabajo entra en el intercambiador de calor en el que el calor se transfiere al medio de almacenamiento. Esto se produce en un proceso que se lleva a cabo a una presión prácticamente constante y el fluido de trabajo fluye a través de un intercambiador de calor en el que la presión no varía a excepción de las pérdidas por fricción. Después de la isobara, el enfriamiento del fluido de trabajo en las condiciones supercríticas no conduce a ningún punto de cambio de fase, es decir, la temperatura del fluido de trabajo tiene una pendiente a lo largo de todo el proceso (a diferencia de las isobaras que interceptan al cono de dos fases del diagrama en ciclos subcríticos). Al final del intercambio de calor (2), el fluido se expande en una turbina hidráulica. La turbina hidráulica produce trabajo que se puede volver a suministrar al compresor. Si se utiliza una válvula de estrangulación en este punto en vez de una turbina hidráulica, la expansión sería un proceso isoentálpico en el que se pierde todo el trabajo que pudiera ser recuperado. El fluido de trabajo se expande en la turbina hidráulica a una presión de baja (1), preferiblemente en un estado líquido y listo para entrar en el evaporador para recibir calor con el fin de cerrar el ciclo (4). Este proceso de intercambio de calor es isobárico, pero se produce en el área de cambio de fase, y por lo tanto la temperatura del fluido de trabajo es constante a lo largo de este proceso.

El esquema del ciclo de carga se representa en la parte izquierda de la **ilustración 5**.

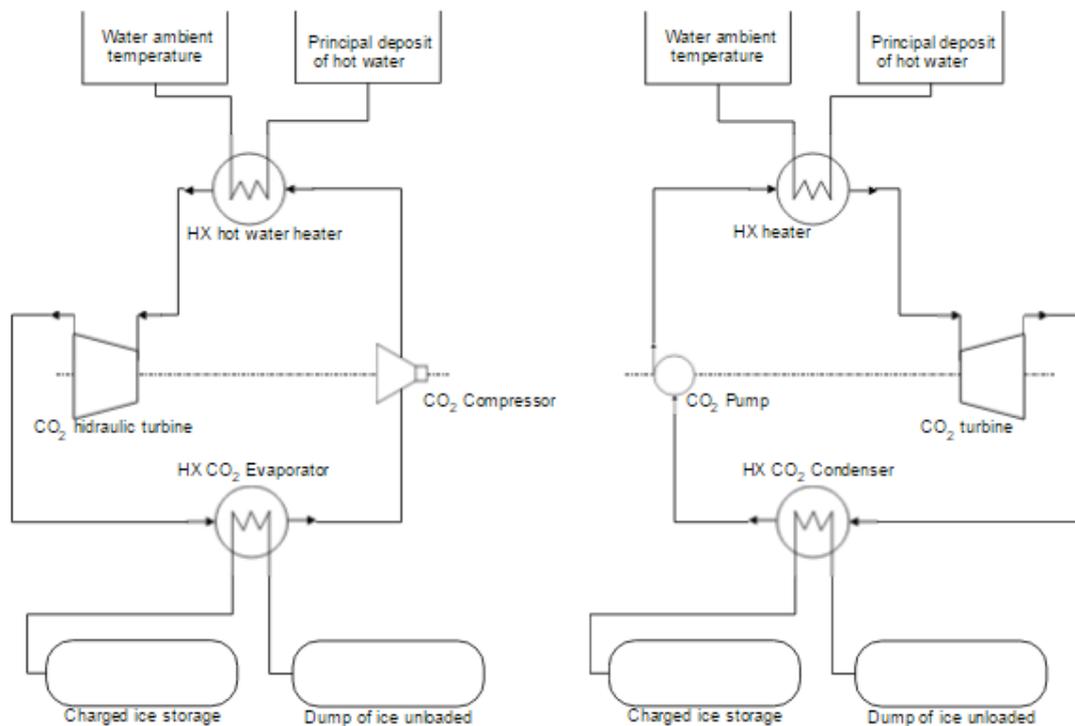


Ilustración 5: Esquema de la carga (izquierda) y la descarga (derecha) del ciclo básico.

2.1.2 Ciclo de descarga

Para descargar el proceso se invierte el ciclo como se muestra en la parte derecha de la **ilustración 5**, es decir, se bombea el fluido de trabajo líquido de baja presión (1) a alta presión (2) y recibe el calor del almacenamiento, a presión constante a excepción de las pérdidas de carga en el intercambiador y en la región supercrítica y por tanto sin cambio de fase, es decir a temperatura variable. A la salida del intercambiador (3), el fluido de trabajo se expande en una turbina conectada a un generador para producir energía eléctrica. Al final de la expansión (4), el fluido entra en el condensador donde cede calor al almacenamiento y el fluido de trabajo condensa, habiendo un tramo del perfil de cesión a temperatura constante. Al final del condensador, el fluido está como líquido saturado (1) llegando al punto inicial y cerrándose el ciclo.

2.2 Fluidos de trabajo

2.2.1 Dióxido de carbono

El CO₂ se caracteriza por tener una temperatura crítica muy baja, lo que permite la aplicación del ciclo transcrito a temperaturas que se ajustan bien con el agua como fluido de almacenamiento. Además, el CO₂ tiene excelentes propiedades térmicas, ofrece una muy alta densidad de potencia, tiene excelentes propiedades medioambientales, y no es inflamable ni tóxico (sin embargo, es un gas asfixiante). En la **tabla 1** se comparan algunas propiedades del CO₂ y otros fluidos.

Qualitative comparison of CO₂ with other common working fluids.

Refrigerant	R12	R22	R134a	R290	NH ₃	CO ₂
Natural fluid	No	No	No	Yes	Yes	Yes
ODP	0.820	0.055	0	0	0	0
GWP (100yr) IPCC values	8100	1500	1300	20	<1	1
Critical temperature (°C)	112.0	96.2	101.2	96.7	132.3	31.1
Critical pressure (MPa)	4.14	4.99	4.06	4.25	11.27	7.38
Flammable	No	No	No	Yes	Yes	No
Toxic	No	No	No	No	Yes	No
Relative price	n/a	1.0	4.0	0.3	0.2	0.1
Volumetric capacity	1.0	1.6	1.0	1.4	1.6	8.4

Tabla 1: Tabla comparativa del CO₂ y otros fluidos. [1]

2.2.2 Agua

Entre los materiales líquidos de almacenamiento, el agua es un medio muy ventajoso debido a su alta capacidad calorífica, sus propiedades térmicas, su excelente coste y disponibilidad, así como propiedades de seguridad. Para operar un ciclo transcrito entre las temperaturas que se ajustan con el agua como medio de almacenamiento, el CO₂ aparece como la opción ideal para el fluido de trabajo. En la **tabla 2** se comparan algunas propiedades del agua y otros medios de almacenamiento.

Comparison of water with other storage media (data for 1 MWh heat storage) for 100 °C temperature difference for sensible heat storage materials.

Material	Water	Sand (or rock)	Thermal oil	Erythritol (PCM)
Heat capacity, J/(kg·K)	4181	830	1670	—
Latent heat, J/kg	—	—	—	339,800
Density, kg/m ³	1000	1680	900	1480
Spec. cost, USD/kg	0.0005	0.03	1	5
Amount needed, kg	8610	43,300	21,550	10,600
Volume needed, m ³	8.6	25.8	24	7.1
Cost, USD	4.6	1300	21,550	53,000

Tabla 2: Comparativa del agua y otros medios de almacenamiento. [1]

Las limitaciones que establece el agua como medio de almacenamiento se pueden ver en la **figura 6**. A una presión de 100 bares, el agua puede alcanzar una temperatura de 570 K en estado líquido. Esta temperatura máxima alcanzable sin que se produzca un cambio de estado puede ser aún mayor al aumentar la presión. Por el contrario, la temperatura de solidificación o fusión permanece invariable hasta alcanzar los 100 bares, disminuyendo unos 50 K a 1100 bares para luego aumentar.

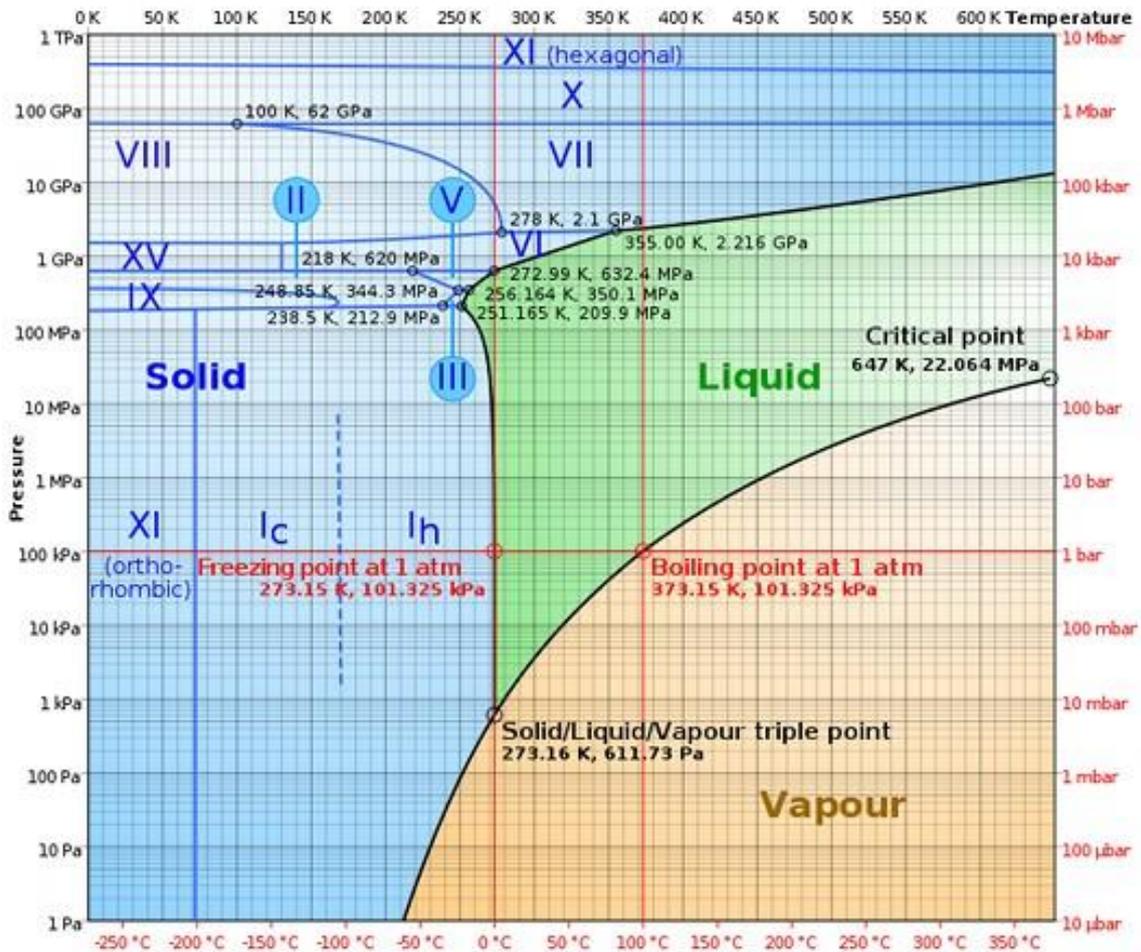


Ilustración 6: Diagrama P-T con los estados del agua.

2.3 Representación del ciclo

2.3.1 Equipos

Como datos de partida, en la **tabla 3** se recogen los valores asociados al rendimiento de los equipos del ciclo básico, que determinan las líneas de expansión y compresión.

Tabla 3: Rendimiento de los equipos en el ciclo básico [1]

Rendimiento		
Rendimiento del compresor	$\eta_{\text{compresor}}$	0,86
Rendimiento de la turbina hidráulica	$\eta_{\text{hidraulica}}$	0,85
Rendimiento de la bomba	η_{bomba}	0,85
Rendimiento de la turbina	η_{turbina}	0,88

En el modelado del sistema, el paso de los fluidos por los equipos del sistema se define con las **ecuaciones 1-4**.

$$\eta_{\text{compresor}} = \frac{h_{s,\text{salida}} - h_{\text{entrada}}}{h_{\text{salida}} - h_{\text{entrada}}}$$

Ecuación 1: Rendimiento del compresor

$$\eta_{hidraulica} = \frac{h_{entrada} - h_{salida}}{h_{entrada} - h_{s,salida}}$$

Ecuación 2: Rendimiento de la turbina hidráulica.

$$\eta_{bomba} = \frac{h_{s,salida} - h_{entrada}}{h_{salida} - h_{entrada}}$$

Ecuación 3: Rendimiento de la bomba

$$\eta_{turbina} = \frac{h_{entrada} - h_{salida}}{h_{entrada} - h_{s,salida}}$$

Ecuación 4: Rendimiento de la turbina

2.3.2 Presiones del dióxido de carbono

En la parte A del diseño conceptual de un sistema de almacenamiento de energía termo-eléctrica basado en la integración térmica de ciclos termodinámicos, de Morandin, Maréchal, Merchangoz y Buchter [1], se realiza una primera optimización del caso base, con el que se obtiene una eficiencia máxima del 60%. Estos mismos valores de presión, que se muestran en la **tabla 4**, son los elegidos como parámetros iniciales en este estudio.

Tabla 4: Valores de la presión en el ciclo básico. [1]

Parámetros		Bares
Presión de alta del CO ₂ en la carga	P _{alta,CO2,carga}	188,7
Presión de baja del CO ₂ en la carga	P _{baja,CO2,carga}	18
Presión de alta del CO ₂ en la descarga	P _{alta,CO2,des}	174,2
Presión de baja del CO ₂ en la descarga	P _{baja,CO2,des}	20,8

2.3.3 Parámetros del agua caliente

Para el foco caliente (depósito de agua) se asumirá una temperatura inicial de 15°C, que podría ser la temperatura que tendría el agua en el ambiente, y una presión de 100 bares, que es una presión alta para mantener el agua en estado líquido al calentarla por encima de los 100°C (a una presión de 100 bares el fluido entra en la campana de saturación a unos 350°C).

Tabla 5: Estado inicial el agua caliente en el ciclo básico.

Estado inicial del agua caliente		Valor	Unidad
Temperatura inicial del agua caliente	T _{foco,caliente,inicial}	288,2	K
Presión del agua caliente	P _{foco,caliente}	100	bares

La temperatura del agua caliente cuando el depósito esté cargado se establece tras el intercambio de calor del agua caliente con el CO₂ en el ciclo de carga, dependiendo de la temperatura del CO₂ al salir del compresor, y de la eficiencia del propio intercambio de calor.

2.3.4 Parámetros del hielo

En el intercambio con el foco frío (depósito de hielo) se produce el cambio de fase del dióxido de carbono tanto en la carga, donde el hielo cede calor al dióxido de carbono haciendo que el dióxido de carbono se evapore mientras el hielo se enfría, como en la

descarga, donde el hielo absorbe calor del dióxido de carbono, el dióxido de carbono condensa y el hielo se calienta. Esto provoca que la temperatura del hielo se sitúe dentro del intervalo de temperaturas del dióxido de carbono que corresponde con las presiones mínimas de carga y descarga (transferencia de calor efectiva).

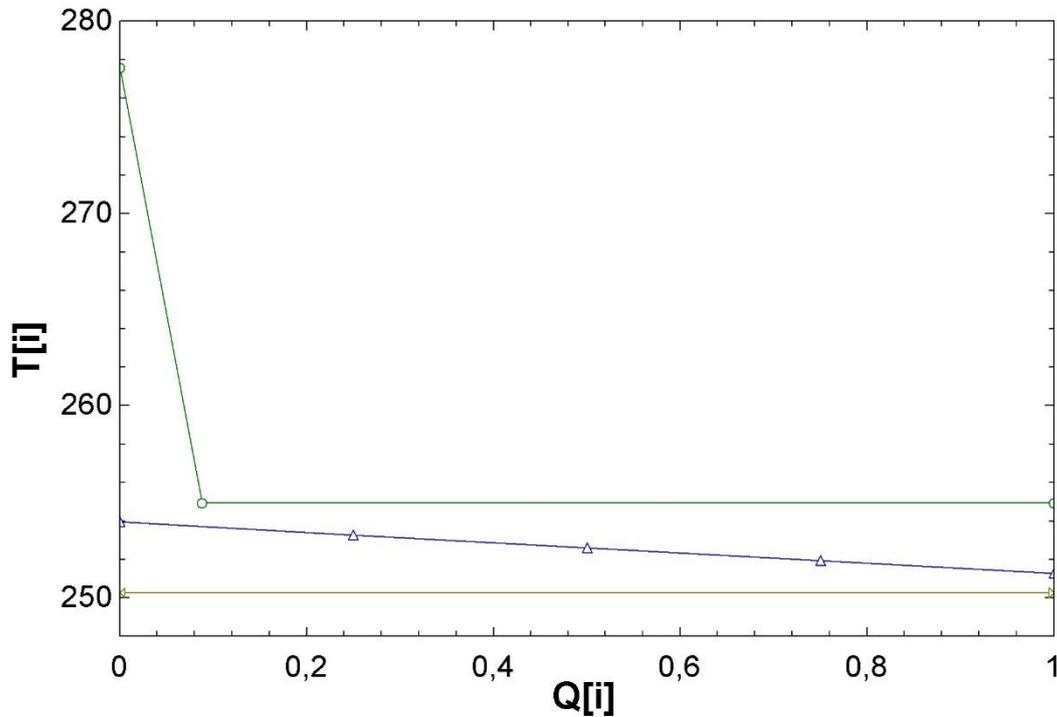


Ilustración 7: Rango de temperaturas del hielo en el ciclo básico.

En la **ilustración 7** se muestra el perfil de temperaturas del CO₂ en el intercambio de calor con el hielo en los ciclos de carga (naranja) y descarga (verde). En el ciclo de carga, el CO₂ evoluciona a una temperatura constante de 250,3 K, absorbiendo calor del hielo hasta llegar al punto de vapor saturado. En el ciclo de carga, el CO₂ cede calor al hielo, enfriándose hasta llegar al punto de vapor saturado, desde el que evoluciona a una temperatura constante de 254,9 K, hasta condensar completamente. Las temperaturas del hielo (azul), que cede y absorbe calor en el ciclo de carga y descarga, respetivamente, se sitúan dentro de este intervalo.

$$\Delta T_{\text{hielo}} < 4,5 \text{ K}$$

La temperatura del hielo máxima se corresponde con la temperatura del dióxido de carbono a la presión baja de descarga, menos la diferencia mínima de temperaturas deseada en el intercambio. La diferencia de temperaturas impuesta se corresponde con la mínima pues todo el calor del intercambio de emplea en la evaporación del CO₂. En este caso ($P_{\text{descarga,CO}_2,\text{min}} = 20,8$ bares):

La presión del hielo no es muy relevante, pues no tiene casi efecto en la temperatura de fusión hasta alcanzar muy altas presiones. Para realizar los cálculos se tomará una presión de 100 bares, igual a la del depósito de agua caliente.

Tabla 6: Estado inicial del hielo en el ciclo básico.

Estado inicial del hielo		Valor	Unidad
Temperatura inicial del hielo en el depósito	$T_{\text{hielo,max}}$	253,9	K
Diferencia de temperatura mínima	$DT_{\text{carga,f}}$	1	K
Presión del hielo	P_{hielo}	100	bares

La temperatura del hielo mínima se corresponde con la temperatura del dióxido de carbono a la presión baja de carga más la diferencia de temperaturas deseada con la temperatura de saturación del dióxido de carbono en la descarga. Esta diferencia de temperaturas, solo se corresponde con la diferencia de temperatura mínima en el intercambio en el caso que todo el intercambio de calor se emplee en el cambio de fase del dióxido de carbono. En este caso ($P_{\text{carga,CO}_2,\text{min}} = 18$ bares):

Tabla 7: Estado final del hielo en el ciclo básico.

Estado final del hielo		Valor	Unidad
Temperatura del hielo al finalizar la carga	$T_{\text{hielo,min}}$	251,3	K
Diferencia de temperatura mínima	$DT_{\text{descarga,f}}$	1	K
Presión del hielo	P_{hielo}	100	bares

2.3.5 Representación del ciclo

En el ciclo de carga, el CO_2 entra en el compresor a la presión de baja en el punto de vapor saturado, que eleva el fluido hasta la presión de alta. La compresión queda determinada por la definición del rendimiento del compresor (**ecuación 1**). Al salir del compresor, el CO_2 entra en el intercambio de calor con el depósito de agua caliente. El intercambio se lleva cabo a presión constante, y la temperatura de salida del CO_2 quedará determinada en el intercambio, que será cercana a la temperatura del agua inicial (15°C). Tras salir del intercambiador, el CO_2 entra en la turbina hidráulica, que lo expande hasta la presión de baja. La expansión está definida por el rendimiento de la turbina hidráulica (**ecuación 2**). Al salir de la turbina el CO_2 entra en el evaporador, absorbiendo energía a temperatura constante del hielo hasta el punto de vapor saturado, donde comienza el ciclo de nuevo.

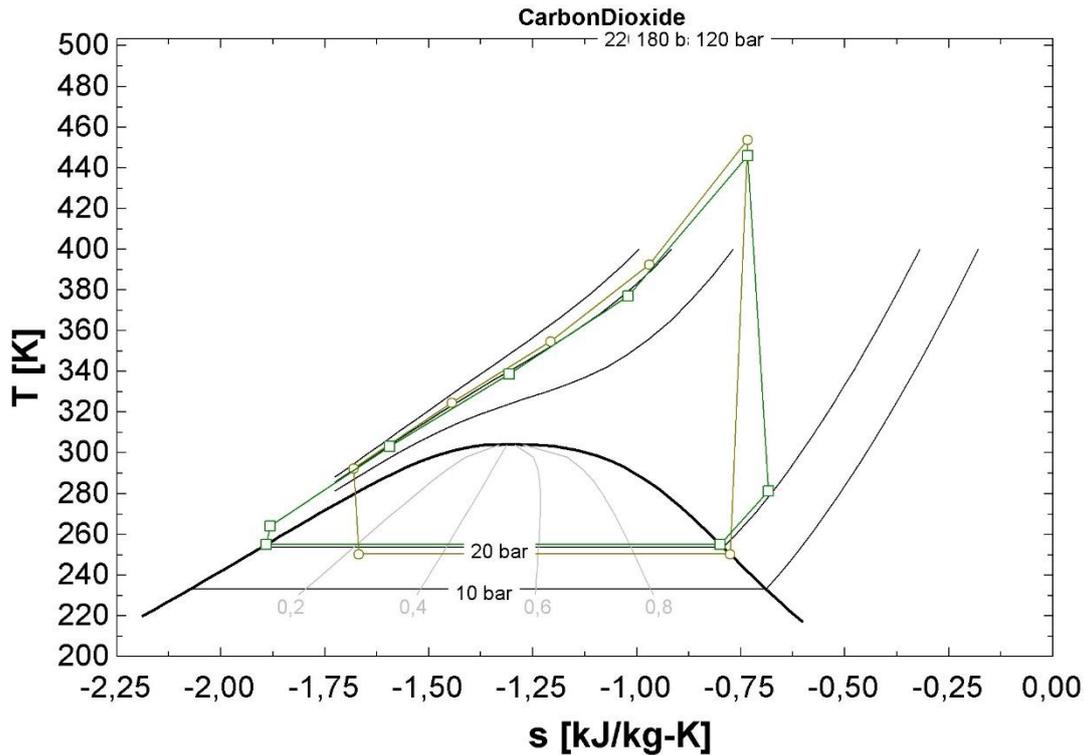


Ilustración 8: Diagrama T-s del ciclo de carga (naranja) y descarga (verde)

En el ciclo de descarga, el CO₂ parte desde el punto de líquido saturado, entrando en la bomba a la presión de baja, que la eleva hasta la presión de alta. La compresión de la bomba está determinada con su rendimiento (**ecuación 3**). El CO₂ entra en el intercambio con el depósito de agua caliente, que cede calor a presión constante al CO₂ hasta alcanzar una temperatura cercana a la del agua caliente cuando el depósito está cargado (aproximadamente 450 K). Tras el calentamiento, el CO₂ se expande en la turbina hasta la presión de baja, expansión caracterizada por el rendimiento de la turbina (**ecuación 4**). Tras la expansión, el CO₂ entra en el condensador, donde primero se enfría hasta llegar a la temperatura de saturación y después condensa, cediendo calor al depósito de hielo a temperatura y presión constante, hasta llegar al punto de líquido saturado, donde vuelve a entrar en la bomba.

En la **ilustración 9** se muestra la evolución del agua caliente (rojo) y del hielo (azul) en los ciclos de carga y descarga. Existe una gran diferencia en la evolución en los distintos depósitos. Para conseguir una transferencia de calor similar, hará falta un flujo de hielo mucho mayor que el de agua caliente. Esto es debido al cambio de fase del CO₂ en la carga y descarga del depósito de hielo. Al tener unas presiones de baja del dióxido de carbono muy próximas, el intervalo de temperaturas en el hielo es muy reducido.

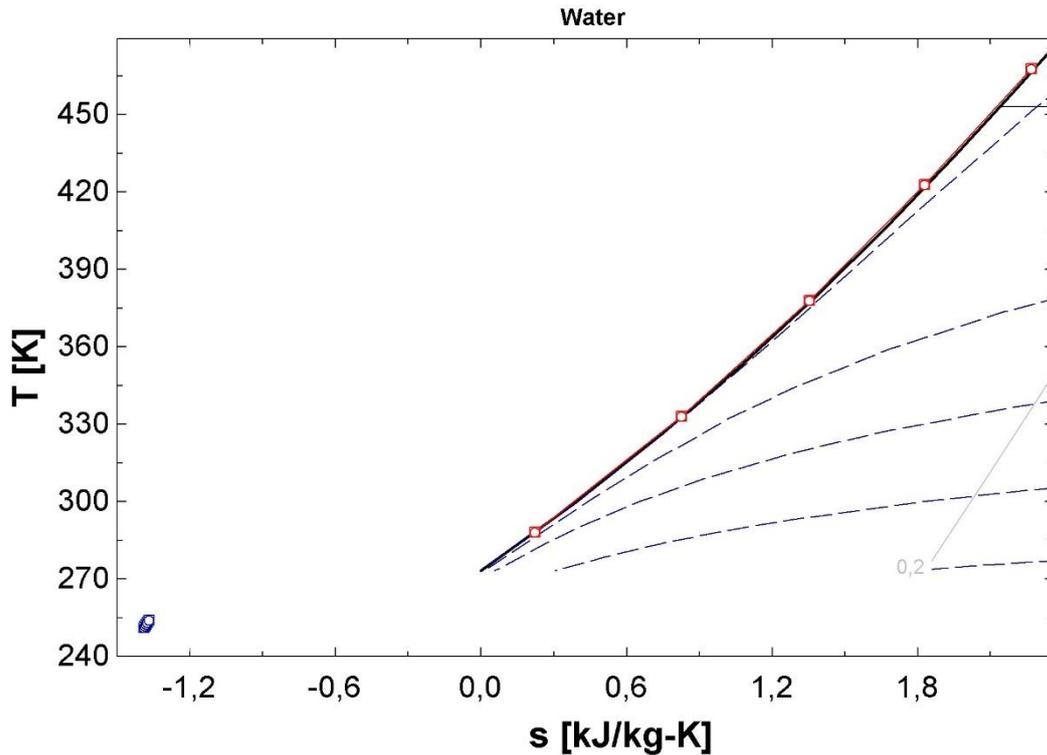


Ilustración 9: Diagrama T-s del agua caliente (rojo) y del hielo (azul)

Mientras que el incremento de temperaturas en el depósito de hielo no llega apenas a los 3 K, el agua caliente experimenta un salto de temperaturas de casi 180 K. Tratándose de un ciclo con intercambios de calor similares en ambos focos, esto provocará diferencias en la magnitud de los parámetros de los intercambios con el agua caliente y el hielo.

2.4 Balance de energía

En todos los intercambios de calor, los flujos son considerados en contracorriente. Para determinar la capacidad calorífica, entalpía, entropía o temperatura de los fluidos, basta con conocer dos de sus propiedades. Una de ellas será la presión, conocida en todos los puntos del sistema (alta o baja presión). La otra puede ser temperatura, entalpía o título.

En todos los intercambios de calor posteriores, se realizan los cálculos considerando un gasto másico unitario de CO₂, con el objetivo de referenciar los valores al gasto de dióxido de carbono, de forma que los resultados de calor y trabajo se expresan en kJ/kg de CO₂, y el gasto másico del resto de corrientes, como el agua caliente o el hielo, se expresan en kg/s por cada kg/s de CO₂.

Una vez determinadas dos de sus propiedades, las demás quedarán definidas en el programa utilizado para el modelado, *Engineering Equation Solver*. Indicando el fluido de trabajo y dos de sus propiedades se define cualquier otra.

2.4.1 Intercambio de calor en el ciclo de carga: foco caliente

El CO₂ cede calor al agua caliente para realizar la carga del depósito. El intercambio de calor queda caracterizado por la diferencia mínima de temperatura entre las dos

corrientes y sus respectivas temperaturas de entrada, además de ambos flujos y sus capacidades caloríficas.

El calor intercambiado, referido al gasto másico de CO₂, está definido por las **ecuaciones 5 y 6**.

$$Q_{\text{real}} = m_c * (h_{c,\text{in}} - h_{c,\text{out}})$$

Ecuación 5: Calor cedido por el fluido caliente en el intercambio de calor

$$Q_{\text{real}} = m_f * (h_{f,\text{out}} - h_{f,\text{in}})$$

Ecuación 6: Calor absorbido por el fluido frío en el intercambio de calor.

En el proceso de intercambio de calor, el fluido es modelado con calor específico constante igual a la media de los calores específicos en los puntos extremos del intercambio. De este modo, la diferencia mínima de temperatura en el intercambiador estará siempre en uno de los extremos, pues las líneas entalpía-potencia son rectas.

Esta diferencia mínima de temperaturas interesa que se encuentre en el punto de salida del agua caliente y entrada del dióxido de carbono, buscando conseguir la máxima temperatura de agua caliente en la salida del intercambiador.

Con las condiciones impuestas, partiendo de un gasto másico de CO₂ de 1 kg/s y dependiendo del gasto másico de agua caliente se tendrá la diferencia mínima de temperaturas en la entrada o la salida del intercambiador, además de aumentar o disminuir la eficiencia del intercambio. Este valor óptimo se estudiará más adelante.

La temperatura de entrada del agua caliente es la definida anteriormente como la inicial (15°C) y la del dióxido de carbono es la temperatura a la que sale del compresor.

Se determina una diferencia mínima de temperaturas en el intercambio de calor de 4°C [2].

Tabla 8: Parámetros de la carga del foco caliente en el ciclo básico.

Parámetros		Valor	Unidad
Presión del agua caliente	P _{agua,caliente}	100	Bares
Presión del CO ₂	P _{alta,CO2,carga}	188,7	Bares
Gasto másico del dióxido de carbono	m _{CO2carga}	1	kg/s
Gasto másico de agua caliente	m _{H2Ocarga}	0,4	kg/s
Temperatura de entrada del CO ₂	T _{out,compresor,CO2,carga}	453,9	K
Temperatura de entrada del agua caliente	T _{agua,caliente,inicial}	288,2	K
Diferencia de temperatura mínima en el intercambio	DT _{min,carga,c}	4	K

Bajo estas hipótesis es posible definir una simple función (**Código 1**) para calcular las temperaturas de salida del intercambiador y la potencia térmica del intercambio por cada kilogramo de CO₂.

*If (m_c*cp_c > m_f*cp_f) Then*

```

T_f_out := T_c_in - dTmin_HX

Q_real := mcp_f*(T_f_out - T_f_in)

T_c_out := T_c_in - Q_real/mcp_c

Else

T_c_out = T_f_in + dTmin_HX

Q_real := mcp_c*(T_c_in - T_c_out)

T_f_out := T_f_in + Q_real/mcp_f

Endif

```

Código 1: Intercambio de calor, conocidas las condiciones de entrada y el gasto másico.

Con el intercambio de calor definido, se aplica un nuevo código (**Código 2**) para calcular la eficiencia del intercambio de calor

```

m_cp_min := min(m_c*cp_c;m_f*cp_f)

Q_max := mcp_min*(T_c_in-T_f_in)

epsilon := Q_real/Q_max

```

Código 2: Eficiencia del intercambio de calor

En la **tabla 9** se recogen los datos referentes a los resultados del intercambio, temperaturas de salida en ambas corrientes, el calor intercambiado y la eficiencia del intercambio.

Tabla 9: Resultados de la carga del foco caliente en el ciclo básico.

Resultados		Valor	Unidad
Temperatura de salida del CO ₂	T _{in,hidraulica,CO2,carga}	296,3	K
Temperatura de salida del agua caliente	T _{agua,caliente,deposito,cargado}	449,9	K
Calor real intercambiado	Q _{real,foco,caliente,carga}	275,6	kJ/kg
Calor máximo	Q _{max,foco,caliente,carga}	282,4	kJ/kg
Eficiencia	ε _{foco,caliente,carga}	0,9759	

2.4.2 Carga del foco frío: evaporador de CO₂.

Este intercambio de calor implica la cesión de calor por parte del hielo (estado sólido) al CO₂ (estado líquido). Aun estando uno de los fluidos en estado sólido, el intercambio de calor se modela como dos flujos en contracorriente.

En el intercambio de calor, se produce el cambio de estado del dióxido de carbono. En este caso, el CO₂ se corresponde con la corriente que absorbe calor (lado frío) y el hielo es el que cede (lado caliente). La energía intercambiada está definida por el flujo de dióxido de carbono y sus condiciones de entrada y salida (entalpía y presión). Además las temperaturas del hielo están definidas, por lo que las variables a determinar son el flujo de hielo (kg/s) y la diferencia de temperaturas mínima.

En primer lugar se calculan las temperaturas del CO₂ en la entrada y la salida del intercambiador, a través de su entalpía y presión. Además se calcula también las propiedades (entalpía y temperatura) en el punto de líquido saturado.

Tabla 10: Parámetros de la carga del foco frío en el ciclo base.

Parámetros		Valor	Unidad
Presión del hielo	P _{hielo}	100	Bares
Presión del CO ₂	P _{baja,CO2,carga}	18	bares
Gasto másico del dióxido de carbono	m _{CO2carga}	1	kg/s
Temperatura de entrada del hielo	T _{hielo,inicial}	253,9	K
Temperatura de salida del hielo	T _{hielo,deposito,cargado}	251,3	K
Temperatura de entrada del CO ₂	T _{out,hidráulica,CO2,carga}	250,3	K
Temperatura de salida del CO ₂	T _{in,compresor,CO2,carga}	250,3	K
Incremento de entalpía del CO ₂	Δh _{CO2}	223,37	kJ/kg

La siguiente función (**código 3**) identifica si el dióxido de carbono necesita un precalentamiento antes de empezar a condensar o si éste ya está en el cambio de fase en la entrada del intercambiador, para hacer un correcto cálculo del calor intercambiado en cada zona.

```

If (h_f_saturado > h_f_in) Then
    Q_precalentamiento := m_f*(h_f_saturado - h_f_in)
    Q_evaporacion := m_f*(h_f_out - h_f_saturado)
    Q_real := m_f*(h_f_out - h_f_in)
Else
    Q_precalentamiento := 0
    Q_evaporacion := m_f*(h_f_out - h_f_in)
    Q_real := m_f*(h_f_out - h_f_in)
Endif

```

Código 3: Precalentamiento y evaporación hasta el punto de vapor saturado.

A continuación se calcula el flujo de hielo necesario para satisfacer las condiciones del intercambio con la **ecuación 5**.

Por último con esta última temperatura, se implanta una función (**código 4**) con el que se puede calcular las diferencias en los tres puntos donde puede estar la temperatura mínima: entrada, salida, cambio de pendiente, y la eficiencia en el intercambio.

```

dT_1 := T_c_in - T_f_out
dT_2 := T_c_frio_saturado - T_f_saturado
dT_3 := T_c_out - T_f_in
dTmin_HX := min(dT_1;dT_2;dT_3)

```

Código 4: Diferencias de temperatura en el precalentamiento y evaporación.

La **tabla 11** recoge los resultados del intercambio de calor con el foco frío en el ciclo de carga básico.

Tabla 11: Resultados de la carga del foco frío en el caso base.

Resultados		Valor	Unidad
Calor de precalentamiento	$Q_{\text{precalentamiento}}$	0	kJ
Calor de evaporación	$Q_{\text{evaporación}}$	215,9	kJ
Calor total	$Q_{\text{real,foco,frio,carga}}$	215,9	kJ
Flujo de hielo	$m_{\text{hielo,carga}}$	41,42	kg/s
Temperatura del CO ₂ en el punto de líquido saturado	$T_{\text{CO}_2,\text{saturado}}$	250,3	K
Temperatura del hielo en el cambio de pendiente	$T_{\text{hielo,CO}_2,\text{saturado}}$	251,3	K
Diferencia de temperatura mínima	$DT_{\text{min,foco,frio,carga}}$	1	K
Calor máximo	$Q_{\text{max,foco,frio,carga}}$	223,8	kJ
Eficiencia	$\epsilon_{\text{foco,frio,carga}}$	0,965	

2.4.3. Diagrama T-Q en el ciclo de carga

En la **figura 10**, se muestra la evolución de los fluidos en el ciclo de carga tanto en la zona de alta presión como en la de baja. La evolución del dióxido de carbono está representado con la línea amarilla, el agua caliente con la roja y la línea azul representa el hielo.

En la parte superior se muestra la carga del agua caliente; se puede observar la evolución prácticamente paralela de ambas corrientes, lo que es una muestra de la alta eficiencia del intercambio. Además, el gran salto de temperaturas en ambos permite transferir gran cantidad calor con gastos másicos bajos y similares.

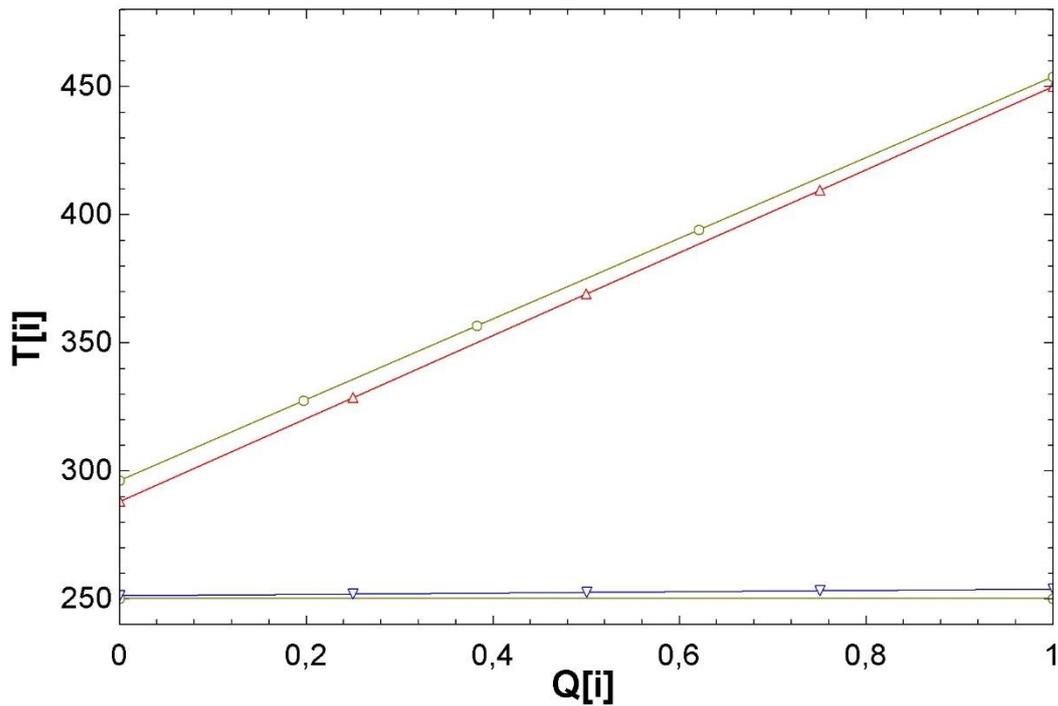


Ilustración 10: Diagrama T-Q de la transferencia de calor en el ciclo de carga

En la parte inferior se representa la carga del hielo, en la que la temperatura del CO₂ se mantiene constante por el cambio de estado, provocando un salto de temperatura demasiado bajo en el hielo, lo que supondrá un gran gasto de hielo necesario en comparación con el del CO₂. Además, para conseguir un intercambio efectivo (temperatura de la corriente caliente mayor que la de la corriente fría), se necesita una diferencia de temperaturas mínima entre ambos perfiles. La diferencia mínima de temperaturas es de 1 K, lo que puede ser demasiado baja, pero no es posible aumentarla por la excesiva proximidad entre las presiones en el lado de baja de carga y descarga.

2.4.4 Intercambio de calor en la descarga: foco caliente.

El agua caliente cede calor al dióxido de carbono. Los flujos de ambas corrientes están definidos, pues al igual que en la carga, se parte de un gasto unitario de CO₂, y de un gasto másico de agua caliente de 0,4 kg/s por cada kg de CO₂, así como las temperaturas de entrada y salida del agua, por lo que el calor transferido se define mediante la **ecuación 6**.

Tabla 12: Parámetros en la descarga del foco caliente en el ciclo básico.

Parámetros		Valor	Unidad
Presión del agua caliente	$P_{\text{agua,caliente}}$	100	Bares
Presión del CO ₂	$P_{\text{alta,CO2,descarga}}$	174,2	Bares
Gasto másico del dióxido de carbono	$m_{\text{CO2,descarga}}$	1	kg/s
Gasto másico de agua caliente	$m_{\text{H2O,descarga}}$	0,4	kg/s
Temperatura de entrada del CO ₂	$T_{\text{out,bomba,CO2,des}}$	264,1	K

Temperatura de entrada del agua caliente	$T_{\text{agua,caliente,deposito,cargado}}$	467,7	K
Temperatura de salida del agua	$T_{\text{agua,caliente,inicial}}$	288,2	K

Lo siguiente es el cálculo a través de la **ecuación 5** de la temperatura de salida del dióxido de carbono, fundamental para el trabajo y el rendimiento del ciclo, pues es la temperatura de entrada a la turbina.

Una vez calculada la temperatura de salida se comparan las diferencias de temperaturas en los extremos del intercambiador, y no es necesario evaluar ningún otro punto puesto que no se produce el cambio de fase de ninguno de los fluidos.

Por último se evalúa la eficiencia del intercambio mediante el **código 2**.

Tabla 13: Resultados de la carga del foco caliente en el ciclo básico.

Resultados		Valor	Unidad
Calor real intercambiado	$Q_{\text{real,foco,caliente,des}}$	275,2	kJ/kg
Temperatura de salida del CO ₂	$T_{\text{in,turbina,CO2,des}}$	418,6	K
Diferencia de temperatura mínima	$DT_{\text{min,foco,caliente,des}}$	24,1	K
Calor máximo	$Q_{\text{max,foco,caliente,des}}$	316,2	kJ/kg
Eficiencia	$\epsilon_{\text{foco,caliente,des}}$	0,8703	

La diferencia de temperatura mínima es de 24,1 K, un valor muy alto comparado con la diferencia de temperaturas mínima de 4 K de la carga del agua caliente o 1 K de la carga del hielo (aunque este último caso es posible que tenga un valor demasiado bajo).

2.4.5 Intercambio de calor en la descarga del foco frío: condensador

Como en el ciclo de carga, se produce el cambio de estado del dióxido de carbono. El hielo se corresponde con la corriente que absorbe calor (lado frío) mientras que el dióxido de carbono cede calor condensando (lado caliente). El intercambio es similar al del ciclo de carga, siguiendo el mismo procedimiento, con la diferencia que el flujo de hielo ahora es el de la corriente fría, y el cambio de pendiente se produce en el otro extremo de la campana de saturación.

Tabla 14: Parámetros de la descarga del foco frío en el ciclo básico.

Parámetros		Valor	Unidad
Presión del hielo	P_{hielo}	100	Bares
Presión del CO ₂	$P_{\text{baja,CO2,des}}$	20,8	bares
Gasto másico del dióxido de carbono	m_{CO2carga}	1	kg/s
Temperatura de entrada del hielo	$T_{\text{hielo,deposito,cargado}}$	251,3	K
Temperatura de salida del hielo	$T_{\text{hielo,inicial}}$	253,9	K
Temperatura de entrada del CO ₂	$T_{\text{out,turbina,CO2,des}}$	258,4	K
Temperatura de salida del CO ₂	$T_{\text{in,bomba,CO2,des}}$	254,9	K
Incremento de entalpía del CO ₂	Δh_{CO2}	282,9	kJ/kg

En lugar del precalentamiento del ciclo de carga, en este caso es un enfriamiento previo al comienzo de la condensación, se define una función (**código 5**) que identifica si el fluido está dentro de la campana de saturación, o no, al comenzar el intercambio.

```

If (h_c_in > h_c_saturado) Then
    Q_enfriamiento := m_c * (h_c_in - h_c_saturado)
    Q_condensacion := m_c * (h_c_saturado - h_c_out)
    Q_real := m_c * (h_c_in - h_c_out)
Else
    Q_enfriamiento := 0
    Q_condensacion := m_c * (h_c_in - h_c_out)
    Q_real := m_c * (h_c_in - h_c_out)
Endif

```

Código 5: Enfriamiento y condensación hasta el punto de líquido saturado.

El gasto másico de hielo necesario y temperatura del hielo que corresponde con el inicio de la condensación del CO₂ se calculan de la misma forma, mediante la **ecuación 6**.

Al igual que se hacía en la carga con la evaporación, mediante el **código 6** se determina la diferencia de temperatura en los tres puntos donde puede estar la temperatura mínima: entrada, salida, cambio de pendiente, y la eficiencia en el intercambio.

```

dT_1 := T_c_in - T_f_out
dT_2 := T_c_saturado - T_f_caliente_saturado
dT_3 := T_c_out - T_f_in
dTmin_HX := min(dT_1; dT_2; dT_3)

```

Código 6: Diferencias de temperatura en el enfriamiento y condensación.

La **tabla 15** recoge los resultados del intercambio de calor con el foco frío en el ciclo de descarga básico.

Tabla 15: Resultados de la descarga del foco frío en el ciclo básico.

Resultados		Valor	Unidad
Calor de enfriamiento	Q _{enfriamiento}	4,442	kJ/kg
Calor de condensación	Q _{condensación}	278,4	kJ/kg
Calor total	Q _{real,foco,frío,des}	282,9	kJ/kg
Flujo de hielo	m _{hielo,des}	54,26	kg/s
Temperatura del CO ₂ en el punto de líquido saturado	T _{CO₂,saturado}	254,9	K
Temperatura del hielo en el cambio de pendiente	T _{hielo,CO₂,saturado}	253,7	K

Diferencia de temperatura mínima	$DT_{\min,\text{foco,frio,des}}$	1,042	K
Calor máximo	$Q_{\max,\text{foco,frio,des}}$	287,8	kJ/kg
Eficiencia	$\varepsilon_{\text{foco,frio,des}}$	0,9828	

2.4.6 Diagrama T-Q en el ciclo de descarga

En la **ilustración 11**, se muestra la evolución de los fluidos en el ciclo de descarga. El agua caliente está representado con la línea roja, el hielo con la línea azul y el ciclo de descarga de dióxido de carbono con la línea verde.

En la parte superior podemos ver el perfil de temperaturas en la descarga del foco caliente. En comparación con el perfil de temperaturas de la carga, se puede observar la mayor separación entre las líneas de corriente. Este fenómeno se debe a los gastos de agua caliente considerados en ambos intercambios. Con el gasto másico del CO_2 fijo en 1 kg/s, para conseguir aumentar la temperatura de salida del CO_2 (menor diferencia mínima de temperaturas) se tiene que aumentar el gasto másico de agua caliente.

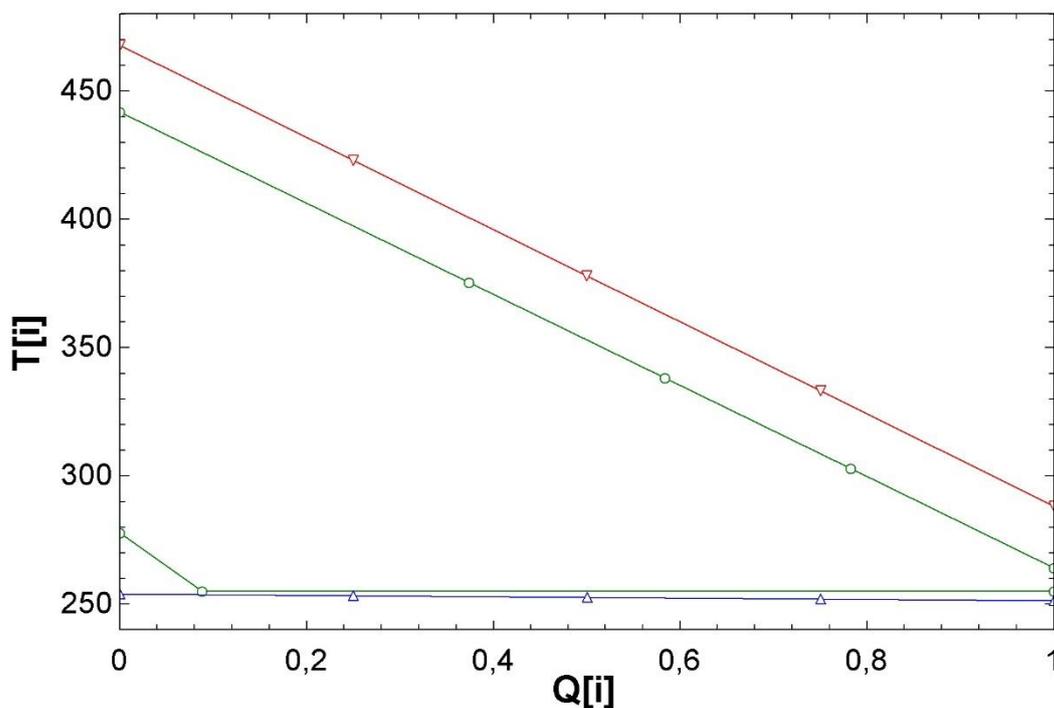


Ilustración 11: Diagrama T-Q del ciclo de descarga

En la parte inferior se muestra la evolución de las temperaturas en la descarga del foco frío. En este intercambio, se produce un cambio de pendiente en el CO_2 , producido por el cambio de fase, lo que provoca que la diferencia mínima de temperaturas esté en el punto de vapor saturado de CO_2 , a la presión de baja en la descarga, punto del cambio de pendiente. Esta diferencia mínima de temperaturas puede ser demasiado pequeña para la práctica. Al igual que en la carga del foco frío, el salto de temperaturas en el hielo es muy pequeño en comparación con el agua caliente, lo que conducirá a un gran gasto de hielo comparado con el de agua.

2.5 Trabajo y calor

Una vez definidas las condiciones de todos los puntos del ciclo, en la **tabla 16** se recogen los valores de trabajo y calor del caso base. Las **ecuaciones 7-10** definen el trabajo realizado por los equipos del sistema, compresor, turbina hidráulica, bomba y turbina respectivamente.

$$W_{\text{compresion,carga}} = (h_{\text{out,compresor,CO2,carga}} - h_{\text{in,compresor,CO2,carga}})$$

Ecuación 7: Trabajo del compresor.

$$W_{\text{hidraulica,carga}} = (h_{\text{in,hidraulica,CO2,carga}} - h_{\text{out,hidraulica,CO2,carga}})$$

Ecuación 8: Trabajo de la turbina hidráulica

$$W_{\text{bomba,descarga}} = (h_{\text{out,bomba,CO2,des}} - h_{\text{in,bomba,CO2,des}})$$

Ecuación 9: Trabajo de compresión de la bomba

$$W_{\text{turbina,descarga}} = (h_{\text{in,turbina,CO2,des}} - h_{\text{out,turbina,CO2,des}})$$

Ecuación 10: Trabajo de expansión en la turbina

El trabajo neto que consume el ciclo de carga es mayor que el trabajo neto que produce el ciclo de descarga. El aprovechamiento de las diferencias horarias en la tarifa de electricidad es indispensable para que el ciclo sea coherente.

Tabla 16: Calor y trabajo en el ciclo básico

		(kJ/kg)
Trabajo de compresión	$W_{\text{compresion,carga}}$	137,5
Trabajo de expansión en turbina hidráulica	$W_{\text{hidraulica,carga}}$	20,02
Trabajo de compresión en bomba	$W_{\text{bomba,descarga}}$	17,39
Trabajo de expansión en turbina	$W_{\text{turbina,descarga}}$	86,7
Calor cedido al agua caliente en el ciclo de carga	$Q_{\text{foco,caliente,carga}}$	275,6
Calor cedido por el hielo en el ciclo de carga	$Q_{\text{foco,frio,carga}}$	215,9
Calor cedido por el agua caliente en el ciclo de descarga	$Q_{\text{foco,caliente,des}}$	275,2
Calor cedido al hielo en el ciclo de descarga	$Q_{\text{foco,frio,des}}$	282,9

El calor en el foco caliente en la carga y la descarga es similar, como el calor del foco frío en la descarga, que también tienen un valor parecido a estos últimos. Sin embargo, el calor del foco frío en la carga está por debajo, siendo un 23,68% menos que en la descarga.

Para conseguir un aprovechamiento total de los dos focos, será necesario coordinar el gasto másico de carga y descarga en cada uno, para conseguir la descarga simultánea de ambos.

2.6 Eficiencia

Los valores de la eficiencia en el ciclo de carga, descarga y total del caso base, se calculan con las **ecuaciones 11-13**, respectivamente. Estos rendimientos son

calculados mediante trabajo de los equipos del sistema y calor cedido y absorbido por el almacenamiento.

$$\text{COP}_{\text{carga}} = \frac{Q_{\text{real,descarga,caliente}} + Q_{\text{real,descarga,frio}}}{W_{\text{compresion,carga}} - W_{\text{hidraulica,carga}}}$$

Ecuación 11: Rendimiento del ciclo básico de carga

$$\eta_{\text{descarga}} = \frac{W_{\text{turbina,descarga}} - W_{\text{bomba,descarga}}}{Q_{\text{real,carga,caliente}} + Q_{\text{real,carga,frio}}}$$

Ecuación 12: Rendimiento del ciclo básico de descarga

$$\eta_{\text{total}} = \frac{W_{\text{turbina,descarga}} - W_{\text{bomba,descarga}}}{W_{\text{compresion,carga}} - W_{\text{hidraulica,carga}}}$$

Ecuación 13: Rendimiento global del ciclo básico.

En la **tabla 17** se recogen los valores de rendimiento del ciclo de carga, descarga y global del sistema.

Tabla 17: Rendimiento en el ciclo básico

Rendimiento del ciclo de carga	$\text{COP}_{\text{carga}}$	4,182
Rendimiento del ciclo de descarga	η_{descarga}	0,1242
Rendimiento global	η_{total}	0,5896

3. Optimización del ciclo de CO₂ y agua.

3.1 Balance de masas

3.1.1 Ciclo de carga

Considerando un flujo unitario de CO₂, se realiza un primer análisis del flujo de agua necesario para conseguir maximizar la transferencia de calor y aprovechar al máximo la diferencia de temperaturas.

El efecto de la variación del gasto másico de agua caliente se estudia en la **ilustración 12**, mediante la variación del parámetro $x_{H_2O,carga}$, relación entre el gasto másico de agua caliente y el de CO₂ en la carga.

$$x_{H_2O} = \frac{m_{H_2O}}{m_{CO_2}}$$

Ecuación 14: Fracción másica del agua caliente

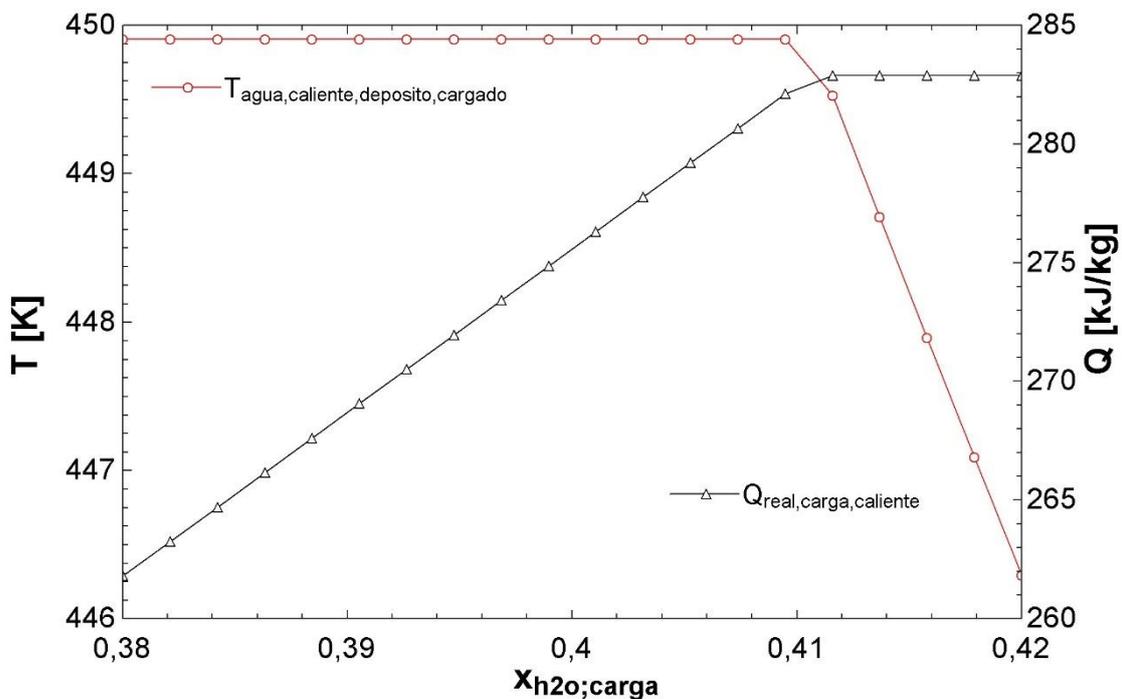


Ilustración 12: Variación de temperaturas de carga y del calor intercambiado en el ciclo básico de carga.

Para un gasto másico del CO₂ de 1 kg/s, un gasto másico de agua caliente de 0,41 kg/s consigue maximizar la transferencia de calor sin que la temperatura máxima del foco caliente se vea afectada. A partir de este valor, el calor intercambiado permanece constante, pero la diferencia mínima de temperaturas en el intercambio cambia al otro extremo del intercambiador, haciendo que la temperatura de salida del agua caliente disminuya.

En la **tabla 18** se muestra el rendimiento global del sistema y el trabajo de la turbina en la descarga para diferentes valores de la fracción másica de agua caliente en el ciclo de carga.

Tabla 18: Influencia de la variación en la fracción másica del agua caliente en la carga.

Fracción másica del agua en la carga.	$x_{H_2O,CARGA}$	0,35	0,4	0,45	0,5
Trabajo en la turbina (kJ/kg)	$W_{turbina}$	81,67	86,9	79	70
Rendimiento global	η_{total}	0,582	0,59	0,52	0,45

Como se observa en la tabla, al modificar la fracción másica del agua caliente en la carga, no sólo se modifican las características del intercambio, sino que tiene una influencia muy importante en el rendimiento global y el trabajo en la turbina.

3.1.2 Ciclo de descarga

Considerando el mismo flujo de 1 kg/s de CO_2 , se realiza el mismo análisis anterior del flujo de agua necesario para conseguir maximizar la transferencia de calor y aprovechar al máximo la diferencia de temperaturas en el ciclo de descarga.

Con la variación de la fracción másica del agua caliente en la descarga se estudia el efecto en la transferencia de calor en la **ilustración 13**.

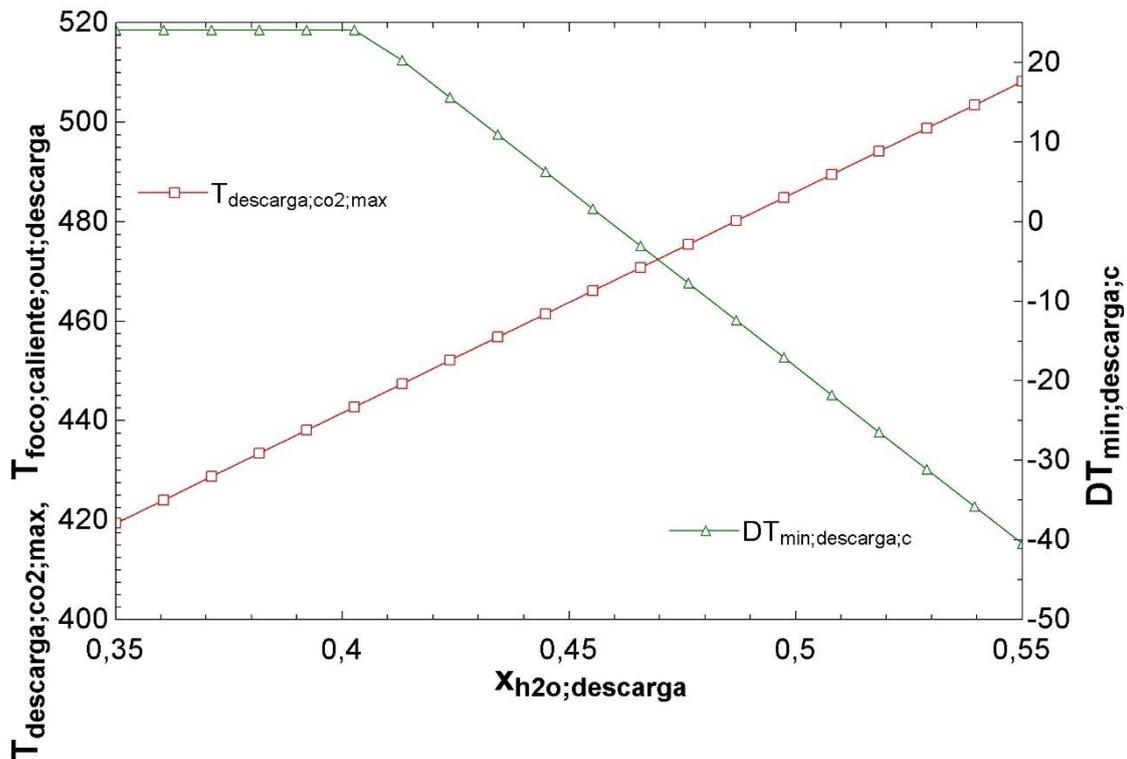


Ilustración 13: Variación de temperatura y diferencia mínima de temperatura en el intercambio en el ciclo básico de descarga.

La temperatura máxima del dióxido de carbono en la descarga debe ser lo más alta posible (mayor trabajo en la turbina). La diferencia mínima de temperatura es clave en este aspecto. El cambio de tendencia en la línea de la diferencia de temperatura indica el cambio de lugar donde se encuentra en el intercambio.

Los valores negativos en la diferencia de temperaturas son prohibitivos, dado que se cruzarían las líneas de temperatura en el intercambio de calor. La **ilustración 14** muestra la misma gráfica anterior en la zona de diferencia de temperaturas positiva.

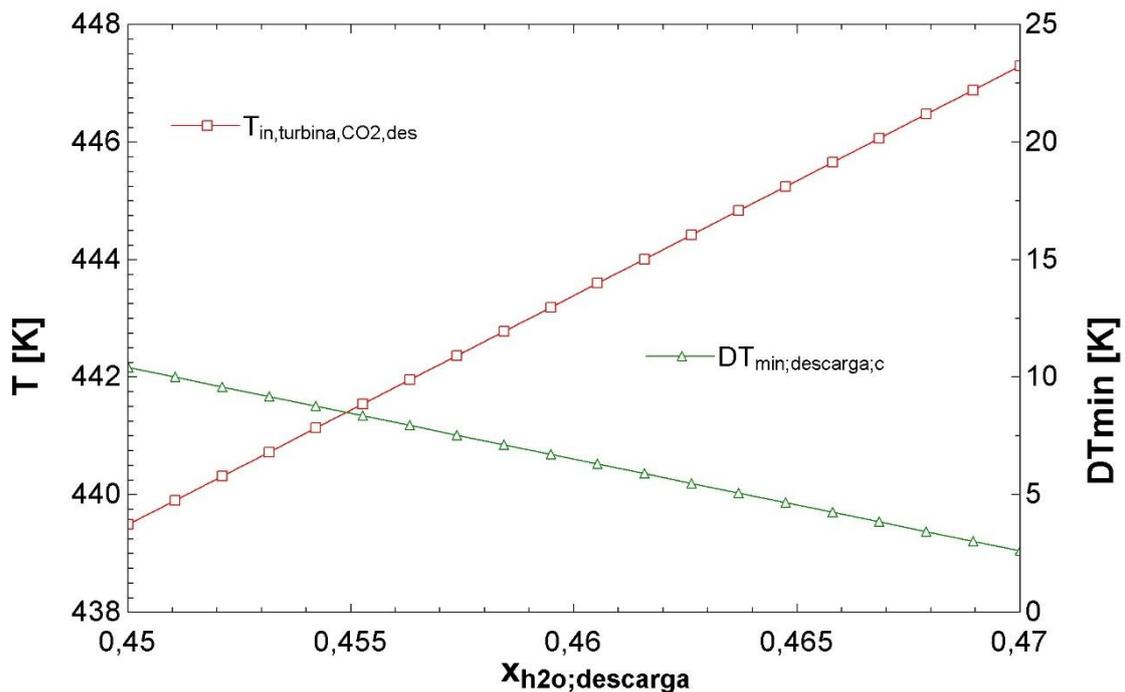


Ilustración 14: Variación de temperatura y diferencia mínima de temperaturas (2)

Una diferencia de temperaturas adecuada puede situarse en el intervalo 4 – 10°C, que se corresponde con un gasto másico de agua caliente en la descarga de 0,455 – 0,466 kg/s. Para optimizar al máximo posible el intercambio, se determina una diferencia mínima de temperaturas de 4°C, que se consigue mediante una fracción másica de agua caliente en la descarga de 0,4663.

Tabla 19: Influencia de la fracción másica del agua caliente en el ciclo de descarga.

Fracción másica del agua en la descarga.	$X_{H_2O,descarga}$	0,35	0,4	0,45	0,5
Trabajo en la turbina (kJ/kg)	$W_{turbina}$	76,68	88,03	98	85
Rendimiento global	η_{total}	0,5	0,59	0,68	0,55

Si en el intercambio de calor se hubiese fijado desde un principio la diferencia mínima de temperaturas en el extremo deseado del intercambiador, determinando las temperaturas, en vez de partir de un gasto másico de agua caliente, se puede establecer un intercambio que dé como resultado el gasto que lo hace óptimo.

3.1.3 Resultados

Considerando los nuevos valores en las fracciones másicas del agua caliente, las **figuras 15 y 16** muestran los diagramas T-Q de los ciclos básicos de carga y descarga, respectivamente.

Tabla 20: Fracción másica del agua caliente que optimiza el intercambio.

Fracciones másicas	Valor
Fracción másica del agua caliente en la carga	$X_{H_2O,carga}$ 0,41
Fracción másica del agua caliente en la descarga	$X_{H_2O,descarga}$ 0,466

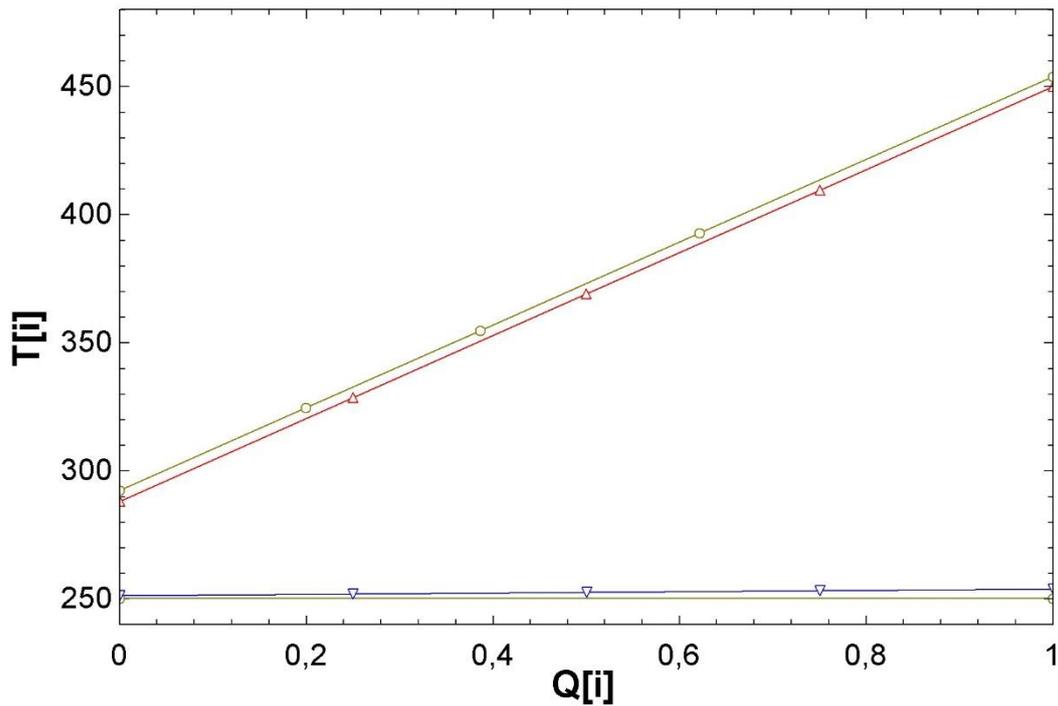


Ilustración 15: Diagrama T-Q del ciclo de carga básico con el gasto másico de agua caliente óptimo

El intercambio de calor en la carga es prácticamente igual al anterior. En el foco caliente, que es donde es clave el gasto másico de agua, las líneas permanecen a la misma distancia, prácticamente paralelas. La fracción másica que optimizaba el intercambio es de 0,41, y los cálculos de partida se realizaron con una fracción másica de 0,4.

En el ciclo de descarga, sin embargo, la fracción másica que optimizaba el intercambio eran 0,466, mientras que el gasto inicialmente considerado era el mismo que en el ciclo de carga, 0,4.

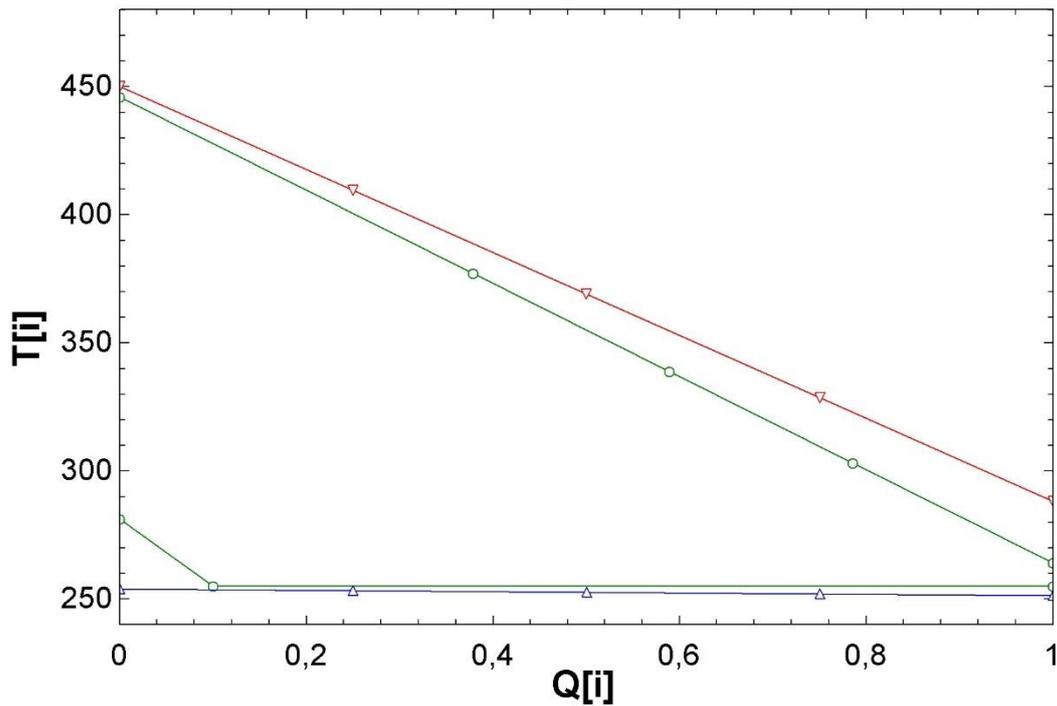


Ilustración 16: Diagrama T-Q del ciclo básico de descarga con el gasto de agua caliente óptimo

A diferencia del perfil de temperaturas anterior, la línea que representa el CO₂ (verde) cada vez se acerca más a la del agua caliente (roja). La diferencia de temperaturas se encuentra claramente en el extremo de salida del CO₂, maximizando el salto de entalpía en la turbina.

En la **tabla 21** se comparan los valores de calor y trabajo expresados en kJ/kg, en el ciclo básico, sombreado en azul claro, y el ciclo básico con los gastos óptimos en el gasto de agua caliente, sombreado en azul más intenso.

Tabla 21: Comparativa de resultados entre el ciclo básico y el ciclo básico con intercambio de calor optimizado.

		CB	CB,op	
Trabajo de compresión	$W_{\text{compresion,carga}}$	137,5	137,5	=
Trabajo de expansión en turbina hidráulica	$W_{\text{hidraulica,carga}}$	20,02	18,96	↓
Trabajo de compresión en bomba	$W_{\text{bomba,descarga}}$	17,39	17,39	=
Trabajo de expansión en turbina	$W_{\text{turbina,descarga}}$	86,7	101	↑
Calor cedido al agua caliente en el ciclo de carga	$Q_{\text{foco,caliente,carga}}$	275,6	289,5	↑
Calor cedido por el hielo en el ciclo de carga	$Q_{\text{foco,frio,carga}}$	215,9	223,4	↑
Calor cedido por el agua caliente en la descarga	$Q_{\text{foco,caliente,des}}$	275,2	320,8	↑
Calor cedido al hielo en el ciclo de descarga	$Q_{\text{foco,frio,des}}$	282,9	309,3	↑
Rendimiento del ciclo de carga	$\text{COP}_{\text{carga}}$	4,182	4,261	↑
Rendimiento del ciclo de descarga	η_{descarga}	0,1242	0,1327	↑
Rendimiento global	η_{total}	0,5896	0,7053	↑

El rendimiento del ciclo de carga aumenta un 1,89%, y depende de los valores del trabajo de compresión y de expansión en la turbina hidráulica, así como del calor cedido a los focos en el ciclo de carga.

El trabajo de compresión, que depende únicamente de los valores de presión baja y alta en el ciclo de carga, permanece constante. El trabajo de expansión en la turbina hidráulica disminuye un 5,29%, pues al optimizar el intercambio de calor, la temperatura de CO₂ que entra en la turbina hidráulica baja, disminuyendo la expansión. Esto afecta negativamente al rendimiento del ciclo de carga desde el punto de vista mecánico.

En cuanto al calor intercambiado con el foco caliente y con el foco frío en el ciclo de carga, aumenta en los dos, en un 5,04% y en un 3,47% respectivamente. La temperatura de entrada en la turbina hidráulica disminuye pues el CO₂ cede más calor al agua caliente, y a su vez, se desplaza la línea de expansión a la izquierda, aumentando el calor de evaporación del CO₂.

El rendimiento del ciclo de descarga, aumenta casi 1 punto, y se ve afectado por los valores del trabajo de expansión de la turbina en la descarga y de la bomba, además del calor cedido por los focos en el ciclo de descarga.

El trabajo en la bomba permanece invariable, pues depende de las presiones de alta y descarga de la descarga. El trabajo en turbina aumenta un 16,5%, pues la temperatura del CO₂ que entra en la turbina aumenta hasta situarse a 4 K (diferencia de temperaturas mínima) de la temperatura del agua caliente cuando el depósito está cargado.

El aumento de la temperatura del CO₂ está provocado por el aumento del calor intercambiado con el foco caliente, que es un 16,57% mayor. Con un calentamiento a presión constante, al aumentar la temperatura de entrada en turbina, la línea de expansión se desplaza a la izquierda, lo que aumenta el calor de enfriamiento necesario previo a la condensación. El calor intercambiado con el foco frío aumenta un 9,33%.

El balance global de la optimización es un aumento del rendimiento global en 11,57 puntos, situándose en un 70,53%.

3.2 Análisis del ciclo de carga

3.2.1 Presión alta de carga

El sistema está definido inicialmente a partir de cuatro valores de presión [1]. Una presión de alta y una presión de baja para cada ciclo, carga y descarga.

Realizando un análisis de la variación de los parámetros del sistema en un rango de [160:280] bares de presión alta del dióxido de carbono de en el ciclo de carga obtenemos los siguientes resultados.

La **gráfica 17** muestra la evolución del rendimiento global y del trabajo en la turbina. Un aumento en la presión de alta en la carga, manteniendo fija la presión de baja, supone un distanciamiento entre ambas líneas de presión, lo que conlleva un aumento en el trabajo de los equipos en el ciclo de carga.

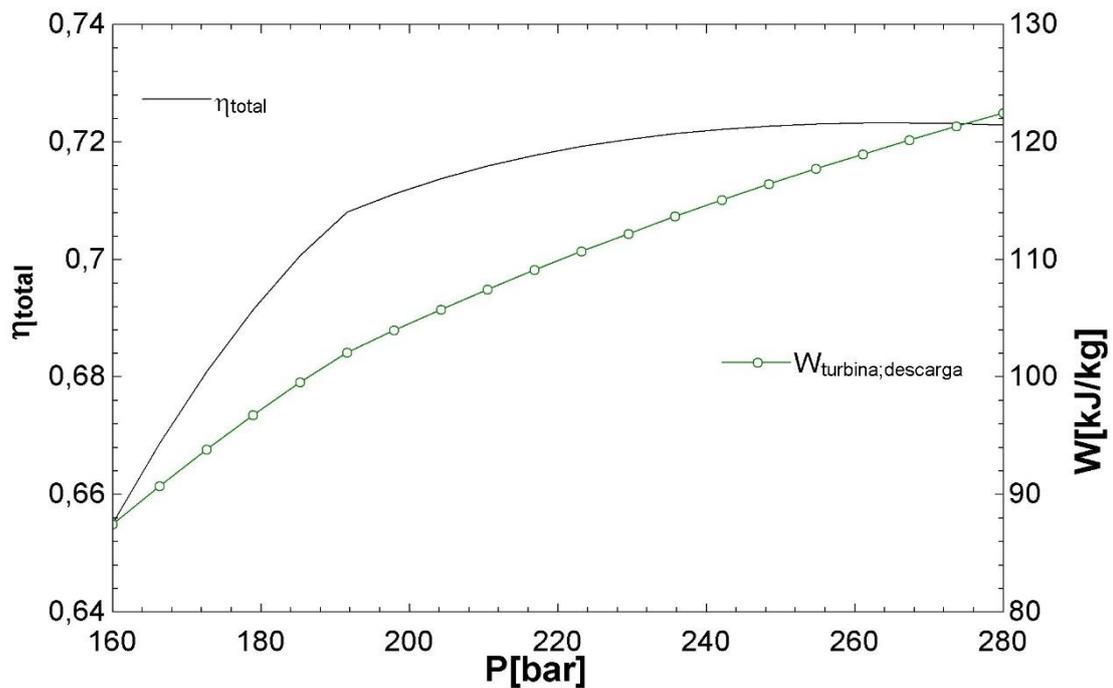


Ilustración 17: Rendimiento y trabajo en la turbina frente a presión alta de carga del ciclo básico

Según aumenta la presión, el salto entálpico disponible en la turbina aumenta considerablemente, unos 10 kJ/kg por cada 20 bares, manteniendo la pendiente ascendente casi constante a lo largo de todo el rango de presión.

El rendimiento tiene un cambio de tendencia aproximadamente en la presión de alta de 190 bares. Presenta una pendiente más acusada en la parte izquierda, para mantenerse de forma casi estable (en 0,72) en la derecha. Observando esta gráfica podría decirse que interesa aumentar la presión alta de carga de CO₂.

La **gráfica 18** muestra las dos temperaturas de salida en el intercambio de calor con el foco caliente en la carga, así como el calor intercambiado en él.

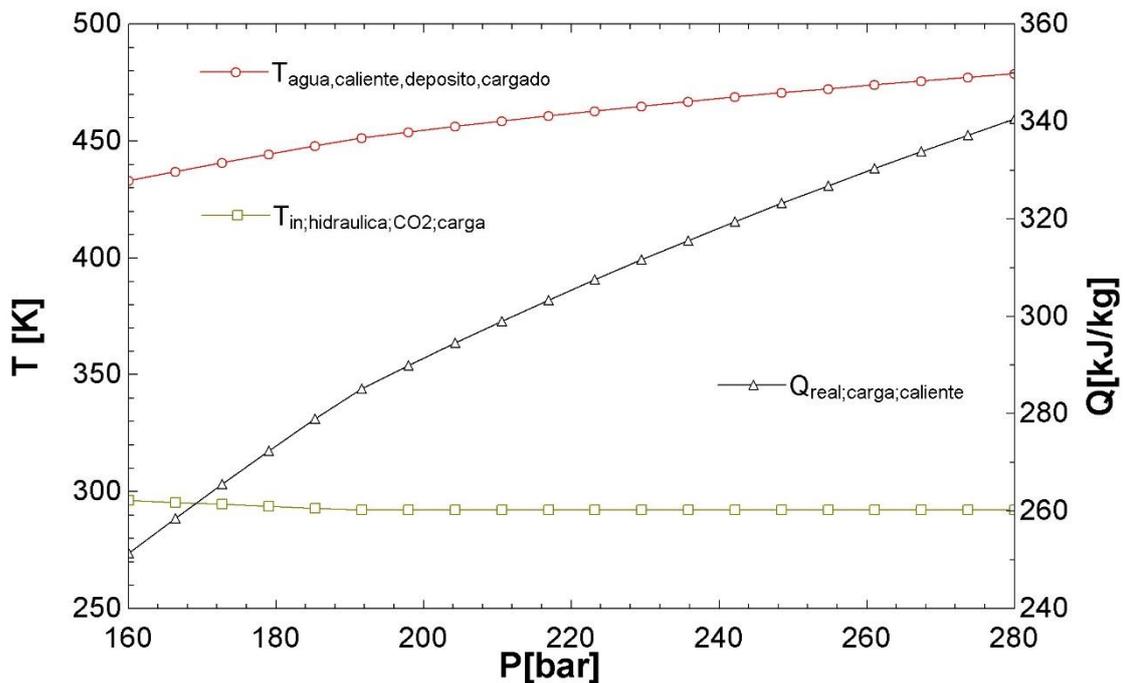


Ilustración 18: Temperaturas y calor frente a presión alta de carga en el ciclo básico

Observando la evolución de las temperaturas del ciclo según aumentamos la presión podemos llegar a varias conclusiones:

- Según aumenta la presión, aumenta la temperatura máxima en el foco caliente, lo cual es un efecto deseable desde el punto de vista de alcanzar un mayor salto entálpico disponible en la turbina, directamente relacionado con el trabajo disponible en la turbina (efecto reflejado en la gráfica anterior).
- La temperatura de salida del CO₂ en la carga del foco caliente disminuye levemente con la presión, para estabilizarse en 292,2 K a partir de 180 bares.
- El calor intercambiado aumenta con la presión, con una pendiente aproximadamente constante, de unos 20 kJ/kg por cada 20 bares.

La **ilustración 19** muestra la variación de la diferencia mínima de temperaturas en la descarga del foco caliente, además de las fracciones máscicas del hielo en los intercambios con el foco frío.

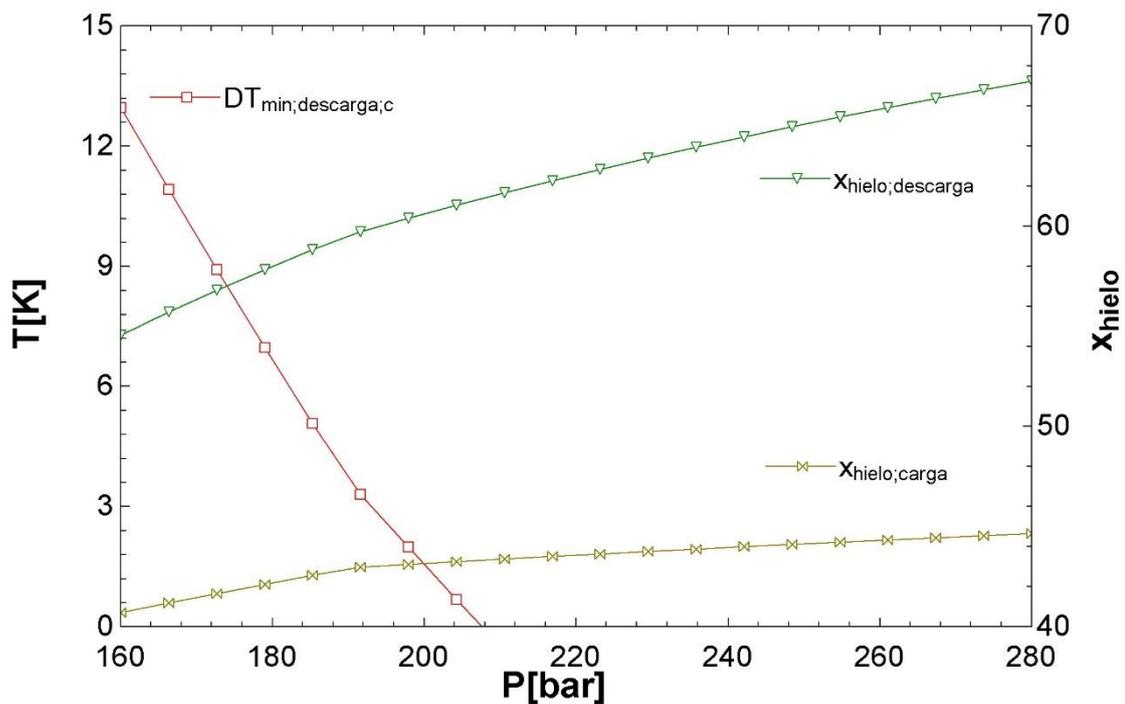


Ilustración 19: Diferencia mínima de temperaturas y gasto másico del hielo frente a presión alta de carga en el ciclo básico.

La diferencia de temperatura mínima en el intercambio de calor de la descarga del foco caliente, disminuye según aumenta la presión, haciéndose negativa a partir de 207 bares, lo que marcaría un límite superior en la presión alta de carga del CO₂. El gasto de hielo necesario tanto en el ciclo de carga como en el de descarga aumenta con la presión.

Tras valorar las tres gráficas anteriores, interesa aumentar la presión de alta de carga, aunque no muy notablemente, ya que aumenta el gasto de hielo necesario en la carga y descarga del foco frío, y siempre por debajo de 207 bares, valor en el que la diferencia mínima de temperatura en la descarga se hace negativa.

Cabe destacar que este análisis de presión se realiza para una fracción másica del agua caliente en la descarga fija de 0,466. Esto hace que la diferencia mínima de temperaturas en la descarga del foco caliente se haga negativa, puesto que se determinó el valor de 4°C para la presión inicial (188,7 bares). Fijando la presión alta de carga por encima de este valor, se puede volver a determinar la diferencia mínima de temperaturas en 4°C ajustando el valor de la fracción másica.

3.2.2 Presión baja de carga

Realizando el mismo análisis pero variando la presión de baja del dióxido de carbono en el ciclo de carga en el rango [6:50] bares, mientras los otros tres valores de presión se mantienen en los de partida, obtenemos los siguientes resultados.

En la **gráfica 20** se muestra la evolución del rendimiento global y del trabajo en la turbina según aumenta la presión baja de carga. Conservando la presión alta de carga fija, cuanto mayor sea la presión de baja, menor será el trabajo en los equipos del ciclo de carga.

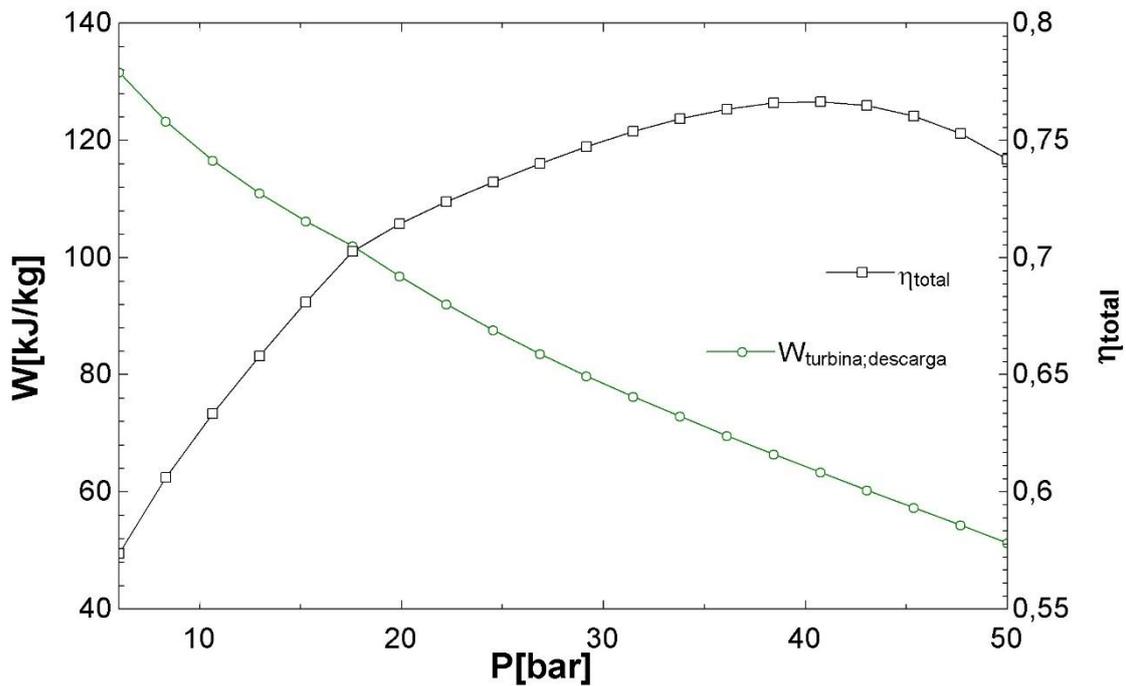


Ilustración 20: Trabajo en turbina y rendimiento frente a presión baja de carga en el ciclo básico.

Según aumenta la presión, el trabajo de la turbina en la descarga disminuye, colocándose en el final (50 bares) por debajo del 50% del valor máximo que se encuentra en el inicio (6 bares). El rendimiento aumenta notablemente, subiendo unos 10 puntos desde 6 hasta 18 bares, estabilizándose entre 0,72 y 0,77 en el intervalo de presiones de 20 – 50 bares.

Aunque desde el punto de vista del trabajo en la turbina interesa disminuir la presión baja de carga del CO₂, aunque a partir de 17 bares aproximadamente, la bajada del rendimiento es acusada y no se puede dejar de tener en cuenta.

En la **ilustración 21** se muestra la evolución del calor intercambiado en ambos focos, tanto en la carga como en la descarga, además de tres temperaturas con evolución destacable.

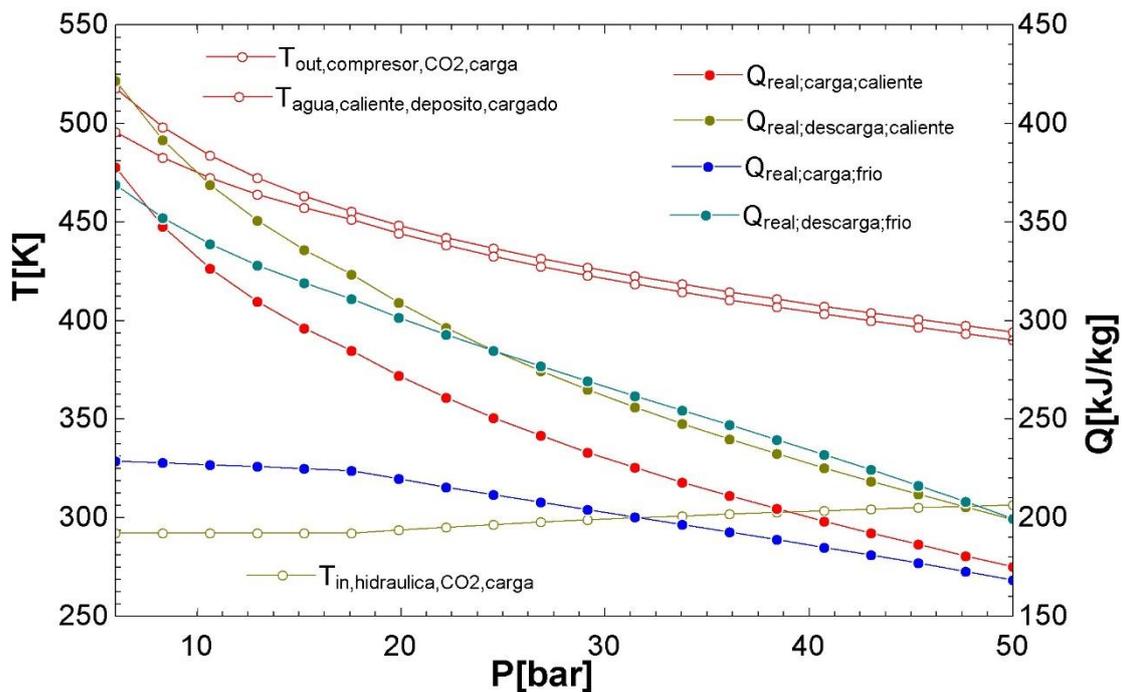


Ilustración 21: Temperaturas y calor frente a presión baja de carga en el ciclo básico

En las temperaturas la evolución es distinta en cada foco, aunque el cambio de tendencia en ambas se produce en el mismo punto, debido a la fracción másica del agua caliente en el intercambiado, donde el valor está fijado en el óptimo para la presión inicial.

La temperatura máxima del CO₂ en la carga (salida del compresor) y la temperatura máxima en el foco caliente (con el depósito cargado) disminuyen con el aumento de la presión baja de carga, debido a que al aumentar la presión de baja, el punto de vapor saturado donde se inicia la compresión se desplaza a la izquierda. Ambas líneas son paralelas a partir de 17 bares. En la parte izquierda, la diferencia mínima de temperaturas pasa al otro extremo del intercambiador y los perfiles de temperaturas se separan. En la parte derecha, la temperatura de salida del CO₂ tras el intercambio de carga del foco caliente comienza a aumentar ligeramente.

El calor en los cuatro intercambios de calor (carga y descarga de ambos focos) disminuye con el aumento de presión, aunque evolucionan de forma distinta. Al aumentar la presión de baja, el calor de evaporación en la carga disminuye, pues el segmento que queda dentro de la campana de saturación es menor.

En la **gráfica 22** se muestra la evolución de las diferencias mínimas de temperaturas en el intercambio con el foco caliente en la descarga y con el foco frío en la carga y descarga, además de las fracciones másicas del hielo en ambos intercambios.

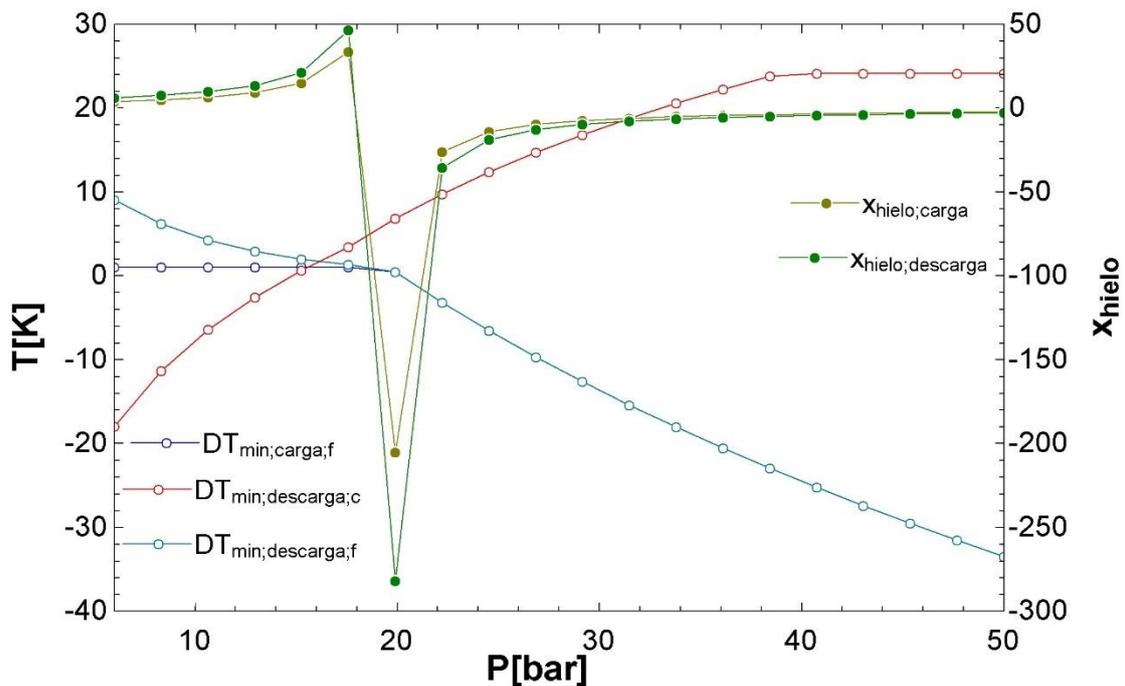


Ilustración 22: Diferencia mínima y gasto másico de hielo frente a presión baja de carga en el ciclo básico.

En la diferencia mínima de temperaturas en los intercambios se observan distintos fenómenos:

- Mientras la diferencia mínima en la descarga del foco caliente aumenta con la presión, la de descarga del foco frío disminuye, y la de carga del frío se mantiene estable hasta los 18 bares, donde también comienza a disminuir de igual forma que la anterior.
- A partir de 20,8 bares, las diferencias mínimas de temperatura en el foco frío en ambos ciclos son negativas, debido a que la presión baja de carga del CO₂ supera a la de descarga, algo que no se puede dar para que se produzca el intercambio de calor.
- La diferencia mínima de temperaturas en la descarga del foco caliente se hace negativa cuando la presión baja en la carga disminuye de 11-12 bares aproximadamente, lo que establece un límite inferior en la presión baja de carga.

Este fenómeno se manifiesta también en los flujos de hielo necesarios para el intercambio. En 19 bares aproximadamente, la gráfica presenta una asíntota. Por el lado izquierdo, el gasto es positivo, mientras que por el derecho es siempre negativo, debido a que la presión baja de carga se hace superior a la de descarga, algo que no puede ocurrir pues se utilizaría una corriente con temperatura mayor para enfriar una corriente con temperatura menor.

Los gastos de hielo necesarios en la carga y descarga del foco frío pueden ser demasiado altos en la presión baja de carga actual. Además, el subir la presión, además de agravar este hecho, supondría que las diferencias mínimas de temperatura se hicieran negativas.

En la **gráfica 23** se muestra el análisis anterior en los límites permitidos.

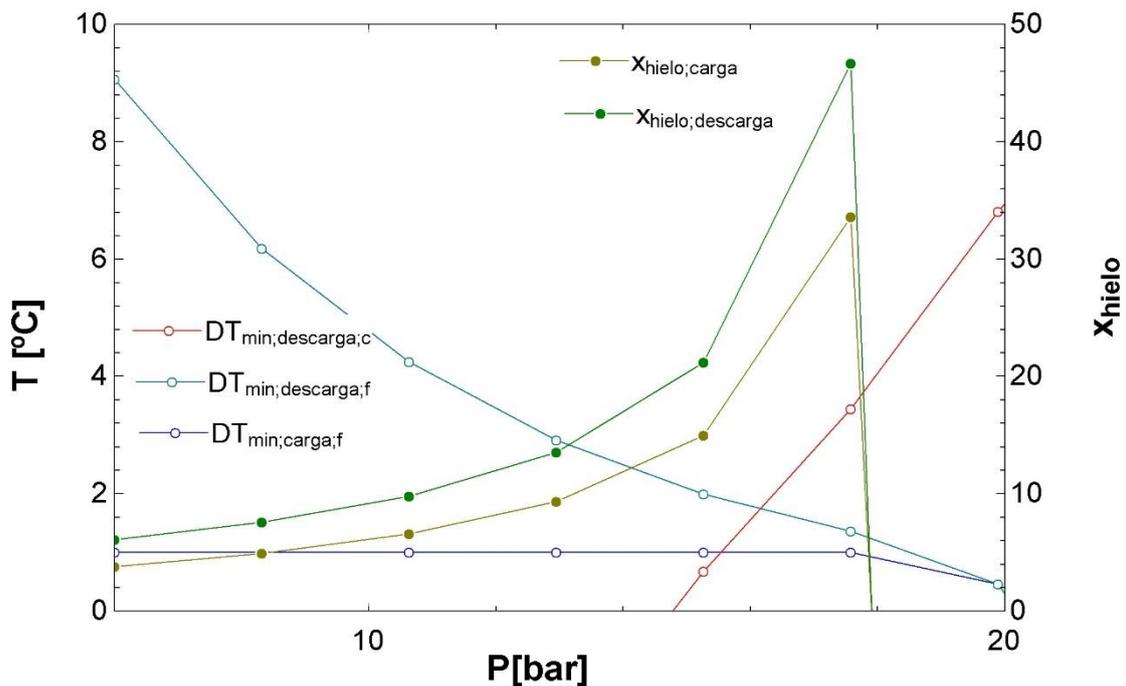


Ilustración 23: Diferencia mínima y gasto másico de hielo frente a presión baja de carga en el ciclo básico (2).

Aunque suponga una disminución del rendimiento, una presión de carga de baja del CO₂ más baja puede tener efectos muy positivos en otros aspectos del ciclo: mayor trabajo en la turbina, gastos de hielo razonables y diferencias mínimas de temperatura en los intercambios con el foco frío algo mayores. Siempre que se mantenga por encima del límite inferior de 14-15 bares que establecía la diferencia mínima de temperaturas en la descarga del foco caliente.

Respecto a la diferencia mínima de temperatura en la descarga del foco caliente, hay que mencionar que depende de la fracción másica de agua caliente. Al igual que en el análisis en la presión alta de carga, al ajustar la fracción másica, la curva se desplaza, permitiendo disminuir la presión por debajo del límite inferior de 14-15 bares.

3.3 Optimización del ciclo de descarga

3.3.1 Presión alta de descarga

Realizando un análisis de la evolución de los parámetros del ciclo al variar la presión de alta en la descarga en un rango de [140:280] bares, mientras se mantienen fijos el resto de valores de presión, se generan los siguientes resultados.

En la **gráfica 24** se representa la variación del rendimiento global y del trabajo en la turbina. La relación entre la presión de alta y baja en la descarga está directamente relacionada con el trabajo en la turbina. Al aumentar la presión de alta y dejar fija la de baja, las líneas de presión constante se separan, aumentando el trabajo que realizan los equipos del ciclo de descarga.

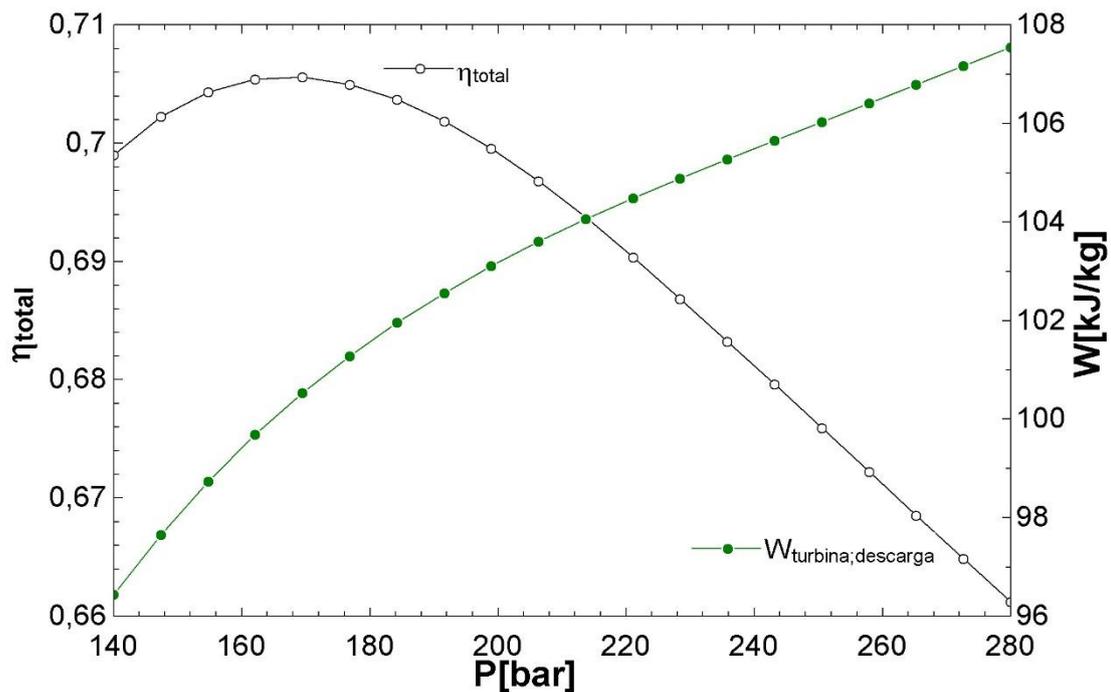


Ilustración 24: Rendimiento y trabajo en turbina frente a presión alta de descarga en el ciclo básico.

Al igual que con la variación de la presión de alta en la carga, al modificar la presión de alta en la descarga el rendimiento presenta una zona bastante plana, en esta ocasión en el intervalo 140-200 bares, donde el rendimiento se mantiene entre 0,7 y 0,71. Para presiones superiores a 200 bares, el rendimiento comienza a disminuir más rápidamente, un punto cada 20 bares.

El trabajo en la turbina aumenta con la presión, con una pendiente cada vez menor según aumenta la presión alta en la descarga.

En la **ilustración 25**, se muestra la influencia de la presión alta de descarga en los intercambios de calor. Mientras que el calor intercambiado en el foco caliente se mantiene constante, el intercambiado en el foco frío disminuye notablemente al aumentar la presión.

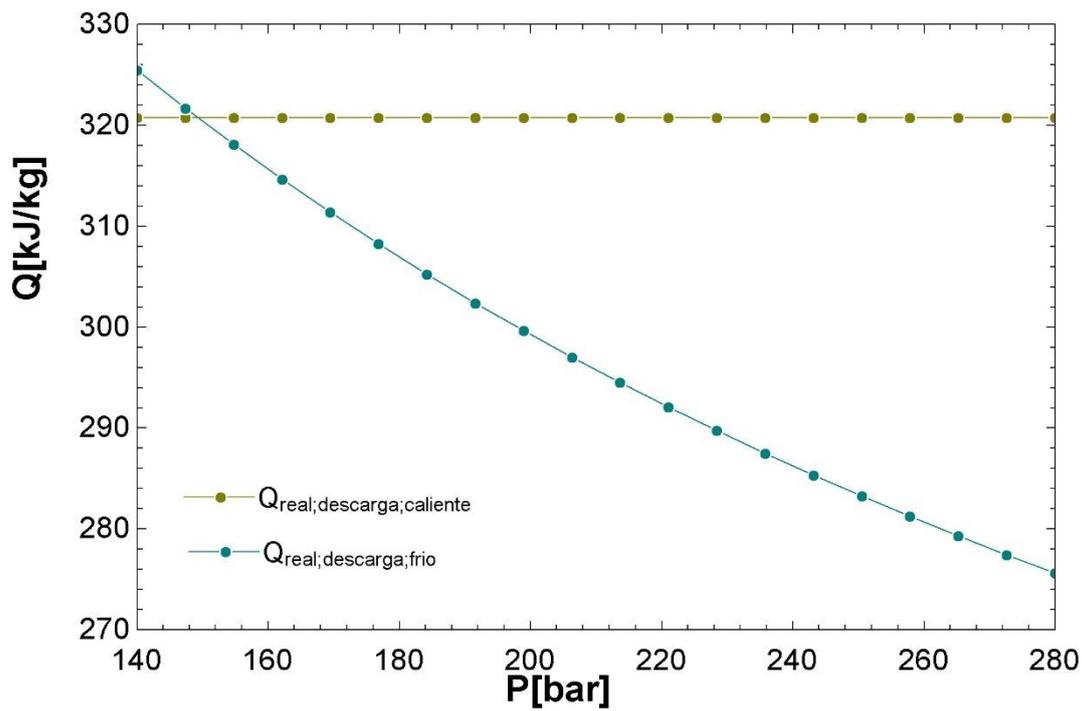


Ilustración 25: Calor en la descarga frente a presión alta de descarga en el ciclo básico.

Al aumentar la presión, la línea de expansión de la turbina se desplaza hacia la izquierda, puesto que la temperatura a la que empieza la expansión está fija. El calor intercambiado con el foco frío disminuye dado que la salida de la turbina está más cerca del punto de entrada a la bomba (líquido saturado).

En la **ilustración 26** se representan la fracción másica del hielo y las diferencias mínimas de temperatura en los intercambios de la descarga.

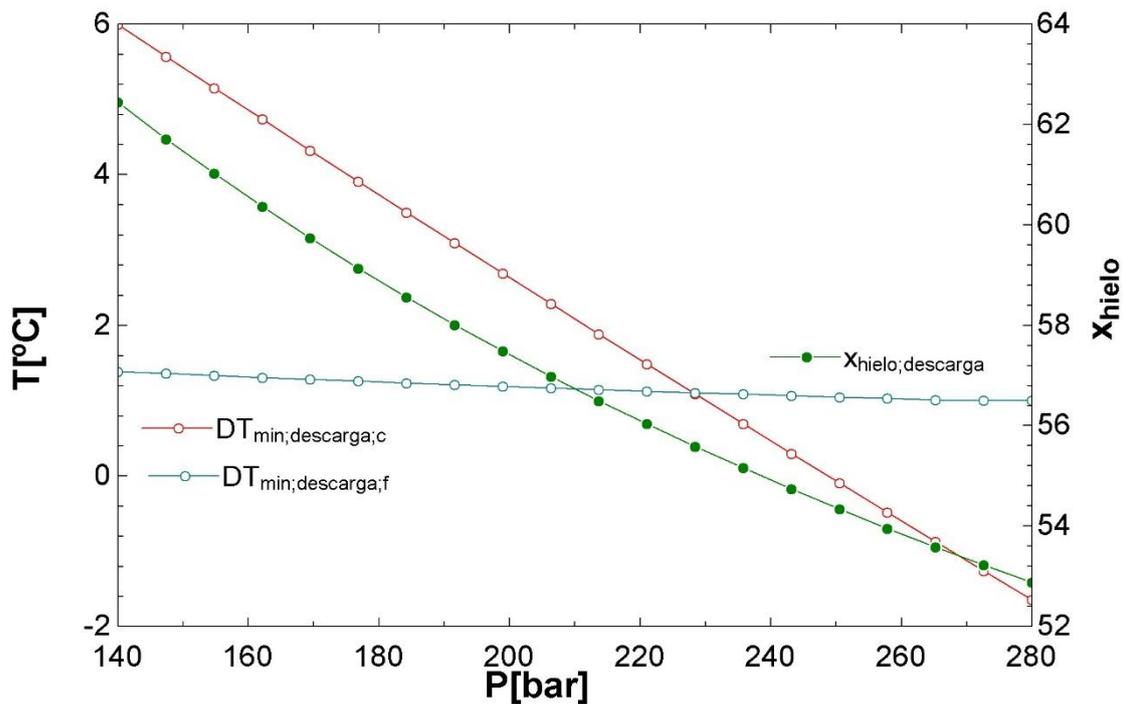


Ilustración 26: Diferencia mínima de temperaturas y gasto másico de hielo en la descarga frente a presión alta de descarga en el ciclo básico.

El gasto de hielo necesario en la descarga disminuye al aumentar la presión, aunque no muy significativamente.

La diferencia mínima de temperatura en el intercambio con el foco frío permanece constante con la presión. La diferencia mínima en la descarga del agua caliente varía entre 6 – 2°C, disminuyendo con la temperatura, haciéndose negativa a partir de 250 bares aproximadamente.

Al igual que en los análisis anteriores, la diferencia mínima de temperaturas en el intercambio con el foco caliente en la descarga queda determinada por la presión y la fracción másica de agua caliente, de forma que al variar el gasto másico, la curva se desplaza.

Excepto el rendimiento, todos los demás factores invitan a aumentar la presión de alta en la descarga. Además, la bajada de rendimiento no es muy acusada, lo que hace aún más interesante esta idea.

3.3.2 Presión baja de descarga

Por último queda analizar la influencia de la presión baja en la descarga en el sistema, considerando un rango de variación de [6:50] bares.

La **gráfica 27** representa la variación del rendimiento global y del trabajo en la turbina. Al aumentar la presión de baja, la distancia entre presiones de descarga disminuye, de forma que el trabajo en la turbina disminuye.

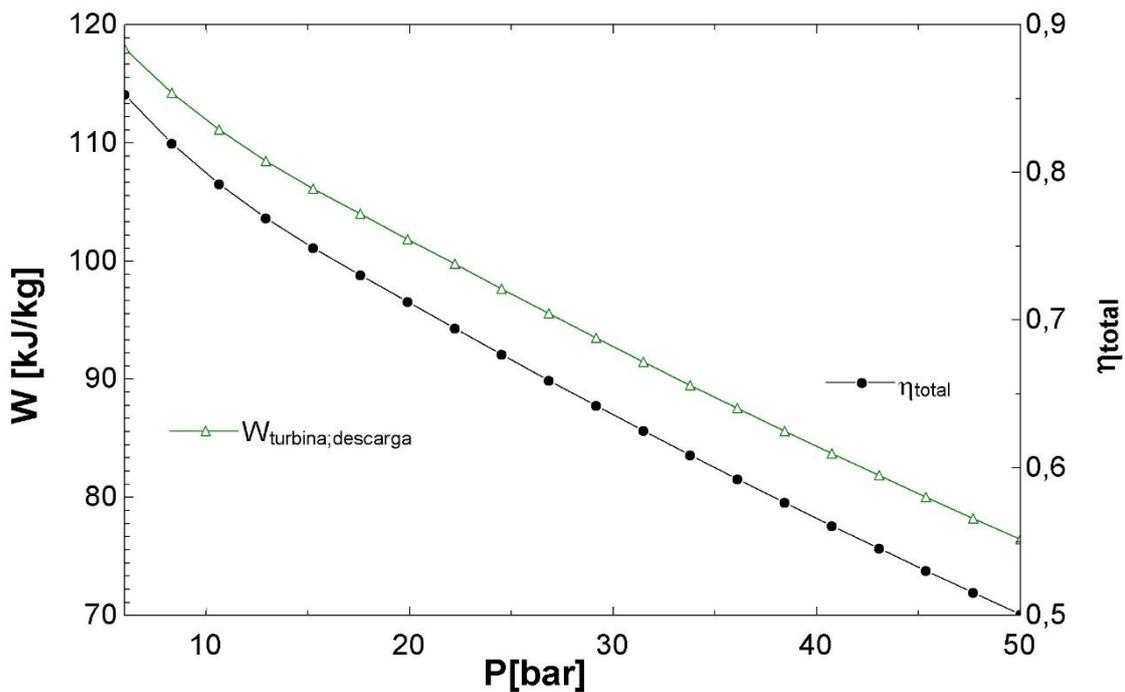


Ilustración 27: Trabajo en turbina y rendimiento frente a presión baja de descarga en el ciclo básico.

A diferencia de los análisis anteriores, en este caso, el rendimiento y el trabajo en la turbina tienen la misma tendencia: disminuyen considerablemente al aumentar la presión de baja en la descarga.

En la **gráfica 28** se muestra la influencia de la presión de baja en los intercambios de calor.

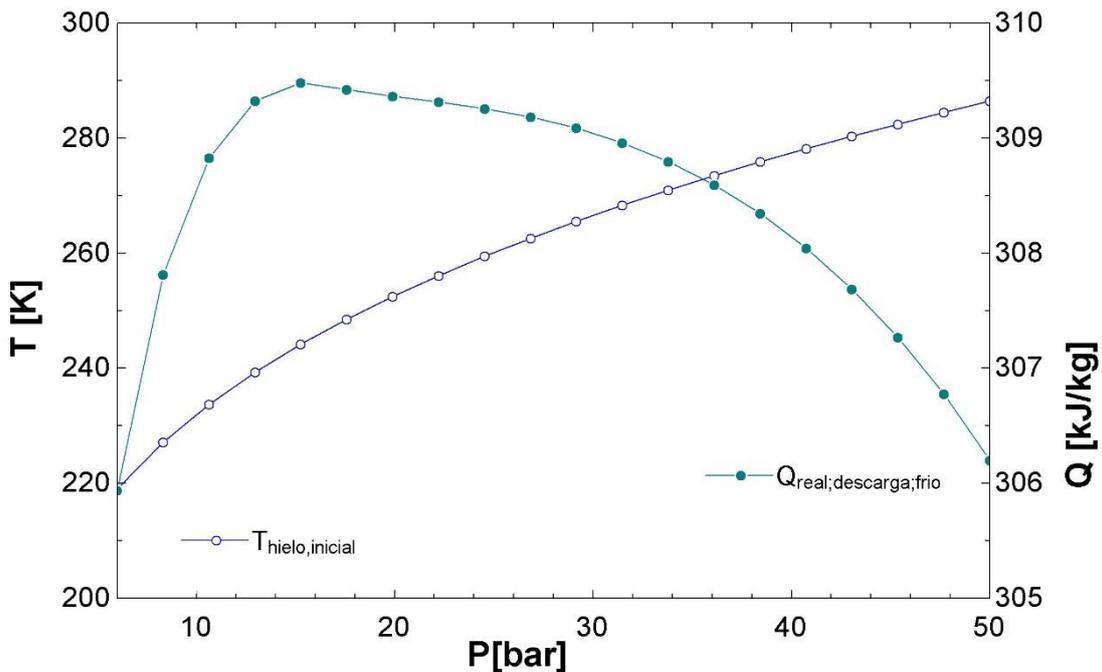


Ilustración 28: Temperatura y calor frente a presión baja de descarga en el ciclo básico.

La temperatura máxima en el hielo aumenta con la presión, lo cual tiene un doble efecto:

- Por un lado, interesa que aumente dado que permite un rango más amplio en el intercambio de calor, disminuyendo el gasto de hielo necesario.
- Por otro lado, el tener la temperatura máxima del hielo ligada a la presión supone que pueda aumentar por encima del punto de fusión (35 bares aproximadamente).

La **ilustración 29** representa la influencia de la presión baja de descarga en las fracciones másicas del hielo y en las diferencias mínimas de temperatura.

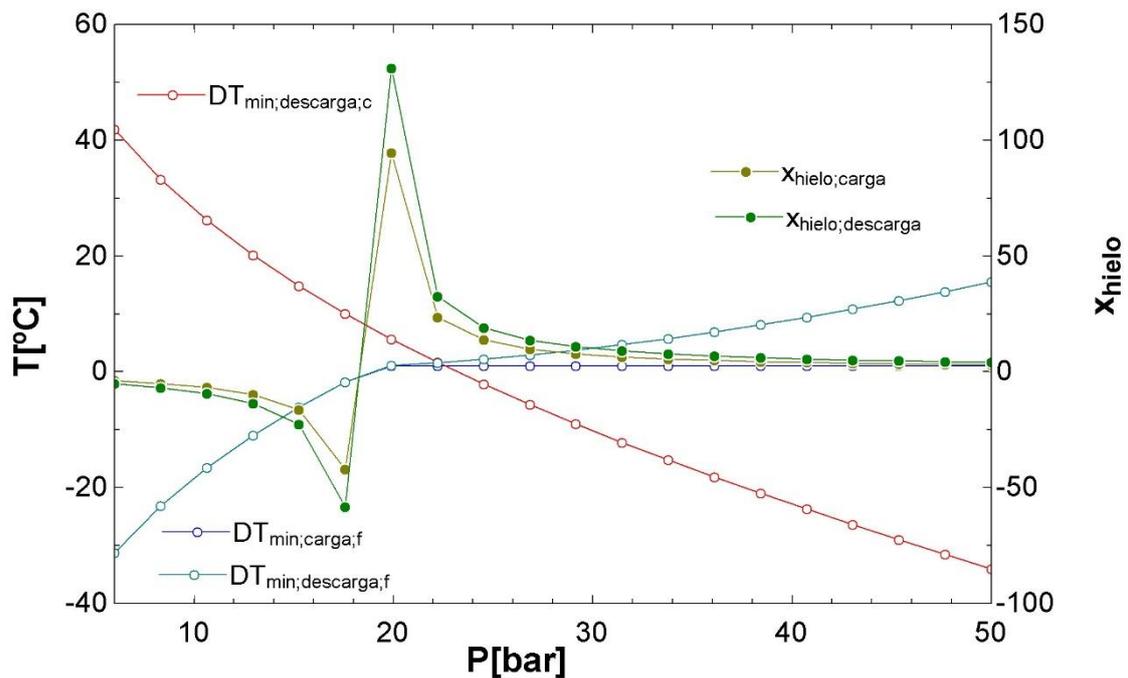


Ilustración 29: Diferencia de temperaturas mínima y gasto másico del hielo en la descarga frente a presión baja de descarga en el ciclo básico.

Las diferencias mínimas de temperaturas en la descarga del foco frío y del caliente tienen evoluciones opuestas, mientras que la del foco frío aumenta con la presión, la del foco caliente disminuye. La del foco caliente se hace negativa a partir de 22 bares aproximadamente, estableciendo un límite superior de presión baja de descarga. La del foco caliente se hace negativa cuando la presión disminuye de 18 bares, valor de la presión baja de carga, algo que no puede ocurrir pues la temperatura del hielo con el depósito descargado sería inferior a la del depósito descargado.

La diferencia mínima de temperatura en la carga del foco frío permanece constante a partir de 20 bares.

La **ilustración 30** muestra la zona de la gráfica anterior en la que se puede establecer la presión de baja.

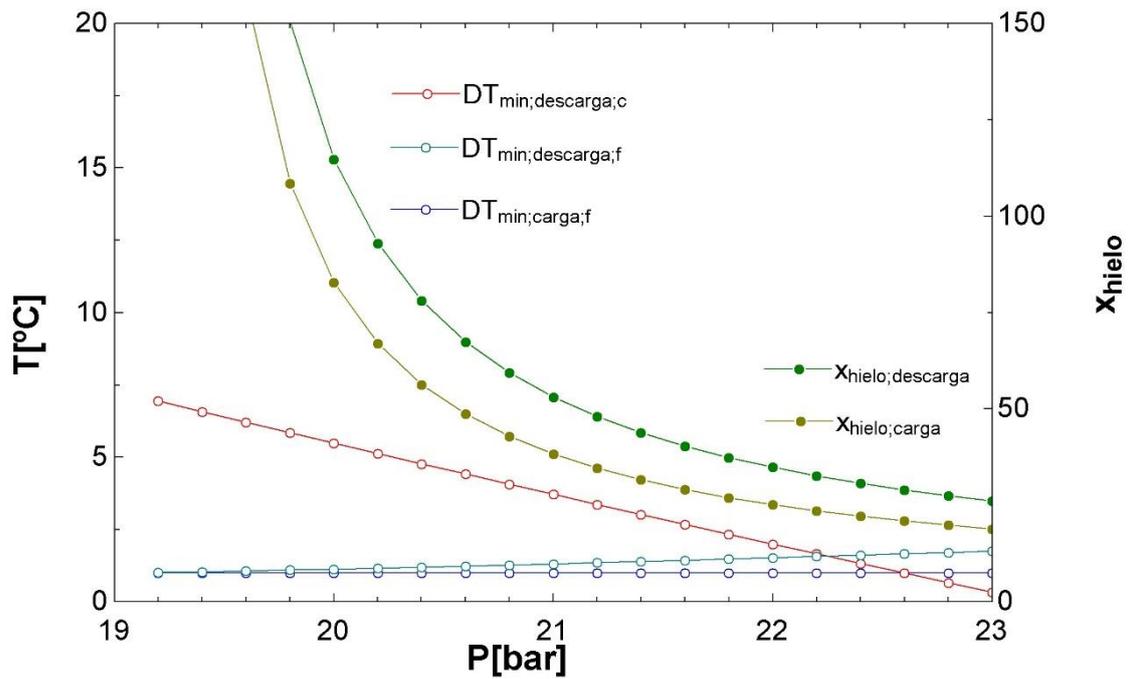


Ilustración 30: Diferencia de temperaturas mínima y gasto másico del hielo en la descarga frente a presión baja de descarga en el ciclo básico (2).

El gasto másico de hielo necesario, tanto en el ciclo de carga como en el de descarga, se hace negativo en toda la rama infinita que queda a la izquierda de la asíntota que se encuentra en 19 bares aproximadamente. En la parte derecha, las fracciones másicas disminuyen rápidamente, siguiendo una curva cuya pendiente cada vez es menos acusada.

Respecto a la curva de la diferencia mínima de temperatura en la descarga del foco caliente, al igual que en el resto de análisis anteriores, se desplaza con la fracción másica de agua caliente en la descarga, por lo que la presión podría subir del límite que marca la gráfica reajustando la fracción másica del agua caliente en la descarga.

4. Ciclo de dióxido de carbono con refrigeración adicional de amoníaco durante la carga.

4.1 Configuración de la planta

4.1.1 Ciclo de carga

Adicionando un ciclo de refrigeración adicional durante la carga, la integración térmica entre los ciclos de carga y descarga puede ser mejorable. Un ciclo adicional de refrigeración con amoníaco como fluido caloportador puede ajustarse a las características de la carga del foco frío. El ciclo de refrigeración considerado es el convencional con una válvula de estrangulamiento y un compresor volumétrico. El calor de irreversibilidades en el ciclo de amoníaco se puede retirar del sistema por air-cooling en el lado del condensador.

En la **figura 31** muestra un esquema del ciclo de carga en la planta [2].

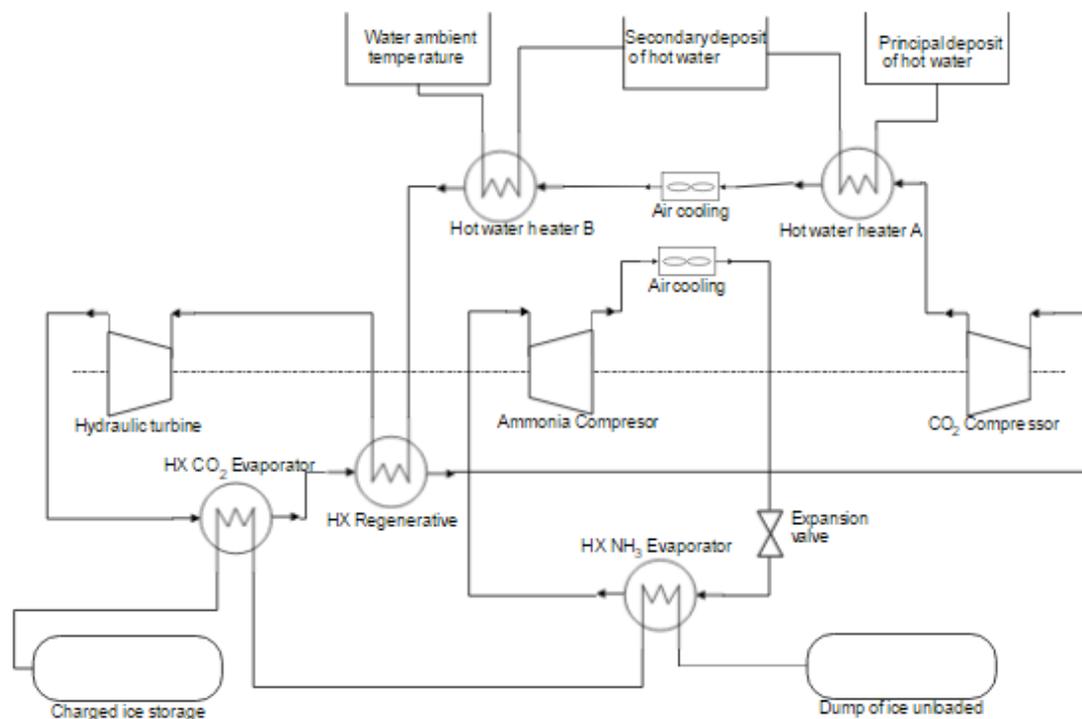


Ilustración 31: Configuración del ciclo de carga con ciclo adicional de amoníaco [2].

Además del ciclo adicional de refrigeración, se incorpora un intercambio de calor entre el dióxido de carbono que sale de la carga de los depósitos de agua caliente y el que sale de la carga de la carga de los depósitos de hielo.

En cuanto al almacenamiento, se incorpora un depósito de agua caliente adicional, y la carga del hielo se realiza en dos etapas, el primer intercambio de calor funciona como

evaporador en el ciclo de amoníaco y el segundo intercambio de calor participa en la evaporación del CO₂.

4.1.2 Ciclo de descarga

Como en la carga, se incorpora un intercambio de calor entre dos corrientes del CO₂ que actúa de regenerador, enfriando la salida de la turbina mediante la cesión de calor a la salida de la bomba.

En la **figura 32** se muestra un esquema del ciclo de descarga.

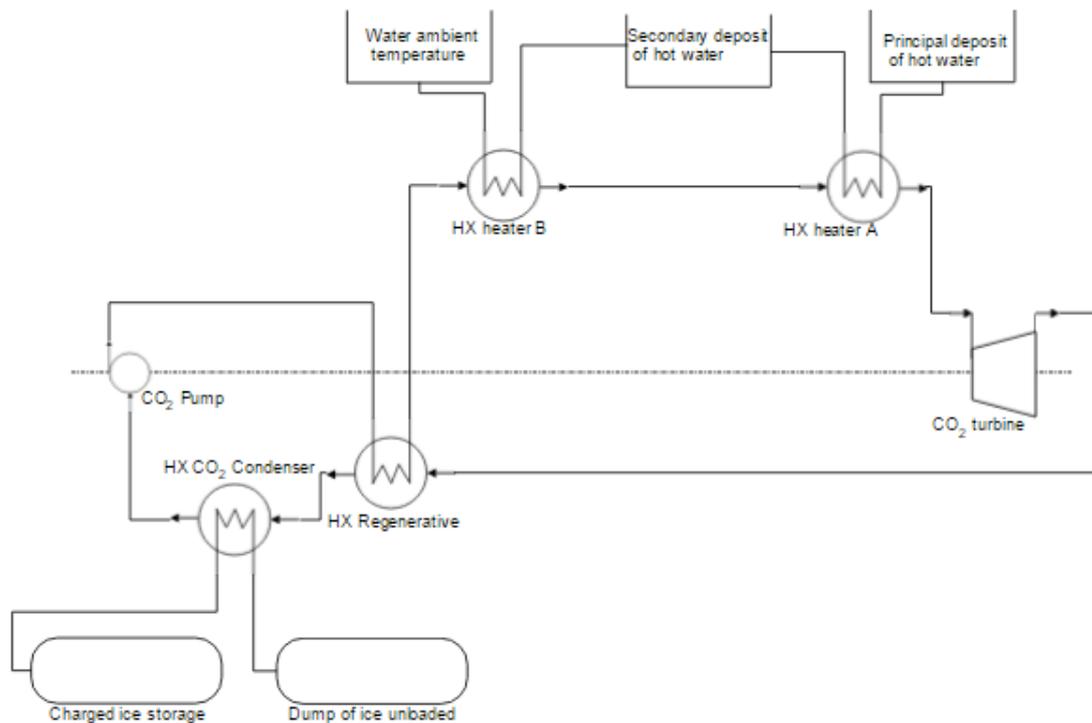


Ilustración 32: Configuración del ciclo de descarga con ciclo adicional de amoníaco en la carga. [2]

En el proceso de descarga no se utiliza el ciclo adicional de amoníaco. La descarga del hielo se realiza en un único paso, enfriando y condensando el CO₂ que sale del regenerador. Sin embargo la descarga del agua caliente se realiza en dos etapas, descargando los dos depósitos.

4.2 Fluido de trabajo: Amoníaco

El amoníaco ofrece las siguientes ventajas sobre otros refrigerantes [4]:

- El amoníaco tiene rendimientos termodinámicos en torno a un 3-10% superior a otros refrigerantes, por lo que a igualdad de capacidad frigorífica tiene un consumo energético menor.
- El coste del amoníaco es menor que el de otro refrigerante y además se requiere de una menor cantidad para la misma aplicación.
- El olor característico del amoníaco hace que se detecten fácil y rápidamente las posibles fugas.
- El amoníaco no es contaminante.

La principal desventaja de utilizar amoníaco como refrigerante, es la alta inversión en el equipo en el equipo y la instalación del sistema correspondiente. Si la demanda de refrigeración es muy baja, el costo de un sistema de refrigeración utilizando amoníaco como refrigerante es demasiado alto.

Es un refrigerante tóxico e inflamable en determinadas y altas concentraciones, pero manejado adecuadamente, no representa peligro alguno. Por otro lado el amoníaco puro tiene un rango de inflamabilidad muy reducido y bajo.

De esta manera un sistema de refrigeración con amoníaco será más seguro que cualquier otro sistema de refrigeración, con las ventajas añadidas de utilizar un refrigerante ecológico, de larga duración y con un rendimiento energético inmejorable.

4.3 Descripción de los ciclos

4.3.1 Equipos de la planta

Los equipos utilizados son los del ciclo base (un compresor y una turbina hidráulica en el ciclo de carga, una bomba y una turbina en el ciclo de descarga) y los que incorpora el ciclo de amoníaco: un compresor (3 etapas con refrigeración intermedia) y una válvula para la expansión. En la **tabla 22** se recogen los rendimientos asumidos en los diferentes equipos.

Tabla 22: Rendimiento de los equipos en el caso base con refrigeración adicional con amoníaco durante la carga [1]

Rendimiento		
Rendimiento del compresor	$\eta_{\text{compresor}}$	0,86
Rendimiento de la turbina hidráulica	$\eta_{\text{hidraulica}}$	0,85
Compresor en el ciclo de amoníaco	$\eta_{\text{Compresor,NH}_3}$	0,85
Rendimiento de la bomba	η_{bomba}	0,85
Rendimiento de la turbina	η_{turbina}	0,88

4.3.2 Parámetros de presión

En la parte A del diseño conceptual de un sistema de almacenamiento de energía termo-eléctrica basado en la integración térmica de ciclos termodinámicos, de Morandin, Maréchal, Merchangoz y Buchter [1], se utilizan los valores de presión recogidos en la **tabla 23** en el estudio del mismo ciclo con refrigeración adicional con amoníaco. Estos valores deberían proporcionar un rendimiento máximo del 60%.

Tabla 23: Parámetros de presión en el ciclo base con refrigeración adicional con amoníaco durante la carga. [1]

Parámetros		Bares
Presión de alta del CO ₂ en la carga	$P_{\text{alta,CO}_2,\text{carga}}$	188,7
Presión de baja CO ₂ en la carga	$P_{\text{baja,CO}_2,\text{carga}}$	18
Presión de alta del NH ₃ en la carga	$P_{\text{alta,NH}_3}$	14,5
Presión de baja del NH ₃ en la carga	$P_{\text{baja,NH}_3}$	2
Presión de alta del CO ₂ en la descarga	$P_{\text{alta,CO}_2,\text{des}}$	174,2
Presión de baja del CO ₂ en la descarga	$P_{\text{baja,CO}_2,\text{des}}$	20,8

4.3.3 Nuevos parámetros en el depósito de hielo

Como consecuencia del nuevo intercambio en la carga del depósito de hielo, realizado en dos etapas consecutivas, se tiene una temperatura intermedia en el hielo que seguramente marcará un cambio en la pendiente del perfil de temperatura en la carga.

La temperatura del hielo tras salir del intercambio con el evaporador de amoníaco está limitada por la temperatura del amoníaco saturado a la presión de baja del ciclo de amoníaco. Al enfriar el hielo con el amoníaco en primer lugar, la temperatura de saturación del amoníaco es la más baja a la que se puede aspirar tras el primer intercambio.

Tabla 24: Estado intermedio en la carga del hielo en el ciclo básico con refrigeración adicional con amoníaco durante la carga

Estado intermedio del hielo		Valor	Unidad
Temperatura del hielo al finalizar la carga	$T_{\text{hielo,intermedia}}$	254,6	K
Diferencia de temperatura mínima	$DT_{\text{NH}_3,\text{frio}}$	0,25	K
Presión del hielo	P_{hielo}	100	bares

La temperatura del hielo cuando el depósito está cargado está limitada por la temperatura del CO₂ a la presión de baja en la carga, que es la mínima del ciclo.

Tabla 25: Estado final en la carga del hielo en el ciclo básico con refrigeración adicional con amoníaco durante la descarga.

Estado final del hielo		Valor	Unidad
Temperatura del hielo al finalizar la carga	$T_{\text{hielo,deposito,cargado}}$	251,3	K
Diferencia de temperatura mínima	$DT_{\text{carga,CO}_2,\text{frio}}$	1	K
Presión del hielo	P_{hielo}	100	bares

La temperatura del hielo inicial o en el depósito descargado está limitada por la temperatura del CO₂ en el ciclo de descarga a la presión de baja, que es la presión que tiene en el condensador del CO₂. Si el hielo tiene que calentarse en la condensación del CO₂, la máxima temperatura que podría alcanzar será la de saturación del CO₂ a la presión baja de descarga.

Tabla 26: Estado inicial en la carga del hielo en el ciclo básico con refrigeración adicional con amoníaco durante la descarga.

Estado inicial del hielo		Valor	Unidad
Temperatura inicial del hielo en el depósito	$T_{\text{hielo,inicial}}$	254,7	K
Diferencia de temperatura mínima	$DT_{\text{descarga,frio}}$	0,25	K
Presión del hielo	P_{hielo}	100	bares

En la **ilustración 33** se representa un diagrama temperatura-entropía con los tres estados del hielo.

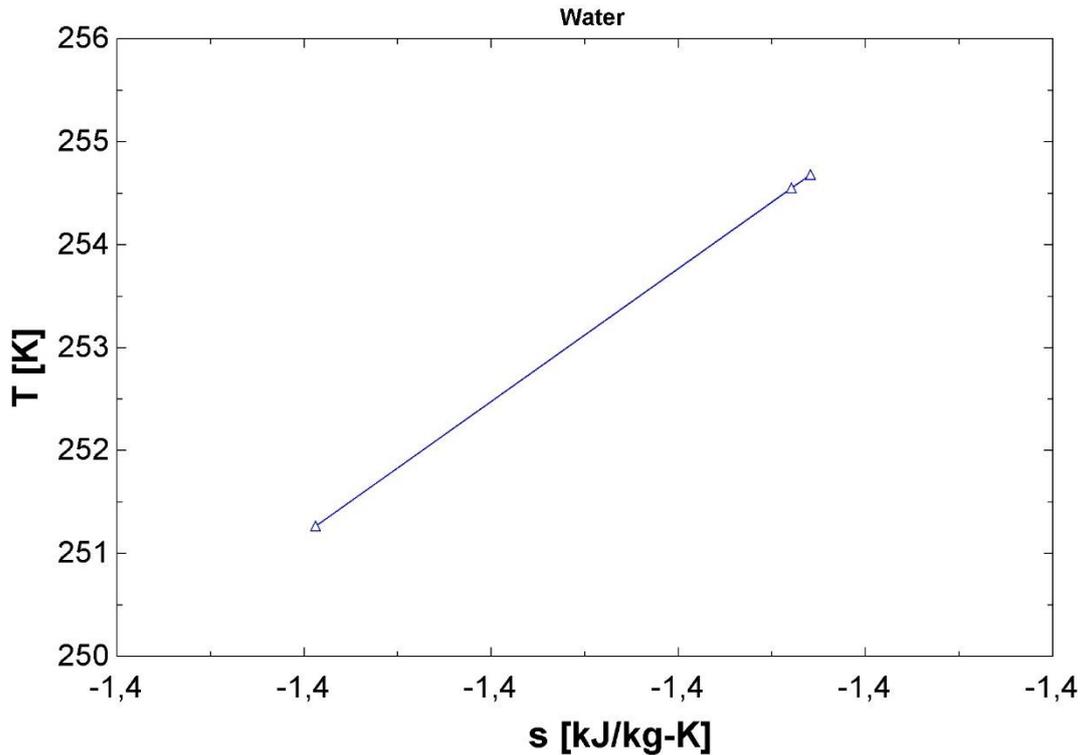


Ilustración 33: Diagrama T-s de la evolución del hielo

El estado inicial, el de mayor temperatura, es el más cercano a la esquina superior derecha. El estado final, el de menor temperatura, es el más cercano a la esquina inferior izquierda.

4.3.4 Depósitos de agua caliente

El ciclo incorpora un nuevo depósito de agua caliente. El nuevo depósito puede utilizarse como depósito auxiliar para tener una mayor maniobrabilidad trabajando con periodos de carga y descarga distintos, así como para mejorar la integración entre la descarga del agua caliente y el hielo.

Al igual que en el caso anterior, la temperatura del agua inicial será la del ambiente (15°C).

Tabla 27: Estado inicial en la carga del agua caliente en el ciclo básico con refrigeración adicional con amoníaco durante la carga.

Estado inicial del agua caliente		Valor	Unidad
Temperatura inicial del agua caliente	$T_{\text{foco,caliente,inicial}}$	288,2	K
Presión del agua caliente	$P_{\text{foco,caliente}}$	100	bares

La temperatura del agua caliente en el depósito principal (depósito A), será la del CO₂ a la salida del compresor en el proceso de carga (máxima temperatura alcanzable en el sistema), menos la diferencia de temperatura mínima en el intercambiador.

Tabla 28: Estado del agua caliente en el depósito principal de agua caliente.

Estado del agua caliente en el depósito A		Valor	Unidad
Temperatura del depósito A	$T_{H_2O,deposito,A}$	449,9	K
Diferencia de temperatura	$DT_{carga,CO_2,caliente}$	4	K
Presión del agua caliente	$P_{foco,caliente}$	100	bares

La temperatura del agua caliente en el depósito secundario (depósito B), será la del CO_2 tras la salida de la carga con el depósito primario, menos la diferencia de temperatura mínima en el intercambiador.

Tabla 29: Estado del agua caliente en el depósito secundario de agua caliente.

Estado del agua caliente en el depósito B		Valor	Unidad
Temperatura del depósito B	$T_{H_2O,deposito,B}$	369	K
Diferencia de temperatura	$DT_{carga,CO_2,caliente}$	4	K
Presión del agua caliente	$P_{foco,caliente}$	100	bares

En la **ilustración 34** se representa el diagrama T-s del agua caliente.

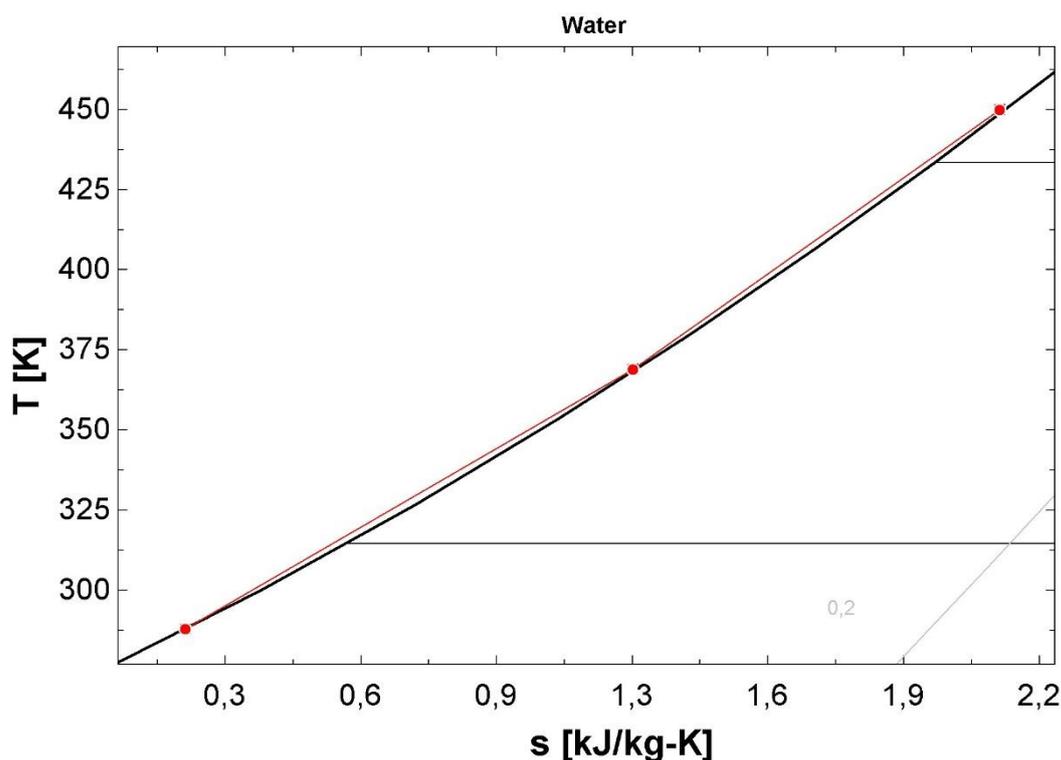


Ilustración 34: Diagrama T-s de la evolución del agua caliente en el ciclo con refrigeración con amoníaco en la carga.

El depósito secundario de agua caliente podría tener varias posibilidades de uso alternativas: realizando un precalentamiento del agua para hacer la carga en dos etapas como se lleva a cabo en la descarga, utilizándolo de la misma manera que el depósito A o simplemente no cargándolo cuando no sea necesario (el proceso de descarga anterior no ha dejado el depósito vacío).

4.3.5 Diagramas T-s

En la siguiente gráfica (**Ilustración 35**) se muestra el diagrama T-s del CO₂ en los ciclos de carga (naranja) y descarga (verde). En ambos ciclos de CO₂ (carga y descarga) se mantiene el mismo funcionamiento que en el caso base, añadiendo la carga y descarga del agua caliente en dos etapas y el intercambio de calor entre sus corrientes.

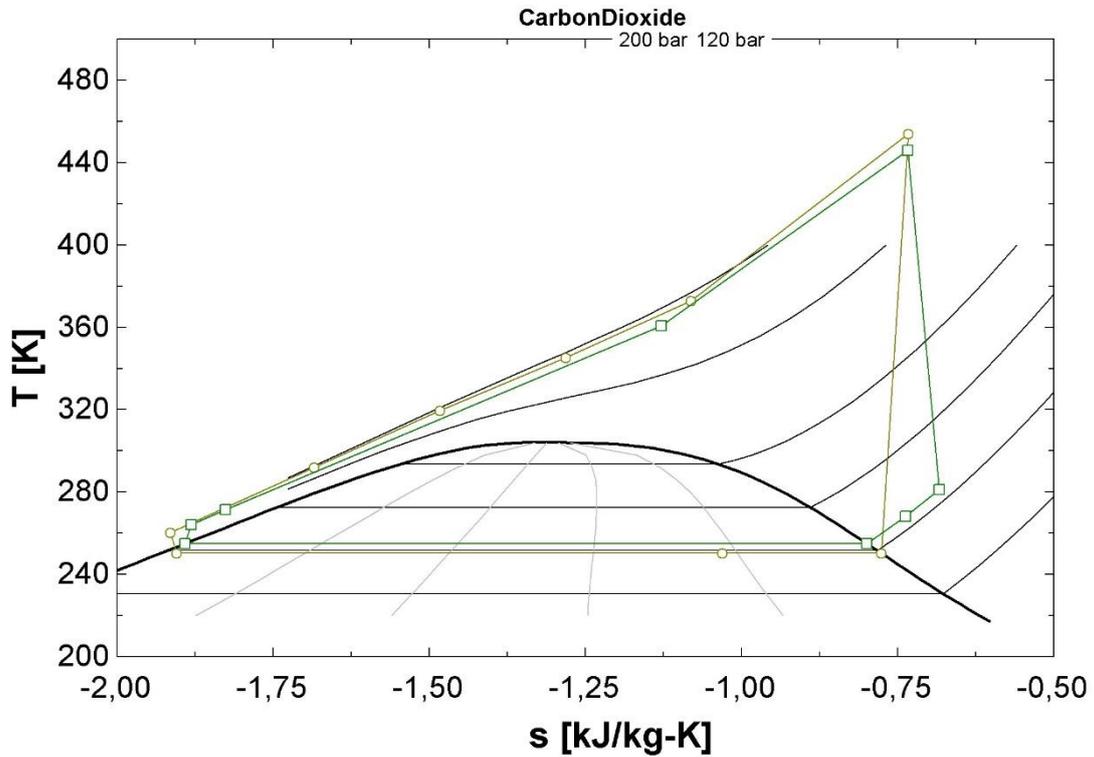


Ilustración 35: Diagrama T-s del CO₂ en los ciclos de carga (naranja) y descarga (verde) en el caso con la refrigeración adicional de amoníaco durante la carga.

En el ciclo de carga, la salida del intercambio con el agua caliente cede calor antes de entrar en la turbina hidráulica. Este calor es absorbido por el CO₂ que sale del evaporador, para terminar de evaporarse y llegar al punto de vapor saturado.

En el ciclo de descarga, el CO₂ que sale de la turbina cede calor antes de entrar en el condensador. Este calor se utiliza en un precalentamiento del CO₂ que sale de la bomba, elevando su temperatura antes de entrar en el intercambio con los depósitos de agua caliente.

En la **gráfica 36** se representa el ciclo de NH₃ durante la carga.

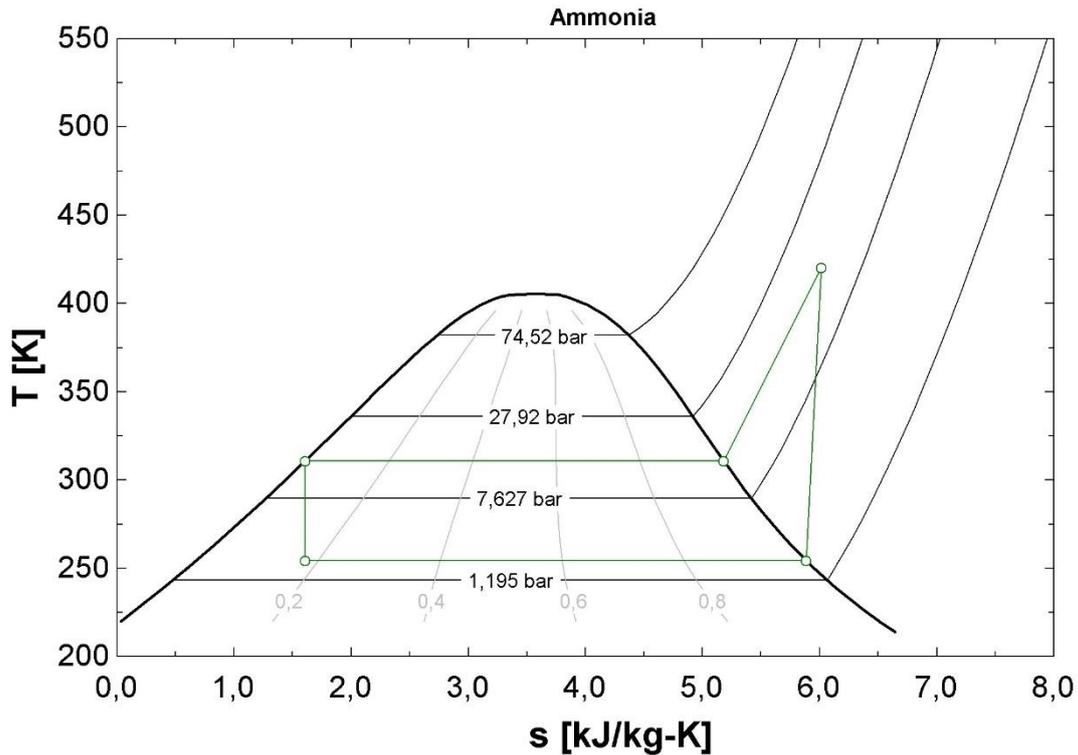


Ilustración 36: Diagrama T-s del ciclo de refrigeración adicional con amoníaco en la carga.

El amoníaco entra en el compresor en el punto de vapor saturado a la presión baja del ciclo. Tras la compresión, caracterizada por el rendimiento del compresor (**ecuación 1**), el amoníaco se enfría a presión constante hasta entrar en la campana de saturación, donde el fluido se condensa hasta el punto de líquido saturado. Este calor es retirado mediante air-cooling. La expansión del amoníaco se realiza a través de una válvula. A continuación se produce la evaporación para cerrar el ciclo, en el intercambiador con el hielo.

4.4 Balance de energía

En todos los intercambios, los flujos son considerados en contracorriente. En el proceso de intercambio de calor, se consideran entalpías para evaluar el calor, temperaturas para establecer las diferencias de temperaturas mínimas y capacidades caloríficas para la eficiencia.

4.4.1 Carga de los depósitos de agua caliente

El agua de ambos depósitos se calienta con la corriente de CO₂ que sale del compresor. Las presiones de ambos fluidos están definidas.

La carga de los depósitos se lleva a cabo de manera consecutiva, por la misma corriente de CO₂. El CO₂ que entra elevará la temperatura del agua del depósito principal (depósito A) todo lo posible, estableciendo la temperatura mínima del primer intercambio en ese punto (**ecuación 15**). La temperatura intermedia del CO₂ marcará el perfil de temperaturas en el intercambio, además de la proporción en el gasto másico óptimo.

$$T_{\text{agua,caliente,deposito,A,cargado}} = T_{\text{out,compresor,CO2,carga}} - DT_{\text{min}}$$

Ecuación 15: Diferencia de temperaturas mínima en la entrada del flujo caliente.

La temperatura de salida del CO₂ tras los dos intercambios con los depósitos se fija como la del agua inicial más la diferencia mínima de temperaturas en el intercambio, mediante la **ecuación 16**.

$$T_{\text{out,CO2,caliente,carga}} = T_{\text{agua,caliente,inicial}} + DT_{\text{min}}$$

Ecuación 16: Diferencia de temperaturas mínima en la salida del flujo caliente.

Considerando un gasto másico de CO₂ unitario, se establece el calor cedido por el CO₂ en total con la **ecuación 5**, a repartir entre ambos depósitos, dependiendo de las temperaturas intermedias de agua (temperatura del depósito B) y CO₂ elegidas.

Dependiendo de una de las dos temperaturas intermedias, y la diferencia de temperatura entre ellas, que fija la otra, se tendrá la relación de gasto másico entre los depósitos de agua caliente y el calor almacenado en cada uno. Estableciendo una temperatura intermedia de CO₂ como la media entre la temperatura de entrada y salida del CO₂ y la diferencia de temperaturas como la mínima (**ecuación 15**).

Tabla 30: Parámetros en la carga del agua caliente en el ciclo básico con refrigeración con amoníaco durante la carga.

Parámetros		Valor	Unidad
Presión del agua caliente	$P_{\text{agua,caliente}}$	100	Bares
Presión del CO ₂	$P_{\text{alta,CO2,carga}}$	188,7	bares
Gasto másico del dióxido de carbono	m_{CO2carga}	1	kg/s
Temperatura de entrada del CO ₂	$T_{\text{out,compresor,CO2,carga}}$	453,9	K
Diferencia de temperatura mínima	DT_{min}	4	K
Temperatura de salida del agua caliente	$T_{\text{H2O,deposito,A,cargado}}$	449,9	K
Temperatura de entrada del agua caliente	$T_{\text{H2O,inicial}}$	288	K
Temperatura de salida del CO ₂	$T_{\text{out,CO2,carga,caliente}}$	292	K
Calor total cedido por el CO ₂	$Q_{\text{real,carga,aqua,caliente}}$	142	kJ/kg
Temperatura intermedia del CO ₂	$T_{\text{intermedia,CO2,carga}}$	373	K
Temperatura intermedia del agua caliente	$T_{\text{H2O,deposito,B,cargado}}$	369	K

El perfil de temperaturas en la carga de ambos depósitos queda determinado, y se muestra en las siguientes **gráficas 37 y 38**.

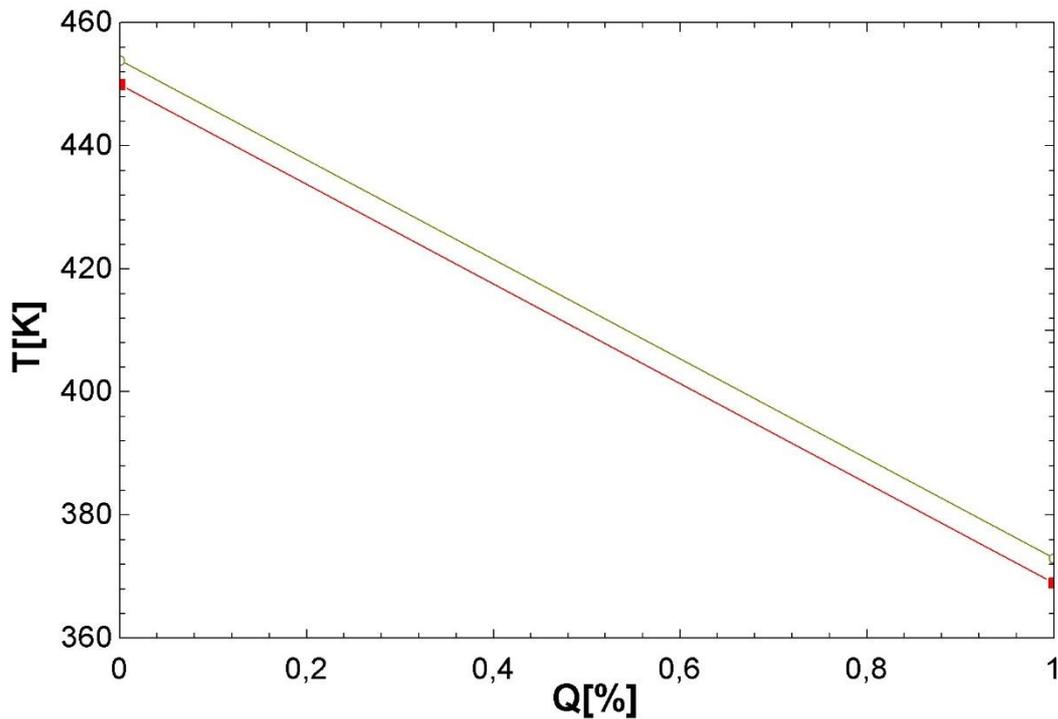


Ilustración 37: Diagrama T-Q de la carga del agua caliente del depósito primario en el ciclo con refrigeración por amoníaco

El primer intercambio queda totalmente definido con las temperaturas intermedias, calculando el calor cedido al depósito primario con la **ecuación 5** y el gasto de agua caliente del depósito A óptimo mediante la **ecuación 6**.

Mediante las capacidades caloríficas, y el **código 2** se calcula el calor máximo en el intercambio y la eficiencia.

Tabla 31: Resultados de la carga del depósito principal de agua caliente en el ciclo básico con refrigeración adicional con amoníaco durante la carga.

Resultados		Valor	Unidad
Calor total intercambiado	$Q_{\text{real,carga,agua,caliente,A}}$	142	kJ/kg
Gasto másico de agua caliente	$m_{\text{H}_2\text{O,A,carga}}$	0,4119	kg/s
Calor máximo	$Q_{\text{max,carga,agua,caliente,A}}$	143,4	kJ/kg
Eficiencia	$\epsilon_{\text{carga,agua,caliente,A}}$	0,9902	

En la **ilustración 38** se incluye un diagrama T-Q de la carga del depósito secundario de agua caliente, en el que las líneas son paralelas, con la misma diferencia de temperaturas en los dos extremos del intercambiador.

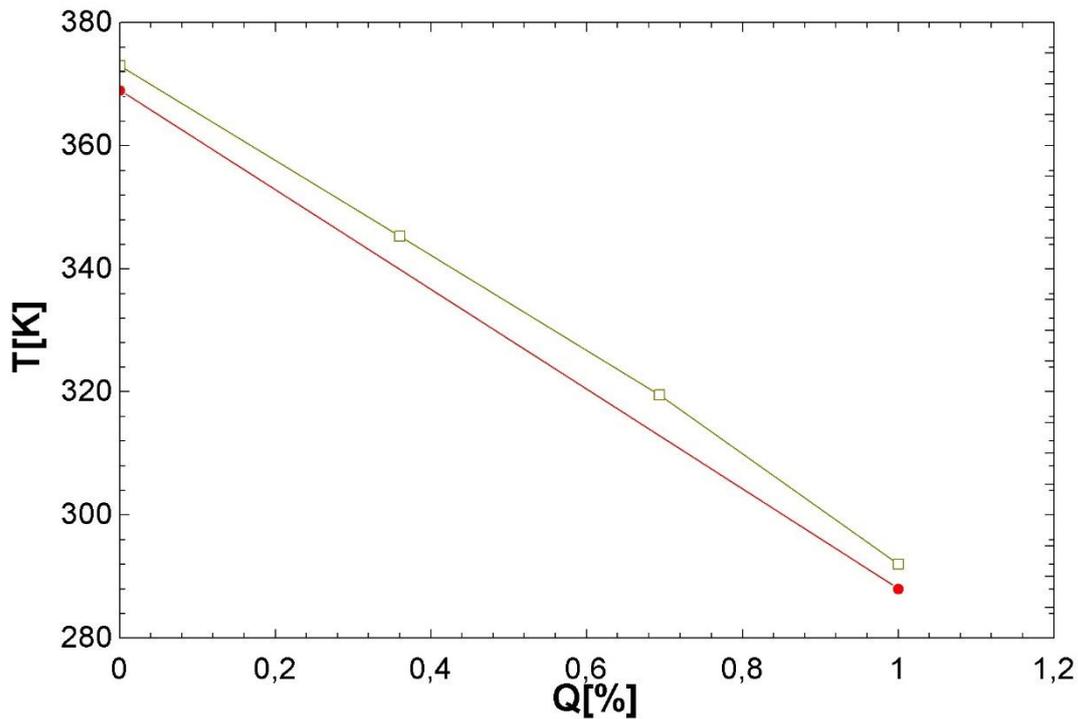


Ilustración 38: Diagrama T-Q de la carga del depósito de agua caliente secundario en el ciclo con la refrigeración adicional por amoníaco.

Al igual que en el depósito anterior, el intercambio queda determinado con las temperaturas intermedias. El calor y el gasto másico de agua caliente óptimo del depósito B se calcula mediante las **ecuaciones 5 y 6**, respectivamente.

De nuevo con el **código 2** se define el calor máximo y la eficiencia del intercambio.

Tabla 32: Resultados de la carga del depósito secundario de agua caliente en el ciclo básico con refrigeración adicional con amoníaco durante la carga.

Resultados		Valor	Unidad
Calor total intercambiado	$Q_{\text{real,carga,agua,caliente,B}}$	200,6	kJ/kg
Gasto másico de agua caliente	$m_{\text{H}_2\text{O,B,carga}}$	0,595	kg/s
Calor máximo	$Q_{\text{max,carga,agua,caliente,B}}$	211,9	kJ/kg
Eficiencia	$\epsilon_{\text{carga,agua,caliente,B}}$	0,9466	

4.4.2 Regeneración en la carga

La regeneración consiste en un intercambio de calor entre dos corrientes del CO₂. En este caso, la de salida de la carga del depósito B (lado caliente) y la de salida de la carga del hielo (lado frío).

El gasto másico es el mismo en las dos corrientes, y se conocen las condiciones de salida del lado frío (entrada en compresor: vapor saturado) y las de entrada del lado caliente.

La temperatura del lado frío es constante en todo el intercambio de calor, al estar dentro del proceso de evaporación. Se establece la diferencia de temperaturas mínima

en la salida del lado caliente: la temperatura de salida del lado caliente es la del lado frío más la diferencia de temperaturas mínima en el intercambio (**ecuación 16**).

Tabla 33: Parámetros en la regeneración en el ciclo de carga básico con refrigeración adicional con amoníaco durante la carga.

Parámetros		Valor	Unidad
Gasto másico de la corriente caliente	$m_{CO_2,carga}$	1	kg/s
Gasto másico de la corriente fría	$m_{CO_2,carga}$	1	kg/s
Presión del CO ₂ del lado caliente	$P_{alta,CO_2,carga}$	188,7	Bares
Presión del CO ₂ del lado frío	$P_{baja,CO_2,carga}$	18	Bares
Temperatura de entrada del lado caliente	$T_{out,CO_2,carga,caliente}$	292	K
Temperatura de salida del lado frío	$T_{in,compresor,CO_2,carga}$	250,3	K
Diferencia de temperatura mínima	DT_{min}	10	K
Temperatura de salida del lado caliente	$T_{in,hidráulica,CO_2,carga}$	260,3	K

Con el gasto de CO₂ y las condiciones del lado caliente se define el calor intercambiado mediante la **ecuación 5**, que permite calcular el estado de la entrada del lado frío mediante la **ecuación 6**.

La temperatura de entrada es la misma que la de salida pues durante la evaporación la temperatura es constante. Para añadir algún detalle más sobre las condiciones de entrada se calcula el título del CO₂ mediante la presión y entalpía.

En la **imagen 39** se muestra el perfil de temperaturas en la regeneración. El flujo caliente (línea superior) disminuye su temperatura, estableciendo la diferencia mínima en su salida, dado que la corriente fría (línea inferior) evoluciona a temperatura constante, pues se produce el cambio de estado del CO₂.

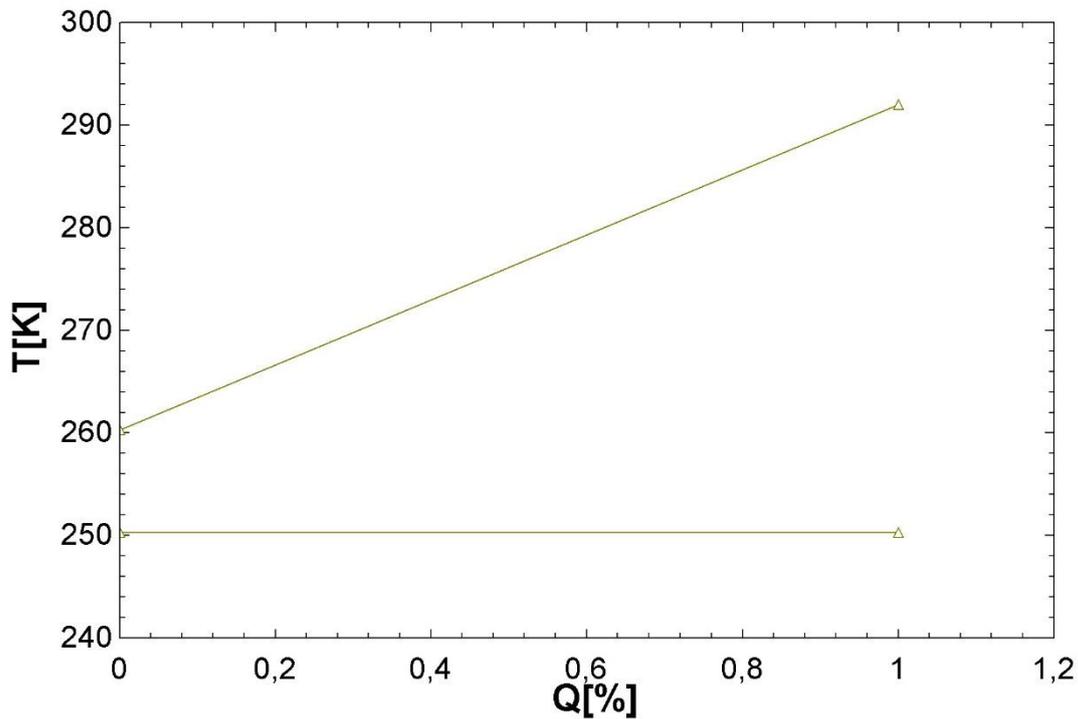


Ilustración 39: Regeneración en el ciclo de carga en el caso base con refrigeración adicional de amoníaco

Mediante el **código 2** se determina la eficiencia en el intercambio.

Tabla 34: Resultados de la regeneración en el ciclo de carga básico con refrigeración adicional con amoníaco durante la carga.

Resultados		Valor	Unidad
Calor real intercambiado	$Q_{\text{real,regenerativo,carga}}$	63,56	kJ/kg
Temperatura de entrada del lado frío	$T_{\text{intermedia,evaporador,CO2,carga}}$	250,3	K
Título de la entrada del lado frío	$X_{\text{intermedia,evaporador,CO2,carga}}$	0,7799	
Calor máximo	$Q_{\text{max,regenerativo,carga}}$	108,3	kJ/kg
Eficiencia	$\epsilon_{\text{regenerativo,carga}}$	0,5867	

4.4.3 Carga del depósito de hielo

La carga del depósito de hielo se realiza en dos etapas: un primer intercambio con el evaporador del ciclo de amoníaco y un segundo intercambio con el evaporador del ciclo de CO₂.

Las presiones para determinar las propiedades de las corrientes y el gasto másico de CO₂ en el segundo intercambio están definidos. En los dos intercambios están fijados las condiciones de entrada y salida de ambos fluidos.

En primer lugar se calculan las temperaturas del CO₂ en la entrada y la salida del intercambiador, a través de su entalpía y presión. Además se calculan también las propiedades (entalpía y temperatura) en el punto de líquido saturado.

Tabla 35: Parámetros del intercambio hielo-CO₂ en el ciclo básico con refrigeración con amoníaco durante la carga.

Parámetros		Valor	Unidad
Presión del hielo	P_{hielo}	100	Bares
Presión del CO ₂	$P_{\text{baja,CO}_2,\text{carga}}$	18	bares
Gasto másico del dióxido de carbono	$m_{\text{CO}_2,\text{carga}}$	1	kg/s
Temperatura de entrada del CO ₂	$T_{\text{out,hidraulica,CO}_2,\text{carga}}$	250,3	K
Temperatura de salida del CO ₂	$T_{\text{intermedia,evaporador,CO}_2,\text{carga}}$	250,3	K
Incremento de entalpía del CO ₂	Δh_{CO_2}	218,9	kJ/kg
Temperatura de salida del hielo	$T_{\text{hielo,deposito,cargado}}$	251,3	K
Temperatura intermedia del hielo	$T_{\text{hielo,intermedia}}$	254,6	K

Ambas temperaturas son iguales pues se produce la evaporación del fluido. Mediante el **código 3** se identifica si el dióxido de carbono necesita un precalentamiento antes de empezar a condensar o si éste ya está en el cambio de fase en la entrada del intercambiador, para hacer un correcto cálculo del calor intercambiado en cada zona.

A continuación se calculan el flujo de hielo necesario para satisfacer las condiciones del intercambio con la **ecuación 5**. Además de la temperatura del hielo que corresponde con el inicio de la evaporación del CO₂ mediante la misma ecuación.

En la **gráfica 40** se muestra el perfil de temperaturas en la segunda etapa en la carga del hielo, en el intercambio entre el CO₂ (naranja) y el hielo (azul).

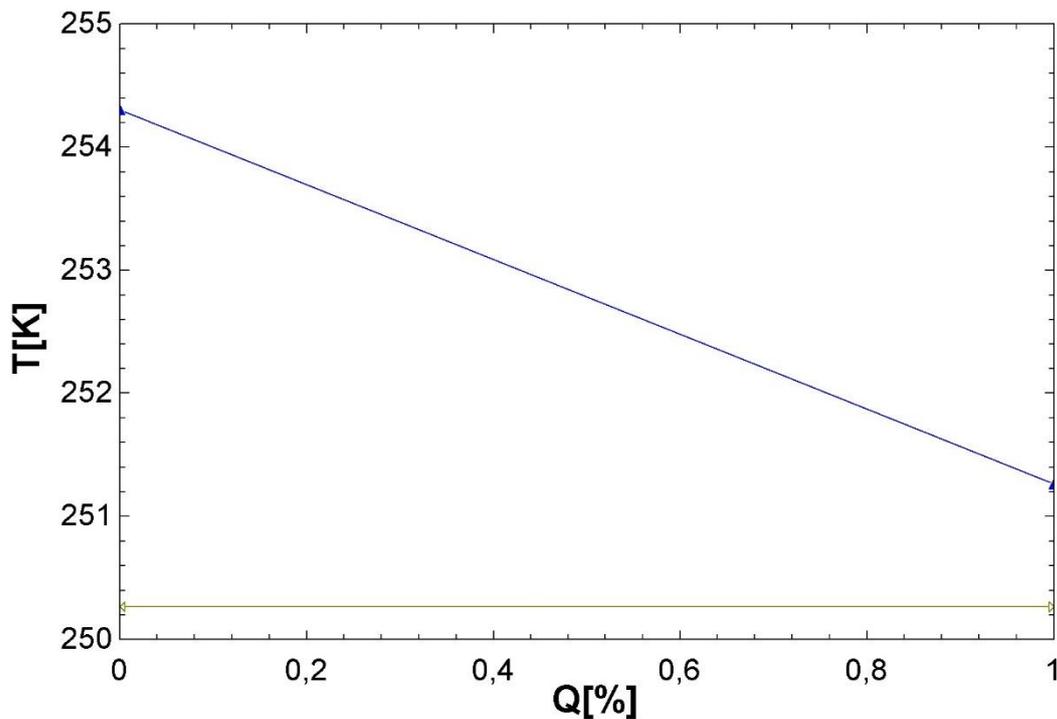


Ilustración 40: Diagrama T-Q de la carga del hielo mediante en la evaporación del CO₂, en el ciclo con refrigeración adicional de amoníaco.

Por último con esta última temperatura se pueden calcular las diferencias en los tres puntos donde puede estar la temperatura mínima: entrada, salida, cambio de pendiente, mediante el **código 4**, y la eficiencia en el intercambio con el **código 2**.

Tabla 36: Resultados en el intercambio hielo-CO2 en el ciclo básico con refrigeración adicional con amoníaco durante la carga.

Resultados		Valor	Unidad
Calor total	$Q_{\text{foco,frio,CO2,carga}}$	218,9	kJ/kg
Gasto másico de hielo	m_{hielo}	34,05	kg/s
Calor de precalentamiento	$Q_{\text{precalentamiento,CO2,carga}}$	0	kJ/kg
Calor de evaporación	$Q_{\text{evaporación,CO2,carga}}$	218,9	kJ/kg
Diferencia de temperatura mínima	$DT_{\text{min,foco,frio,CO2,carga}}$	0,25	K
Calor máximo	$Q_{\text{max,foco,frio,CO2,carga}}$	228	kJ/kg
Eficiencia	$\epsilon_{\text{foco,frio,CO2,carga}}$	0,9599	

En el primer intercambio en la carga del hielo, tanto las condiciones del hielo como las del CO₂ están definidas.

Tabla 37: Parámetros en el intercambio hielo-amoníaco en el ciclo básico con refrigeración adicional con amoníaco durante la carga.

Parámetros		Valor	Unidad
Presión del hielo	P_{hielo}	100	Bares
Presión del amoníaco	$P_{\text{baja,NH3}}$	2	bares
Temperatura de entrada del amoníaco	$T_{\text{out,expansión,NH3}}$	254,3	K
Temperatura de salida del amoníaco	$T_{\text{in,compresor,NH3}}$	254,3	K
Incremento de entalpía del amoníaco	Δh_{NH3}	1088,5	kJ/kg
Temperatura de entrada del hielo	$T_{\text{hielo,inicial}}$	254,7	K
Temperatura intermedia del hielo	$T_{\text{hielo,intermedia}}$	254,6	K

Las temperaturas del amoníaco son iguales pues se produce el cambio de estado de éste. Con las condiciones del hielo y su gasto másico se define el calor intercambiado con el amoníaco mediante la **ecuación 5**, y con la **ecuación 6** se define el gasto másico de amoníaco necesario.

Aplicando el **código 3**, esta vez en el amoníaco, se determinan las características de la evaporación del amoníaco.

En la **ilustración 41** se muestra el perfil de temperaturas en la primera etapa de la carga del hielo, el intercambio entre el hielo (azul) y el amoníaco (amarillo).

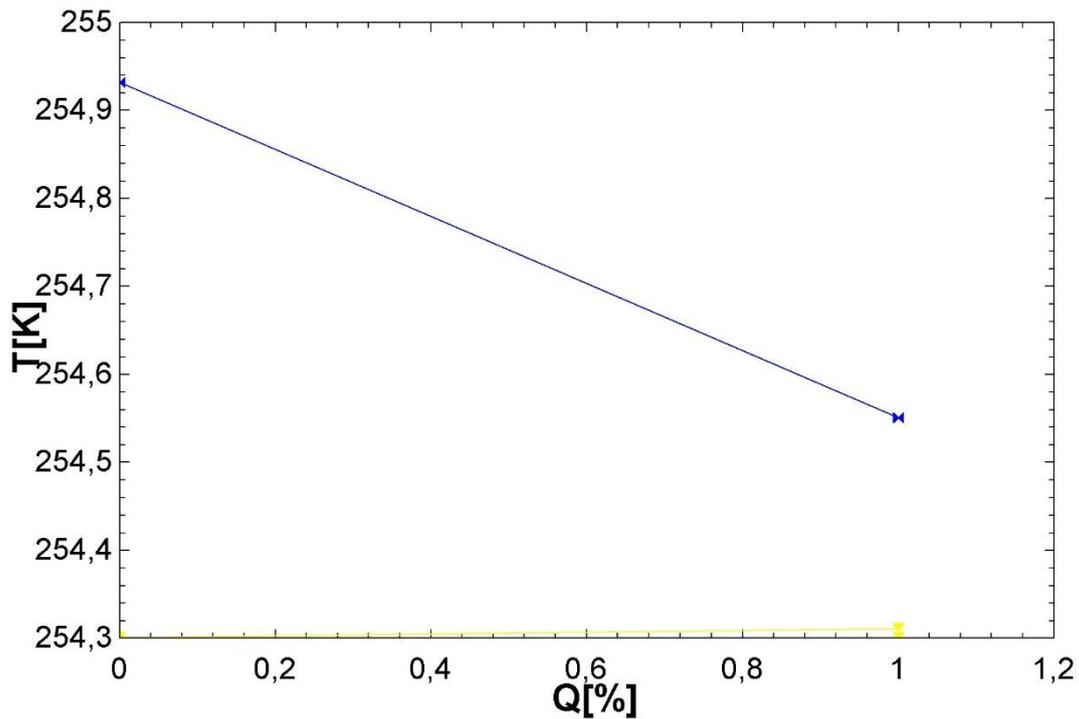


Ilustración 41: Diagrama T-Q de la carga del depósito de hielo mediante el ciclo adicional de amoníaco.

A continuación se calcula la temperatura del hielo cuando el amoníaco está saturado con la **ecuación 5**. Con esta temperatura se pueden calcular las diferencias de temperaturas en los diferentes puntos del intercambio, utilizando el **código 4**. Se puede comprobar que la diferencia mínima se sitúa en el cambio de pendiente. Además con el **código 2** se determina la eficiencia del intercambio entre el amoníaco y el hielo.

Tabla 38: Resultados del intercambio hielo-amoníaco en el ciclo básico con refrigeración adicional con amoníaco durante la carga.

Resultados		Valor	Unidad
Calor total	$Q_{\text{foco,frio,NH}_3}$	8,831	kJ/kg
Gasto másico de amoníaco	m_{NH_3}	0,0081	kg/s
Calor de precalentamiento	$Q_{\text{precalentamiento,NH}_3}$	0	kJ/kg
Calor de evaporación	$Q_{\text{evaporación,NH}_3}$	8,831	kJ/kg
Diferencia de temperatura mínima	$DT_{\text{min,NH}_3}$	1	K
Calor máximo	$Q_{\text{max,NH}_3}$	8,845	kJ/kg
Eficiencia	ϵ_{NH_3}	0,9984	

4.4.4 Regeneración en la descarga

En esta ocasión, la regeneración se utiliza para enfriar el CO_2 que sale de la turbina intercambiando calor con la salida de la bomba, realizando un precalentamiento del CO_2 que va a entrar en el intercambio con los depósitos de agua caliente.

El gasto de CO₂ considerado es el unitario (1 kg/s), para expresar los resultados por kg de CO₂, y las condiciones de entrada de ambas corrientes están definidas.

Tabla 39: Parámetros en la regeneración en la descarga del ciclo básico con refrigeración adicional con amoníaco durante la carga.

Parámetros		Valor	Unidad
Gasto másico de la corriente caliente	$m_{CO_2,descarga}$	1	kg/s
Gasto másico de la corriente fría	$m_{CO_2,descarga}$	1	kg/s
Presión del CO ₂ del lado caliente	$P_{baja,CO_2,descarga}$	20,8	Bares
Presión del CO ₂ del lado frío	$P_{alta,CO_2,descarga}$	174,2	Bares
Temperatura de entrada del lado caliente	$T_{out,turbina,CO_2,des}$	281,3	K
Temperatura de entrada del lado frío	$T_{out,bomba,CO_2,des}$	264	K
Diferencia de temperatura mínima	$DT_{min,regenerativo,des}$	4	K
Temperatura de salida del lado caliente	$T_{in,enfriamiento,CO_2,des}$	268	K

Para calcular las características del intercambio de calor se define una nueva función (**código 7**), que es similar a la que se utiliza para la carga del foco caliente, con la diferencia que en este caso se utilizan entalpías por el posible cambio de fase de una de las corrientes.

```

If (m_c*cp_c>m_f*cp_f) Then
    T_out_f := T_in_c - dTmin_HX
    h_out_f = enthalpy(CarbonDioxide;P=P_f;T=T_out_f)

    Q_real := m_f*(h_out_f - h_in_f)
    h_out_c := h_in_c - Q_real/m_c
    T_out_c = temperature(CarbonDioxide;P=P_c;h=h_out_c)
Else
    T_out_c = T_in_f + dTmin_HX
    h_out_c = enthalpy(CarbonDioxide;P=P_c;T=T_out_c)

    Q_real := m_c*(h_in_c - h_out_c)
    h_out_f := h_in_f + Q_real/m_f
    T_out_f = temperature(CarbonDioxide;P=P_f;h=h_out_f)
Endif

```

Código 7: Intercambio de calor con cambio de fase, conocidas las condiciones de entrada y gastos másicos.

Siendo el calor específico de la corriente fría mayor que el del lado caliente, la diferencia mínima de temperaturas se encuentra entre la entrada del lado frío y la salida del caliente.

En la **ilustración 42** se muestra la evolución de la temperatura de ambas corrientes de CO₂ durante la regeneración en el ciclo de descarga, donde la salida de la turbina (línea superior) cede calor a la salida de la bomba (línea inferior).

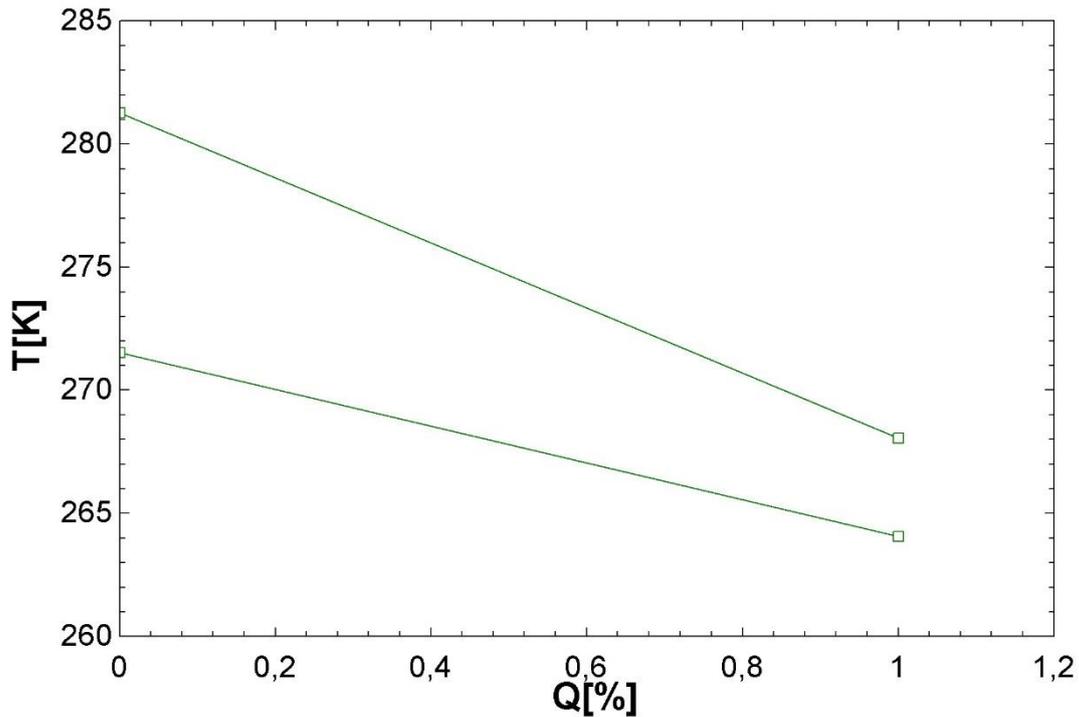


Ilustración 42: Regeneración en el ciclo de descarga en el caso base con refrigeración adicional con amoníaco durante la carga

Con el **código 2** se determina la eficiencia del intercambio.

Tabla 40: Resultados de la regeneración en la descarga del ciclo básico con refrigeración adicional con amoníaco durante la carga.

Resultados		Valor	Unidad
Calor real intercambiado	$Q_{\text{real,regenerativo,des}}$	14,81	kJ/kg
Temperatura de salida del lado frío	$T_{\text{in,precalentador,CO2,des}}$	271,5	K
Calor máximo	$Q_{\text{max,regenerativo,des}}$	19,47	kJ/kg
Eficiencia	$\epsilon_{\text{regenerativo,des}}$	0,7607	

4.4.5 Descarga de los depósitos de agua caliente

Considerando el gasto másico de CO₂ de partida unitario (1 kg/s) y con las condiciones de los depósitos de agua establecidas, queda proponer el modo de la descarga.

La descarga se realiza en dos intercambios, uno con cada depósito, imponiendo que las condiciones de salida del depósito A sean las del depósito B, inyectando la corriente que sale del intercambio del depósito A en el depósito B, como se muestra

en la **figura 43**, donde el tren de intercambiadores de carga del agua caliente se muestra en la parte superior y el de descarga en la parte inferior.

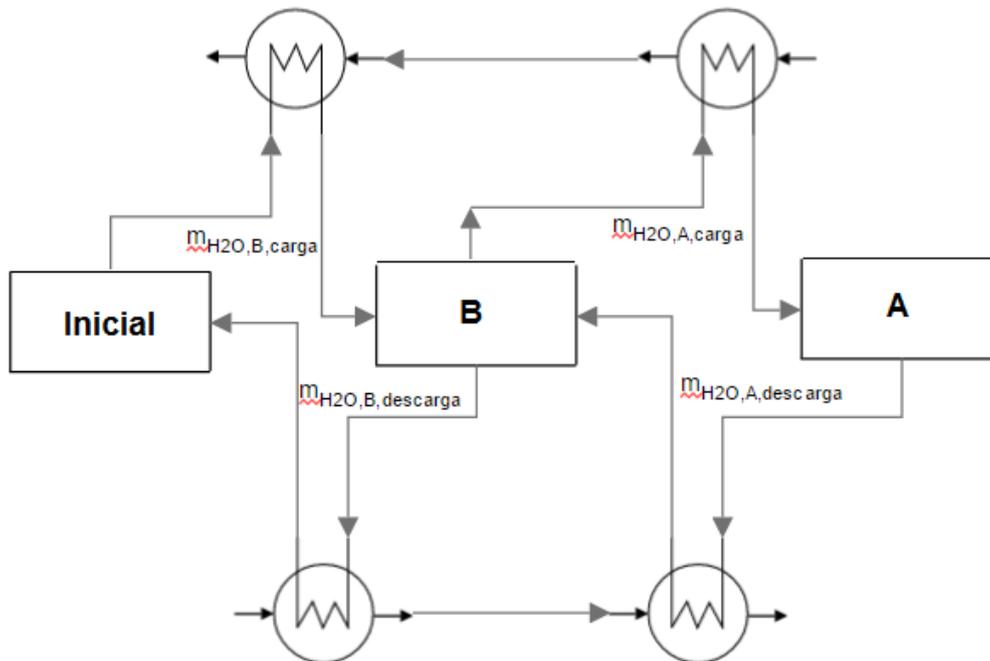


Ilustración 43: Balance de masa de los depósitos de agua caliente en el ciclo básico con refrigeración adicional con amoníaco durante la carga.

Lo siguiente es el cálculo de la temperatura de salida del dióxido de carbono, fundamental para el trabajo y el rendimiento del ciclo, pues es la temperatura de entrada a la turbina. La diferencia mínima de temperatura en el intercambio se sitúa en este extremo (**ecuación 15**), y la temperatura de entrada del CO₂ quedó determinada en la regeneración.

El calor del intercambio total queda definido mediante la **ecuación 6**. Este calor se reparte entre el que cede el depósito A y el que cede el depósito B, dependiendo del gasto másico de agua de cada depósito. Mediante la **ecuación 17** se definen dos valores auxiliares de calor con los gastos másicos de agua caliente durante la carga, y sumando ambos, con la **ecuación 18** se define un coeficiente que relaciona el gasto másico de agua caliente durante la carga y la descarga, para que la descarga de ambos depósitos se realice al mismo tiempo.

$$Q_{\text{auxiliar,[deposito]}} = X_{\text{H2O,[deposito],carga}} * (h_{\text{in,[deposito]}} - h_{\text{out,[deposito]}})$$

Ecuación 17: Calor de descarga proporcional a la carga

$$r_Q = \frac{Q_{\text{real,descarga,agua,caliente}}}{Q_{\text{auxiliar,A}} + Q_{\text{auxiliar,B}}}$$

Ecuación 18: Relación entre calor de carga y descarga

$$m_{\text{H2O,[deposito]}} = X_{\text{H2O,[deposito],carga}} * r_Q$$

Ecuación 19: Gasto de descarga proporcional al de carga

Los dos gastos de agua caliente se definen mediante la **ecuación 19** y con la **ecuación 5** se determina el calor cedido por cada depósito. La temperatura del CO₂ en

el punto intermedio entre el intercambio entre ambos depósitos se calcula con la **ecuación 6**.

Tabla 41: Parámetros en la descarga del agua caliente en el ciclo básico con refrigeración adicional con amoníaco durante la descarga.

Parámetros		Valor	Unidad
Presión del CO ₂	$P_{\text{alta,CO}_2,\text{descarga}}$	174,2	bares
Presión del agua caliente	$P_{\text{agua,caliente}}$	100	bares
Flujo de CO ₂	m_{CO_2}	1	kg/s
Temperatura de salida del agua	$T_{\text{agua,caliente,inicial}}$	288	K
Temperatura del depósito A	$T_{\text{agua,caliente,deposito,A,cargado}}$	449,9	K
Diferencia de temperatura mínima	DT_{min}	4	K
Temperatura de salida del CO ₂	$T_{\text{in,turbina,CO}_2,\text{des}}$	445,9	K
Temperatura de entrada del CO ₂	$T_{\text{in,precalentador,CO}_2,\text{des}}$	271,5	K
Temperatura del depósito B	$T_{\text{agua,caliente,deposito,B,cargado}}$	369	K
Temperatura de salida del CO ₂	$T_{\text{intermedia,CO}_2,\text{des}}$	360,6	K

Una vez calculada la temperatura de salida se comparan las diferencias de temperaturas en los extremos de ambos intercambiadores, y no es necesario evaluar ningún otro punto puesto que no se produce el cambio de fase de ninguno de los fluidos.

La eficiencia de la descarga del depósito principal se evalúa mediante el **código 2**.

Tabla 42: Resultados de la descarga del depósito principal de agua caliente en el ciclo básico con refrigeración adicional con amoníaco durante la carga.

Resultados		Valor	Unidad
Flujo de agua caliente depósito A	$m_{\text{H}_2\text{O,A,des}}$	0,4548	kg/s
Calor total depósito A	$Q_{\text{real,descarga,agua,caliente,A}}$	156,8	kJ/kg
Calor máximo	$Q_{\text{max,descarga,agua,caliente,A}}$	309,6	kJ/kg
Eficiencia	$\epsilon_{\text{descarga,agua,caliente,A}}$	0,5064	

En las **ilustración 44** se muestra el perfil de temperaturas en el intercambio entre el CO₂ y el depósito de agua caliente principal.

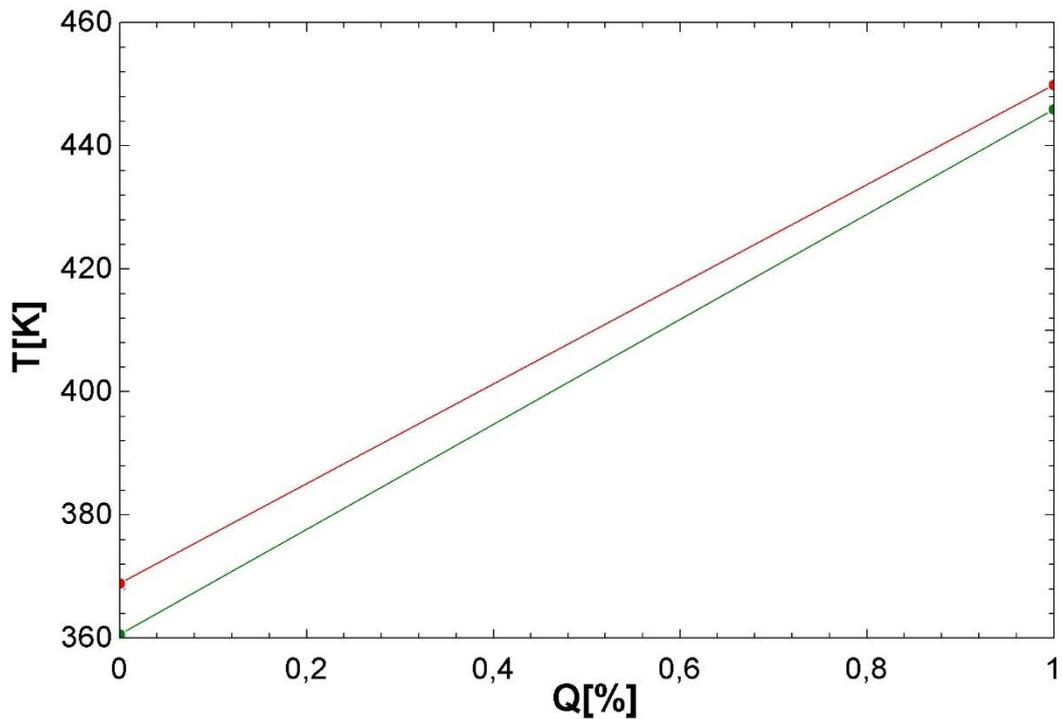


Ilustración 44: Diagrama T-Q de la descarga del depósito principal de agua caliente, en el ciclo con refrigeración adicional de amoníaco en la carga.

La línea superior roja, representa la evolución de temperaturas del agua caliente en su paso por el intercambiador, desde la temperatura del depósito principal a la temperatura del secundario.

La línea inferior verde, muestra el incremento de temperaturas en la corriente de CO₂, desde el punto intermedio entre intercambios de calor hasta la entrada de la turbina.

La diferencia mínima de temperaturas en la descarga del depósito principal se sitúa en la salida del CO₂, como se indicó en el comienzo de este apartado. Las rectas se alejan según nos acercamos al otro extremo del intercambiador, donde la diferencia de temperaturas alcanza 8,34 K.

En las **ilustración 45** se muestra el perfil de temperaturas en el intercambio entre el CO₂ y el depósito de agua caliente secundario.

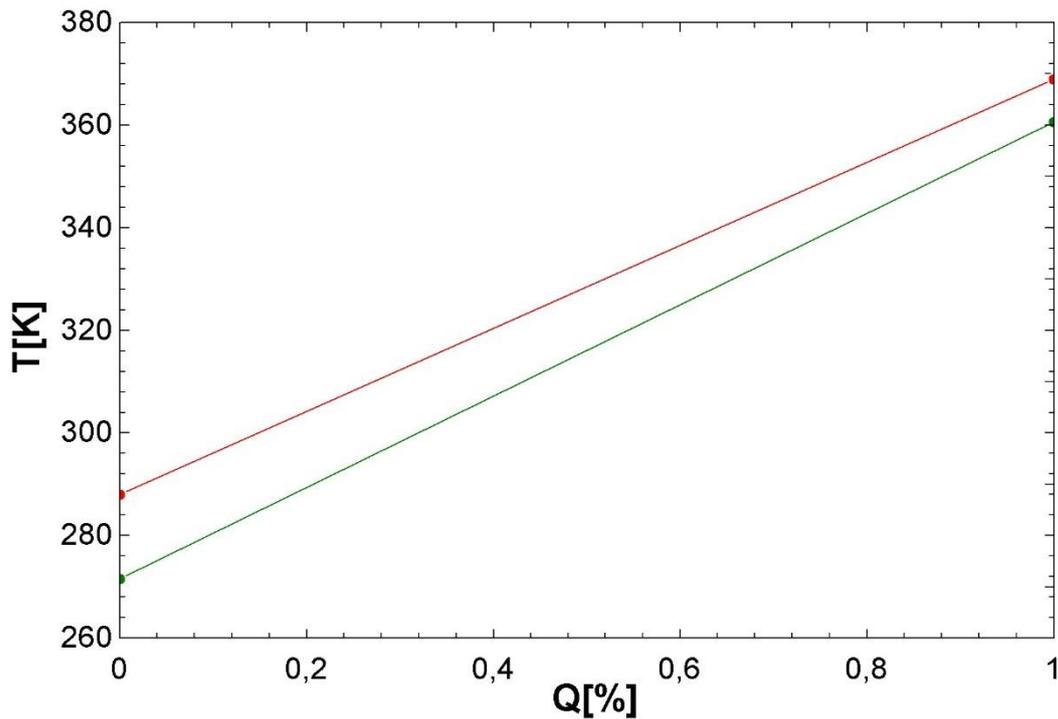


Ilustración 45: Diagrama T-Q de la descarga del depósito secundario de agua caliente, en el ciclo con refrigeración adicional de amoníaco durante la carga.

La diferencia mínima de temperaturas en este intercambio, se sitúa también en el extremo de salida del CO₂, que pasa al intercambio con el depósito principal. El agua caliente, reduce su temperatura desde la del depósito secundario de agua caliente hasta la inicial, que se corresponde con la del ambiente.

Por último se evalúa la eficiencia de la descarga del depósito secundario mediante el **código 2**.

Tabla 43: Resultados de la descarga del depósito secundario de agua caliente en el ciclo básico con refrigeración adicional con amoníaco durante la descarga.

Resultados		Valor	Unidad
Flujo de agua caliente depósito B	$m_{H_2O,B,des}$	0,6569	kg/s
Calor total depósito B	$Q_{real,descarga,agua,caliente,B}$	221,4	kJ/kg
Calor máximo	$Q_{max,descarga,agua,caliente,B}$	240,8	kJ/kg
Eficiencia	$\epsilon_{descarga,agua,caliente,B}$	0,9197	

4.4.7 Descarga del depósito de hielo

Como en el ciclo de descarga en el caso base, se produce el cambio de estado del dióxido de carbono. El hielo se corresponde con la corriente que absorbe calor (lado frío) y dióxido de carbono cede calor condensando (lado caliente).

Tanto el flujo de CO₂ como las condiciones de entrada y salida de los dos fluidos están determinadas.

Tabla 44: Parámetros en la descarga del hielo en el ciclo básico con refrigeración adicional con amoníaco durante la carga.

Parámetros		Valor	Unidad
Presión del hielo	P_{hielo}	100	Bares
Presión del CO_2	$P_{\text{baja,CO}_2,\text{des}}$	20,8	bares
Gasto másico del dióxido de carbono	$m_{\text{CO}_2,\text{des}}$	1	kg/s
Temperatura de entrada del CO_2	$T_{\text{in,enfriamiento,CO}_2,\text{des}}$	268	K
Temperatura de salida del CO_2	$T_{\text{in,bomba,CO}_2,\text{des}}$	254,9	K
Incremento de entalpía del CO_2	Δh_{CO_2}	294,6	kJ/kg
Temperatura de entrada del hielo	$T_{\text{hielo,deposito,cargado}}$	251,3	K
Temperatura de salida del hielo	$T_{\text{hielo,inicial}}$	254,7	K

En lugar del precalentamiento del ciclo de carga, en este caso es un enfriamiento previo al comienzo de la condensación. Con el **código 5**, se determina la cantidad de calor intercambiada en el enfriamiento y la condensación. El flujo de hielo necesario y temperatura del hielo que corresponde con el inicio de la condensación del CO_2 se determinan mediante la **ecuación 6**.

En la **ilustración 46** se muestra la evolución del CO_2 (verde) y del hielo (azul) durante la descarga del depósito de hielo. En la gráfica se puede observar que la diferencia mínima de temperaturas se encuentra en el punto donde se produce el cambio de pendiente en la corriente de CO_2 .

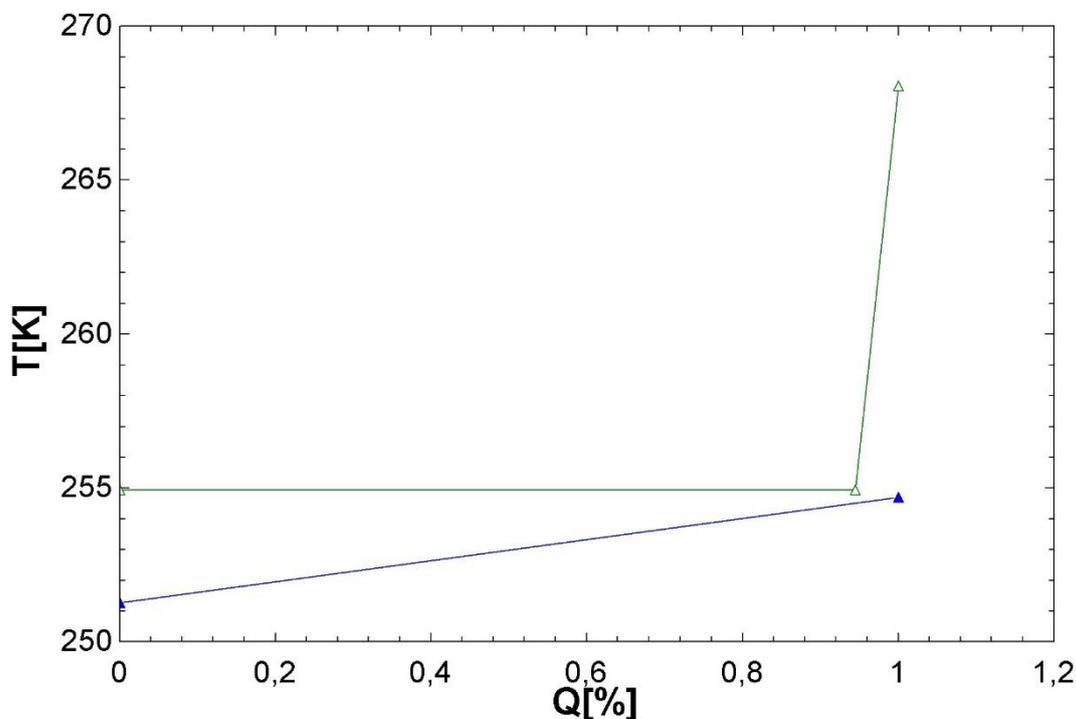


Ilustración 46: Diagrama T-Q de la descarga del depósito de hielo, en el ciclo con refrigeración adicional de amoníaco durante la carga.

Con la temperatura del hielo en el cambio de pendiente, se calcula la diferencia de temperatura en los tres puntos donde puede estar la temperatura mínima: entrada, salida, cambio de pendiente, mediante el **código 6** y la eficiencia en el intercambio con el **código 2**.

Tabla 45: Resultados en la descarga del hielo en el ciclo básico con refrigeración adicional con amoníaco durante la carga.

Resultados		Valor	Unidad
Calor de enfriamiento	$Q_{\text{enfriamiento,CO2,des}}$	16,17	kJ/kg
Calor de condensación	$Q_{\text{condensación,CO2,des}}$	278,4	kJ/kg
Calor total	$Q_{\text{real,descarga,hielo}}$	294,6	kJ/kg
Flujo de hielo	m_{hielo}	44,05	kg/s
Temperatura del hielo en el cambio de pendiente	$T_{\text{hielo,CO2,saturado}}$	254,5	K
Diferencia de temperatura mínima	$DT_{\text{min,descarga,hielo}}$	0,4365	K
Calor máximo	$Q_{\text{max,descarga,hielo}}$	300,6	kJ/kg
Eficiencia	$\epsilon_{\text{descarga,hielo}}$	0,98	

4.5 Trabajo y calor

4.5.1 Ciclo de CO₂ en la carga

En la **tabla 46** se muestran los valores de calor y trabajo en el ciclo de CO₂ durante la carga. Los trabajos de compresión y expansión están definidos con las **ecuaciones 7 y 8**.

Tabla 46: Trabajo y calor del ciclo de CO₂ durante la carga en el caso con refrigeración adicional con amoníaco

		kJ/kg
Trabajo de compresión	$W_{\text{compresion,CO2,carga}}$	137,6
Trabajo de expansión en turbina hidráulica	$W_{\text{hidraulica,CO2,carga}}$	13,81
Calor cedido al agua caliente en el ciclo de carga	$Q_{\text{foco,caliente,CO2,carga}}$	200,6
Calor cedido por el hielo en el ciclo de carga	$Q_{\text{foco,frio,CO2,carga}}$	218,9

4.5.2 Ciclo de NH₃

En la **tabla 47** se recoge el calor y trabajo relacionado con el ciclo de refrigeración adicional de amoníaco durante la carga. El trabajo de compresión está determinado por la **ecuación 7** y el de expansión por la **ecuación 8**.

Tabla 47: Trabajo y calor del ciclo de NH₃ durante la carga en el caso con refrigeración adicional con amoníaco

		kJ/kg
Trabajo de compresión	$W_{\text{compresion,NH3,carga}}$	2,838
Trabajo de expansión en turbina hidráulica	$W_{\text{expansion,NH3,carga}}$	0,2245
Calor cedido al agua caliente en el ciclo de carga	$Q_{\text{foco,caliente,NH3,carga}}$	11,44
Calor cedido por el hielo en el ciclo de carga	$Q_{\text{foco,frio,NH3,carga}}$	8,831

4.5.3 Ciclo de CO2 en la descarga

En la **tabla 48** se han recogido los valores de trabajo y calor en el ciclo de descarga del caso base con refrigeración adicional de amoníaco durante la carga. Las **ecuaciones 9 y 10**, definen el trabajo de compresión en la bomba y expansión en la turbina respectivamente.

Tabla 48: Trabajo y calor en el ciclo de CO2 durante la descarga en el caso con refrigeración adicional con amoníaco

		kJ/kg
Trabajo de compresión en bomba	$W_{\text{bomba,descarga}}$	17,39
Trabajo de expansión en turbina	$W_{\text{turbina,descarga}}$	101,1
Calor cedido por el agua caliente en el ciclo de descarga	$Q_{\text{foco,caliente,des}}$	378,3
Calor cedido al hielo en el ciclo de descarga	$Q_{\text{foco,frio,des}}$	294,6

4.6 Eficiencia

El rendimiento termodinámico de un sistema de almacenamiento de energía se indica a través de la eficiencia de carga y descarga, que es la relación entre la electricidad que se produce en la descarga para un tiempo ζ_D y la que se utiliza en la carga en un tiempo ζ_C .

Sin embargo en este caso se va a definir el rendimiento con las **ecuaciones 20-24**, considerando el calor cedido desde los focos y el trabajo en los diferentes equipos del sistema, sin considerar aún tiempos de carga y descarga.

$$\text{COP}_{\text{carga,CO2}} = \frac{Q_{\text{foco,caliente,carga}} + Q_{\text{foco,frio,CO2,carga}}}{W_{\text{compresion,CO2,carga}} - W_{\text{hidraulica,carga}}}$$

Ecuación 20: Rendimiento del ciclo de CO2 durante la carga en el caso base con refrigeración adicional de amoníaco

$$\text{COP}_{\text{carga,NH3}} = \frac{Q_{\text{foco,frio,NH3,carga}}}{W_{\text{compresion,NH3,carga}}}$$

Ecuación 21: Rendimiento del ciclo de NH3 durante la carga en el caso base con refrigeración adicional de amoníaco

$$\text{COP}_{\text{carga}} = \frac{Q_{\text{foco,caliente,carga}} + Q_{\text{foco,frio,carga}}}{W_{\text{compresion,CO2,carga}} + W_{\text{compresion,NH3,carga}} - W_{\text{hidraulica,carga}}}$$

Ecuación 22: Rendimiento del ciclo de carga en el caso base con refrigeración adicional de amoníaco

$$\eta_{\text{descarga}} = \frac{W_{\text{turbina,descarga}} - W_{\text{bomba,descarga}}}{Q_{\text{foco,caliente,des}} + Q_{\text{foco,frio,des}}}$$

Ecuación 23: Rendimiento del ciclo de descarga en el caso base con refrigeración adicional de amoníaco

$$\eta_{\text{total}} = \frac{W_{\text{turbina,descarga}} - W_{\text{bomba,descarga}}}{W_{\text{compresion,CO2,carga}} + W_{\text{compresion,NH3,carga}} - W_{\text{hidraulica,CO2,carga}}}$$

Ecuación 24: Rendimiento del caso base con refrigeración adicional de amoníaco

En la **tabla 49** se recogen los resultados referentes a rendimiento del ciclo básico con refrigeración adicional con amoníaco durante la carga.

Tabla 49: Rendimientos en el caso base con refrigeración adicional de amoníaco

Rendimiento	Abreviatura	
Rendimiento del ciclo de CO ₂ en la carga	COP _{carga,CO2}	4,537
Rendimiento del ciclo de NH ₃ en la carga	COP _{carga,NH3}	7,143
Rendimiento total del ciclo de carga	COP _{carga}	4,505
Rendimiento del ciclo de descarga	$\eta_{descarga}$	0,1243
Rendimiento global	η_{total}	0,6609

5. Configuración alternativa de la planta con aporte térmico.

5.1 Aporte térmico

5.1.1 Integración del sistema de almacenamiento

El almacenamiento de la energía de origen renovable es uno de sus principales problemas. Mantener en constante equilibrio la generación y el consumo, operando el sistema en tiempo real, todos los días del año, las 24 horas del día, con fuentes de energía que son intermitentes e irregulares es una tarea difícil. Con el problema añadido que supone el almacenamiento de cualquier energía a gran escala.

El sistema de almacenamiento como el propuesto puede suponer una alternativa viable para complementar el almacenamiento de energía en una central renovable.

En este proyecto se va a tomar como referencia una central termosolar de concentración, con tecnología cilindro-parabólica.

5.1.2 Central termosolar

Un exceso de producción en la central termosolar puede aprovecharse en la carga de los depósitos de agua caliente. Dado que el objetivo de la compresión en el ciclo de carga es conseguir una temperatura elevada para cargar el agua caliente, con un buen acoplamiento podrían cargarse los depósitos de agua sin coste de energía eléctrica.

La tecnología cilindro-parabólica basa su funcionamiento en el seguimiento del movimiento aparente del sol para que los rayos incidan perpendicularmente a la superficie de captación, y en la concentración de estos rayos solares incidentes en unos tubos receptores de alta eficiencia térmica localizados en la línea focal de los concentradores. [6]



Ilustración 47: Reflector cilindro-parabólico y tubo receptor de una central termosolar. [6]

En estos tubos, un fluido transmisor de calor, normalmente un fluido orgánico sintético (HTF) es calentado hasta unos 400°C. El fluido de trabajo que circula por el tubo interior es diferente según la tecnología. Para bajas temperaturas (< 200°C) se suele utilizar agua desmineralizada con Etileno-Glicol mientras que para mayores temperaturas (200° C < T < 400 ° C) se utiliza aceite sintético. [6]

5.1.3 Fluido térmico

El HTF trabaja entre unos 290°C a la entrada de la línea en la que se concentra la radiación y los 390 a la salida. Mayor temperatura de salida supone mayor rendimiento global de la planta, pero las características químicas del fluido no hacen posible utilizarlo por encima de los 400°C: las reacciones de degradación aumentan exponencialmente de velocidad, originándose hidrocarburos volátiles y pesados que modifican el comportamiento de la planta y que plantean incluso problemas de seguridad. Por ellos las centrales CCP tienen limitada la temperatura máxima de trabajo del fluido orgánico a unos 400°C. [7]

La **tabla 50** recoge los datos de temperatura de la central que se utilizarán en este estudio.

Tabla 50: Entrada y salida del fluido térmico de la central termosolar.

Estado del fluido térmico		Valor	Unidad
Temperatura del fluido térmico de entrada en el campo solar	$T_{in,campo,solar}$	293	°C
Temperatura del fluido térmico de salida en el campo solar	$T_{out,campo,solar}$	393	°C

El calor específico del HTF oscila entre 2300 y 2700 kJ/kgK, es decir, para elevar la temperatura de un kg de HTF un grado es necesario suministrar 2300 kJ de energía (si el fluido está a unos 300°C) o 2700 kJ (si el fluido está a unos 400°C). [7]

Considerando un calor específico medio de 2500 kJ/kgK es posible hacer una estimación del salto entálpico, en 250 kJ/kg, mediante la **ecuación 25**.

$$\Delta h_{campo,solar} = c_{p,medio,campo,solar} * (T_{out,campo,solar} - T_{in,campo,solar})$$

Ecuación 25: Salto entálpico del campo solar

La entalpía es una medida de la energía interna del fluido en unas condiciones determinadas. Su variación es una medida de la cantidad de energía que el fluido ha intercambiado (absorbido o cedido) con su entorno. La entalpía del HTF a 293°C es aproximadamente 540 kJ/kg. A 393 es de unos 800 kJ/kg. [7]

5.2 Configuración de la planta

5.2.1 Ciclo de carga

Respecto a la configuración anterior que incorporaba el ciclo adicional de refrigeración con amoníaco en la carga, la modificación principal es la adición de una fuente de calor adicional. El funcionamiento de esta parte de la planta está condicionado a la disponibilidad del recurso térmico. Cuando se pone en funcionamiento, una parte del gasto másico del CO₂ que sale de la carga de los depósitos de agua caliente se deriva hacia el intercambio con la fuente de calor. La temperatura de salida del CO₂ tras este

intercambio es la misma que la que tiene al salir del compresor. Esta corriente de CO₂, llamado a partir de ahora como CO₂ térmico, se inyecta a la salida del compresor, para volver a inicial el proceso de carga de ambos depósitos. Esto permite la carga de los depósitos de agua caliente sin necesidad de volver a pasar por el compresor.

El ciclo de amoníaco se sigue utilizando como refrigeración adicional en la carga pero con alguna diferencia: en la carga del hielo participa en segundo lugar, es decir, el hielo se carga en dos etapas, primero se produce el intercambio con el CO₂ y segundo con el amoníaco.

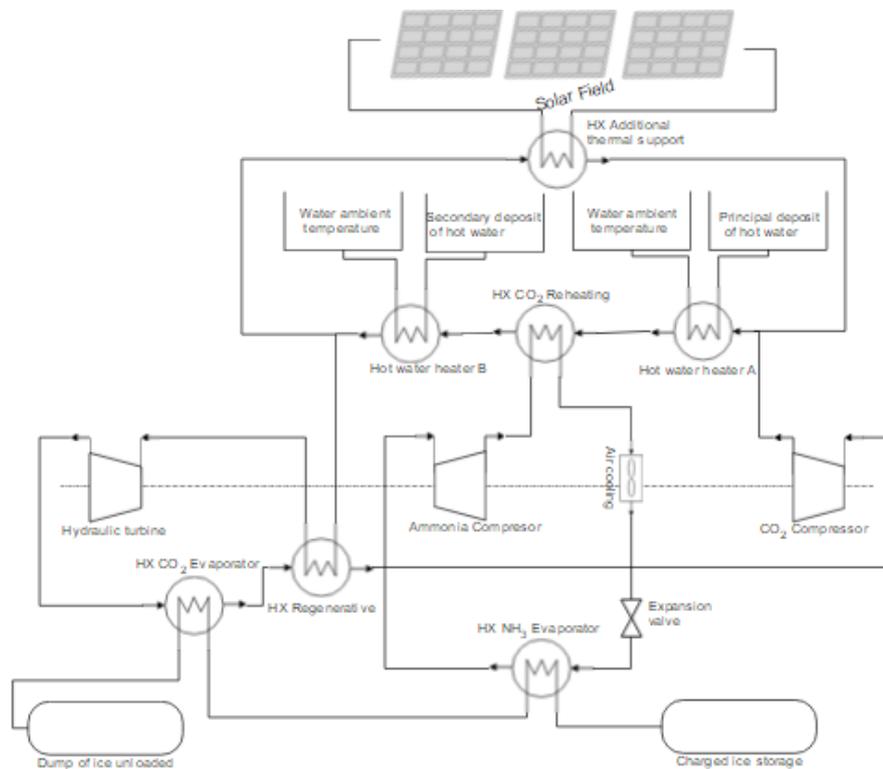


Ilustración 48: Configuración de la planta en el ciclo de carga, ciclo con configuración alternativa y aporte térmico adicional.

Además, se integra la condensación del amoníaco en el ciclo de CO₂. Cuando la presión de alta del amoníaco es tal que la temperatura de salida del compresor es mayor que la del ambiente se lleva a cabo el recalentamiento del CO₂ por el condensador de amoníaco.

5.2.2 Descarga

El ciclo de descarga mantiene el mismo funcionamiento. Debido al aporte térmico de la fuente de calor en los depósitos de agua caliente, el depósito de hielo puede no satisfacer completamente el ciclo de descarga, dependiendo del periodo de funcionamiento de la fuente de calor extra.

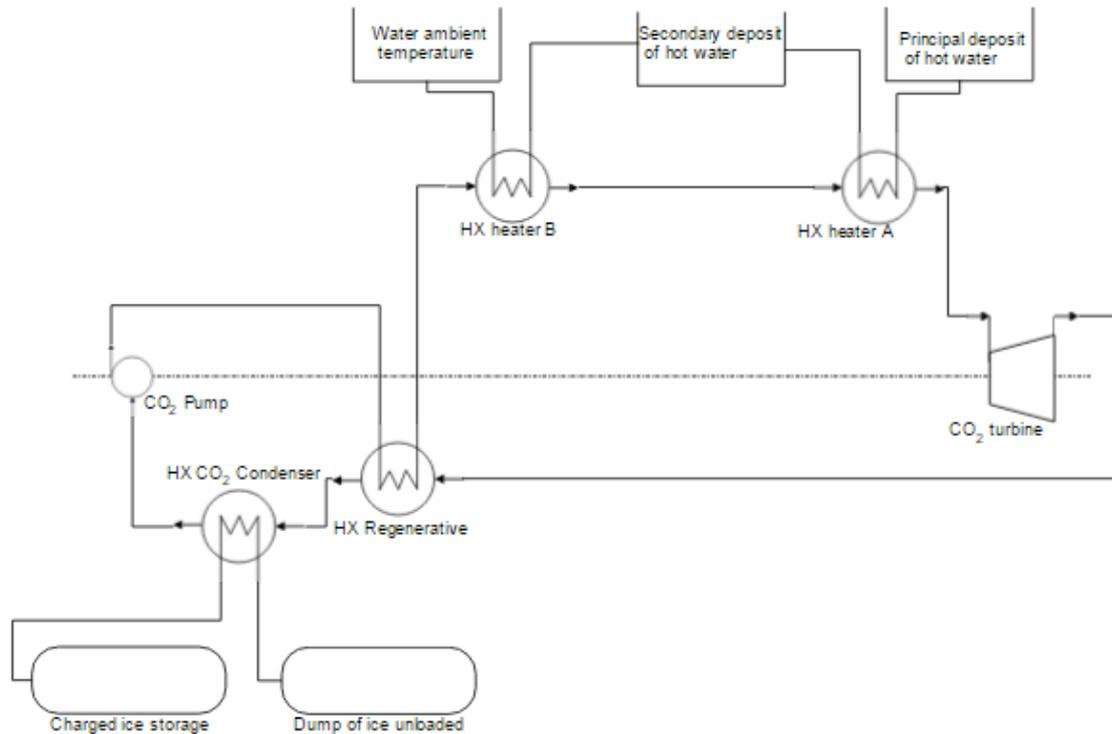


Ilustración 49: Configuración de la planta en el ciclo de descarga, ciclo con configuración alternativa y aporte térmico adicional.

5.3 Justificación

La principal razón de colocar el ciclo de refrigeración adicional tras el intercambio con el CO₂ es la limitación que establece la proximidad en las presiones bajas de carga y descarga en el intercambio de calor con el hielo. Colocando

La temperatura mínima alcanzable por el hielo al cargar es mayor que la del CO₂ a la presión de baja en la carga, mientras que la más alta que alcanza es menor que la del CO₂ a la presión de baja en la descarga.

En la **ilustración 50** se muestra el esquema de las limitaciones que establecen las presiones del CO₂ y el amoníaco en las temperaturas del CO₂. El perfil de temperatura del hielo se representa con el azul y la del amoníaco con el amarillo. El CO₂ en el ciclo de carga se muestra en color naranja mientras que en verde se representa la descarga.

La temperatura del hielo inicial está 4 K por debajo de la de saturación del CO₂ a la presión baja de descarga. La temperatura intermedia se encuentra 4 K por encima de la de saturación del CO₂ a la presión baja de carga, mientras que la temperatura final del hielo hace lo propio con la presión baja del amoníaco.

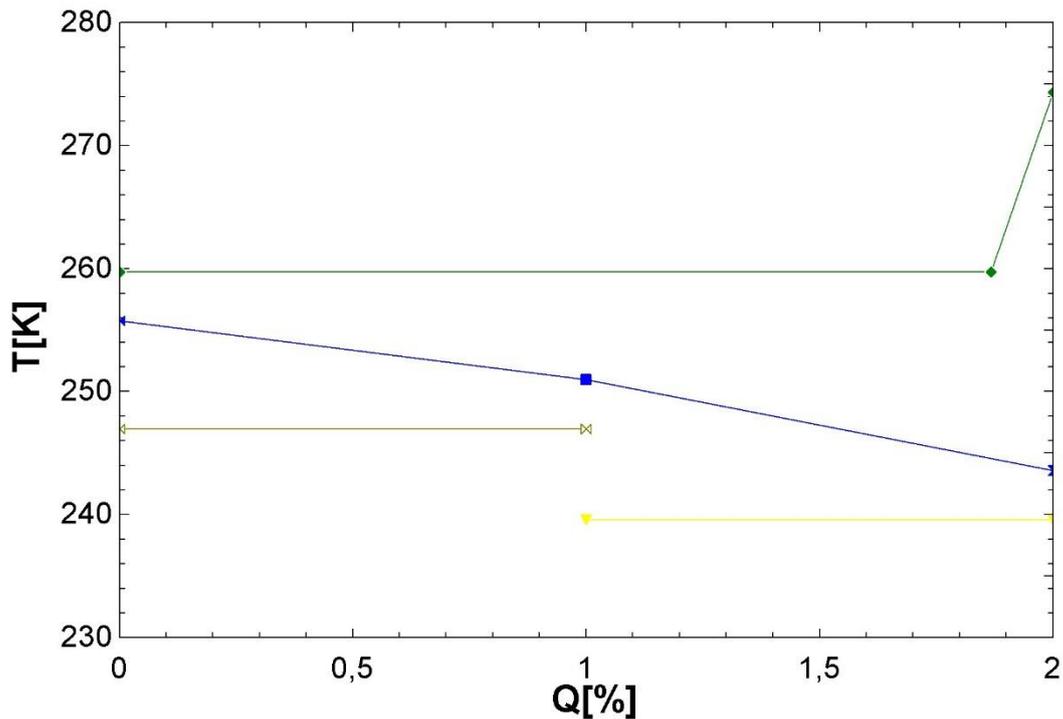


Ilustración 50: Diagrama T-Q de la carga del hielo completa en la configuración alternativa con aporte térmico.

Incorporando la refrigeración adicional en la carga, puede ser más razonable aplicar el intercambio de calor entre el hielo y el CO₂ primero, y el del amoníaco después, permitiendo aumentar el rango de temperaturas en la descarga.

5.4 Descripción de los ciclos

5.4.1 Equipos de la planta

La nueva configuración de la planta no presenta ninguna novedad en el rendimiento de los equipos respecto a la configuración anterior. Sus valores se recogen en la **tabla 51**.

Tabla 51: Rendimiento de los equipos en la configuración alternativa con aporte térmico

Rendimiento		
Rendimiento del compresor	$\eta_{\text{compresor}}$	0,86
Rendimiento de la turbina hidráulica	$\eta_{\text{hidraulica}}$	0,85
Compresor en el ciclo de amoníaco	$\eta_{\text{Compresor;NH}_3}$	0,85
Rendimiento de la bomba	η_{bomba}	0,85
Rendimiento de la turbina	η_{turbina}	0,88

5.4.2 Parámetros de presión

Tras el análisis realizado en el apartado 3 de este proyecto, donde se estudia la influencia de las presiones en el resto de parámetros del ciclo básico, se obtuvieron datos sobre el efecto positivo o negativo que tendría aumentar o disminuir cada una de

las presiones. En referencia a estos datos, se realiza una modificación en los valores de presión de partida. En la **tabla 52** se muestran los nuevos valores de presión, sombreados en verde, al lado de los valores de presión iniciales, sombreados en amarillo.

Tabla 52: Valores de presión en la configuración alternativa con aporte térmico.

Parámetros		CA,AP	CB,RA	
Presión de alta del CO ₂ en la carga	P _{alta,CO2,carga}	210	188,7	↑
Presión de baja CO ₂ en la carga	P _{baja,CO2,carga}	16,2	18	↓
Presión de alta del CO ₂ en la descarga	P _{alta,CO2,des}	190	174,2	↑
Presión de baja del CO ₂ en la descarga	P _{baja,CO2,des}	24	20,8	↑
Presión de alta del NH ₃ en la carga	P _{alta,NH3}	8	14,5	↓
Presión de baja del NH ₃ en la carga	P _{baja,NH3}	1	2	↓

La presión de alta del CO₂ en el ciclo de carga se aumenta. Aunque esto supone un mayor trabajo de compresión, también permite alcanzar una temperatura de salida del compresor más alta, que conlleva una temperatura más alta en la entrada de la turbina.

La presión de alta del CO₂ en el ciclo de descarga también se aumenta. Aunque la temperatura de entrada a la turbina está fija, al aumentar la presión la línea de expansión se desplaza a la izquierda, acercándose a la campana de saturación. Esto hace que se reduzca el calor de condensación necesario en la descarga.

La presión de baja en la carga disminuye y la presión de baja en la descarga aumenta. Esto consigue una mayor distancia entre las líneas de temperatura constante de la evaporación y condensación. Al aumentar la distancia entre las líneas de presión constante se aumenta el rango de temperaturas del hielo. Además se puede aumentar la diferencia de temperaturas mínima en los intercambios con el foco frío, que en el caso básico podían ser demasiado bajas.

Esta última modificación penaliza el rendimiento global del sistema pues al disminuir la presión baja de carga aumenta el trabajo de compresión y al aumentar la presión baja de descarga disminuye el trabajo en la turbina. La disminución del rendimiento se asume para mejorar el funcionamiento del sistema. Al aumentar el rango de temperaturas del hielo se disminuyen los gastos másicos necesarios en los intercambios con el foco frío y aumentar la diferencia mínima en la carga y descarga del hielo mejora los intercambios de calor.

Las presiones del NH₃ disminuyen. Al disminuir la presión de alta baja el trabajo del compresor. Al reducir la presión de baja se consigue disminuir la temperatura final del hielo, aunque también aumenta el trabajo del compresor.

5.4.3 Temperaturas en los depósitos de agua caliente

Como ocurriese en los casos anteriores, la temperatura de almacenamiento del agua caliente en el depósito principal (depósito A) debe ser lo más alta posible, siendo la del CO₂ a la salida del compresor en el proceso de carga (máxima temperatura alcanzable en el sistema), menos la diferencia de temperatura mínima en el intercambiador (**ecuación 15**). En la **tabla 53** se muestra la nueva temperatura del depósito principal (sombreado en verde), junto a la temperatura del depósito principal en el ciclo básico con refrigeración de amoníaco en la carga, sombreado en amarillo.

Tabla 53: Estado del agua caliente en el depósito principal.

Estado del agua caliente en el depósito		CA,AP	CB,RA	Unidad
A				
Temperatura del depósito A	$T_{H_2O,deposito,A}$	467,1	449,9	K
Diferencia de temperatura	$DT_{carga,CO_2,caliente}$	4	4	K
Presión del agua caliente	$P_{foco,caliente}$	100	100	bares

Con la nueva presión de alta del CO₂ en la carga, la temperatura de almacenamiento del agua aumenta 17 K, esto supondrá el mismo incremento en la temperatura del CO₂ de entrada en la turbina.

En esta configuración, las condiciones de almacenamiento en el depósito secundario (depósito B) serán diferentes. La temperatura de almacenamiento dependerá de la presión de alta en el ciclo de amoníaco, pues el condensador de amoníaco se usa en el recalentamiento del CO₂ previo a la carga de este depósito. En la **tabla 54** se recogen los valores de temperatura del depósito secundario en la nueva configuración (sombreado en verde) y en el ciclo básico con refrigeración adicional en la carga (sombreado en amarillo).

Tabla 54: Estado del agua caliente en el depósito secundario.

Estado del agua caliente en el depósito		CA,AP	CB,RA	Unidad
B				
Temperatura del depósito B	$T_{H_2O,deposito,B}$	329,4	369	K
Diferencia de temperatura	$DT_{carga,CO_2,caliente}$	4	4	K
Presión del agua caliente	$P_{foco,caliente}$	100	100	bares

A diferencia del ciclo básico con refrigeración adicional en la carga, donde la temperatura del depósito secundario era una temperatura media de la inicial y de la del depósito principal, y los depósitos estaban conectados en serie tanto en la carga como en la descarga, en la nueva configuración, los depósitos de agua caliente se cargan en paralelo, de forma que el depósito principal se carga con la salida del compresor de CO₂, y el depósito secundario aprovecha la energía disponible tras la compresión del amoníaco.

La **ilustración 51** es un diagrama T-s del agua caliente en el ciclo con la configuración alternativa.

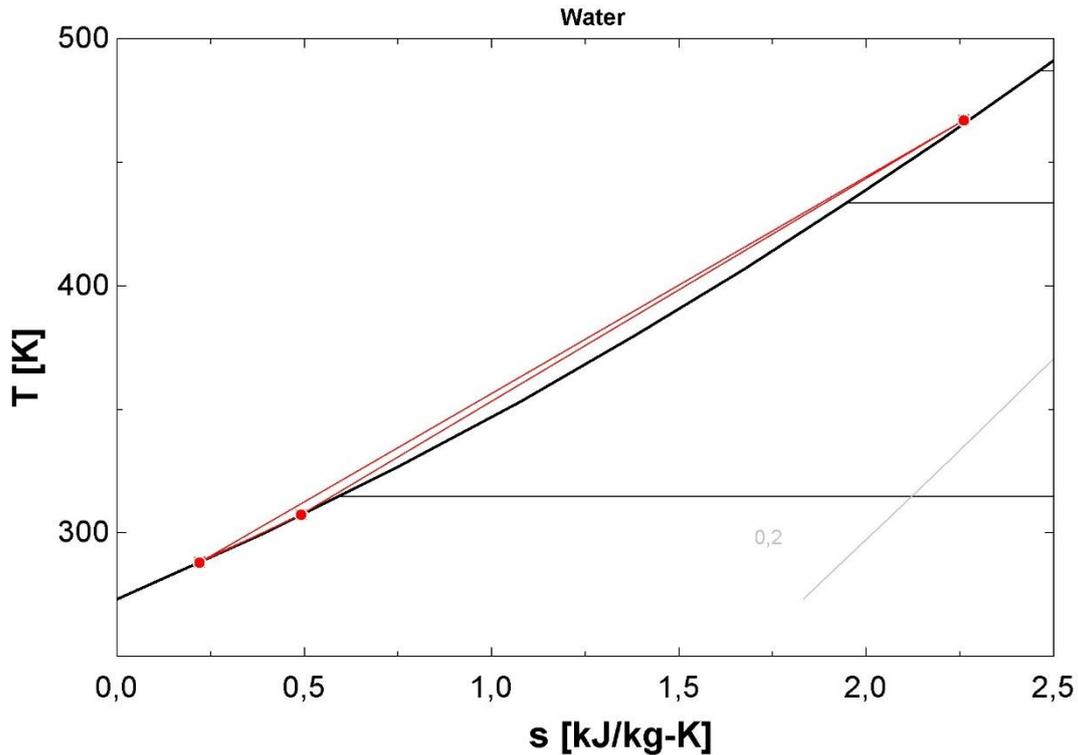


Ilustración 51: Diagrama T-s del agua caliente en la configuración alternativa con aporte térmico.

En la ilustración se aprecia como la carga se desarrolla de forma paralela. Desde el punto inicial (el de más a la izquierda), se calienta el agua hasta el estado del depósito secundario (punto intermedio) y hasta el estado del depósito principal (el de más a la derecha) en paralelo. En la descarga están conectados en serie, de forma que el agua caliente pasa desde el depósito principal al secundario y del secundario al estado inicial.

5.4.4 Temperaturas en el depósito de hielo

Al igual que en el caso anterior, la carga del depósito en dos etapas lleva asociada una temperatura intermedia del hielo, limitada por el primer intercambio de calor.

Este primer intercambio de calor, en este caso, se lleva a cabo en el evaporador de CO₂ en la carga, por lo que la temperatura que limita la temperatura intermedia del hielo es la de saturación del CO₂ a la presión de baja durante la carga.

En la **tabla 55** se muestra el estado intermedio del hielo con la nueva configuración (sombreado en verde) y en el ciclo básico con refrigeración adicional durante la carga.

Tabla 55: Estado intermedio en la carga del hielo.

Estado intermedio del hielo		CA,AP	CB,RA	Unidad
Temperatura del hielo al finalizar la carga	$T_{\text{hielo,intermedia}}$	251	254,6	K
Diferencia de temperatura mínima	$DT_{\text{carga,CO}_2,\text{frio}}$	4	0,25	K
Presión del hielo	P_{hielo}	100	100	bares

La presión de baja del CO₂ en el ciclo de carga es más baja, lo que hace que la temperatura del hielo intermedia sea menor. Además se determina una diferencia de

temperaturas de 4 K, dado que hay mayor margen en el rango de temperaturas. La diferencia mínima de 0,25 K del caso anterior puede no ser suficiente.

El segundo intercambio de calor se lleva a cabo en el evaporador de amoníaco, donde la temperatura de saturación del amoníaco a la presión de baja es la mínima a la que se aspira en la carga del hielo.

La **tabla 56** compara el estado final del hielo en la configuración alternativa, sombreado en verde, con el del hielo en el ciclo básico con refrigeración adicional durante la carga.

Tabla 56: Estado final en la carga del hielo.

Estado final del hielo		CA,AP	CB,RA	Unidad
Temperatura del hielo al finalizar la carga	$T_{\text{hielo,deposito,cargado}}$	243,6	251,3	K
Diferencia de temperatura mínima	$DT_{\text{NH}_3,\text{frio}}$	4	1	K
Presión del hielo	P_{hielo}	100	100	bares

La nueva presión de baja del amoníaco permite fijar una diferencia mínima de temperatura de 4 K, además de disminuir la temperatura del hielo casi 8 K, aumentando el incremento de temperaturas del hielo en el segundo intercambio un 124%.

En lo que respecta a la temperatura del hielo inicial ocurre como en el caso anterior. La máxima temperatura que puede alcanzar el hielo en el condensador del CO₂ en la descarga, es la de saturación del CO₂ a la presión de baja del ciclo de descarga.

En la **tabla 57** se muestra el nuevo estado inicial del hielo en la configuración alternativa (sombreado en verde) junto al estado inicial del hielo en el ciclo básico con refrigeración adicional durante la carga.

Tabla 57: Estado inicial en la carga del hielo.

Estado inicial del hielo		CA,AP	CB,RA	Unidad
Temperatura inicial del hielo en el depósito	$T_{\text{hielo,inicial}}$	255,7	254,7	K
Diferencia de temperatura mínima	$DT_{\text{descarga,frio}}$	4	0,25	K
Presión del hielo	P_{hielo}	100	100	bares

La nueva temperatura inicial es 1 K mayor que la anterior, además la diferencia de temperaturas mínima es de 4 K, a diferencia de la diferencia mínima en el ciclo básico con refrigeración adicional que era de 0,25 K. El incremento de temperatura del hielo en el primer intercambio aumenta desde los 0,1 K hasta los 4,7 K, aumentando en 47 veces.

En la **ilustración 52** se representa en un diagrama T-s los tres estados del hielo en la configuración alternativa.

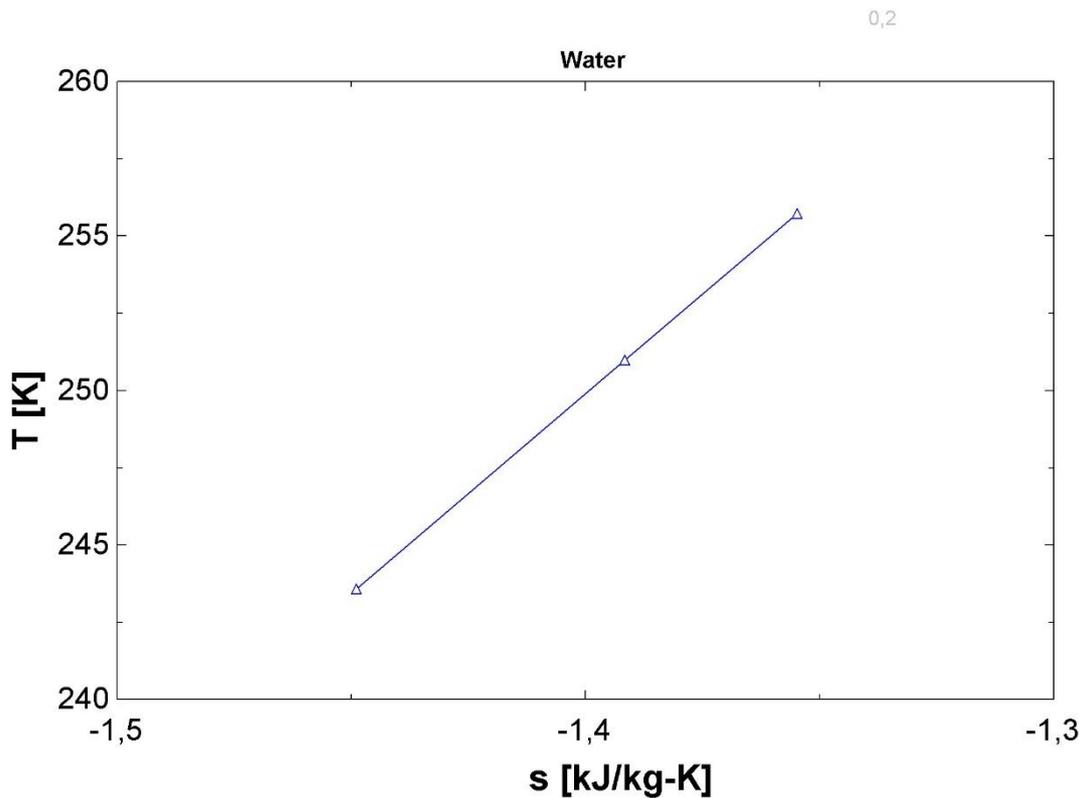


Ilustración 52: Diagrama T-s del hielo en la configuración alternativa con aporte térmico.

El diagrama muestra como la carga se realiza en dos etapas consecutivas, en las que el hielo pasa del estado inicial (punto más cercano a la esquina superior derecha) al intermedio (punto central) y del intermedio al estado final (punto más cercano a la esquina inferior izquierda). En la descarga, sin embargo, el hielo pasa del estado inicial al final en un único intercambio.

5.4.5 Diagramas T-s

En la **ilustración 53** se muestra el diagrama T-s del CO₂ en los ciclos de carga (naranja) y descarga (verde). En el ciclo de carga, el funcionamiento es similar al del ciclo básico con refrigeración adicional con amoníaco durante la carga. Tiene una diferencia que se encuentra en el tramo de evolución a presión de alta constante, entre la salida del compresor y la entrada a la turbina hidráulica.

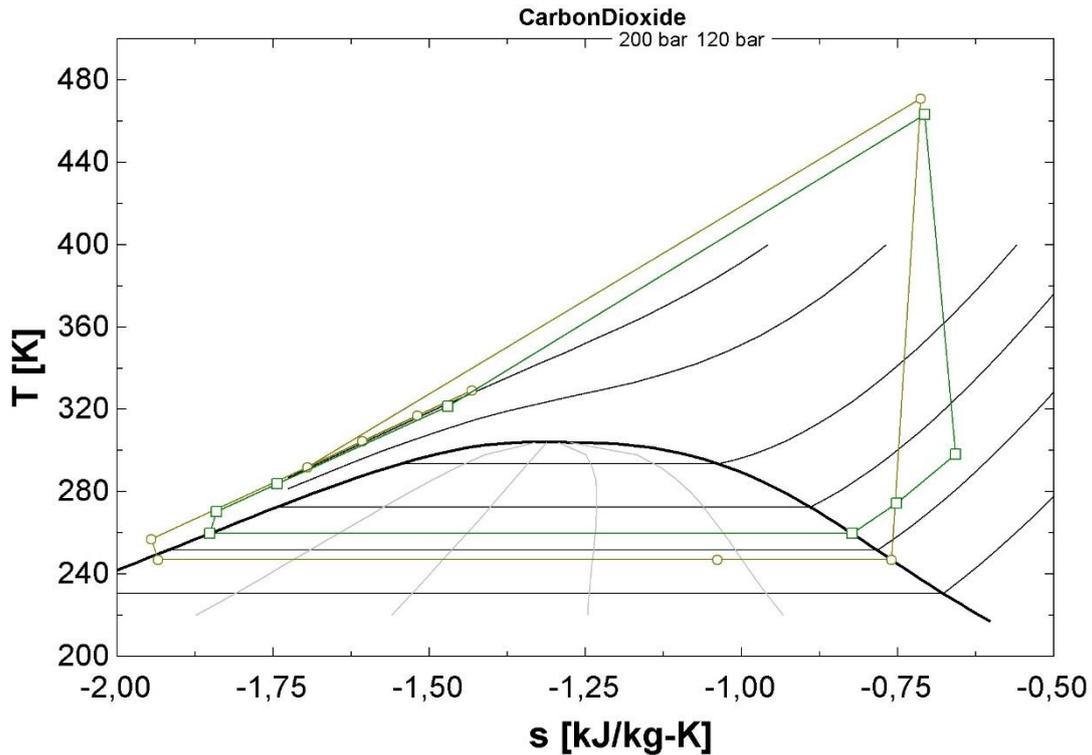


Ilustración 53: Diagrama T-s de los ciclos de CO₂ de carga y descarga en la configuración alternativa con aporte térmico.

Mientras que en el ciclo anterior el enfriamiento se llevaba a cabo en dos intercambios consecutivos con dos depósitos de agua caliente que se encontraban conectados en serie, en esta nueva configuración los depósitos de agua en la carga se encuentran conectados en paralelo, de forma que el CO₂ cede todo el calor posible al depósito de agua caliente principal, se recalienta mediante el intercambio con el amoníaco y vuelve a ceder todo el calor posible al depósito de agua caliente secundario, antes de entrar en la regeneración.

El ciclo de descarga no tiene ninguna novedad destacable en su funcionamiento. El único fenómeno que puede tener algo más de importancia es la temperatura intermedia del CO₂ en la descarga de los depósitos de agua caliente, que es más baja. Este es un efecto derivado del nuevo papel asignado al depósito secundario, que recoge el calor que se puede aprovechar del recalentamiento.

En la **ilustración 54** se representa el diagrama T-s del NH₃. La forma del ciclo es la misma que la del ciclo de amoníaco en la refrigeración adicional del ciclo básico, sin embargo, incorpora un cambio en el condensador, donde se produce el recalentamiento.

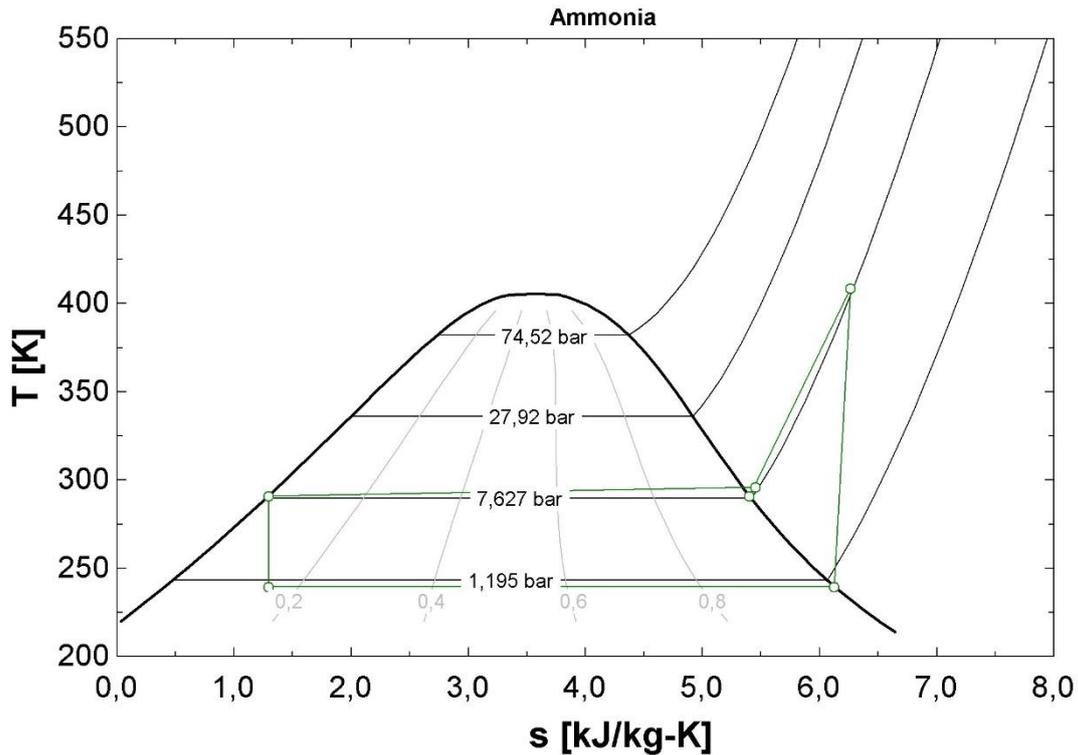


Ilustración 54: Diagrama T-s del ciclo de amoníaco con la configuración alternativa y aporte térmico.

En la salida del compresor, se produce el intercambio de calor con el CO₂ que sale del intercambio con el depósito principal. El amoníaco se enfría a presión constante, hasta llegar al punto intermedio en el enfriamiento, cercano a la línea de vapor saturado, que representa la salida del intercambio. El resto de calor se evacúa mediante air-cooling, hasta que el amoníaco condensa completamente.

5.5 Modos de funcionamiento

5.5.1 Ciclo de carga eléctrico

El ciclo eléctrico, se basa en el funcionamiento del ciclo básico, cargando los depósitos de agua caliente y hielo mediante el aporte de electricidad. Este ciclo entrará en funcionamiento durante el tiempo en el que la electricidad tienen un bajo coste y no hay aporte solar térmico disponible, de manera que la parte del sistema que corresponde con la central térmica está apagada.

En la **ilustración 55** se representa la configuración de la planta cuando este ciclo está funcionando, de forma que se han resaltado los equipos que están en funcionamiento. Sombreado en naranja se halla el ciclo de CO₂ y en amarillo el de amoníaco. El depósito de agua caliente descargado se representa con un naranja intenso, mientras que el depósito cargado lo hace en rojo. Los depósitos de hielo están sombreados en azul, estando el depósito cargado en un azul más intenso.

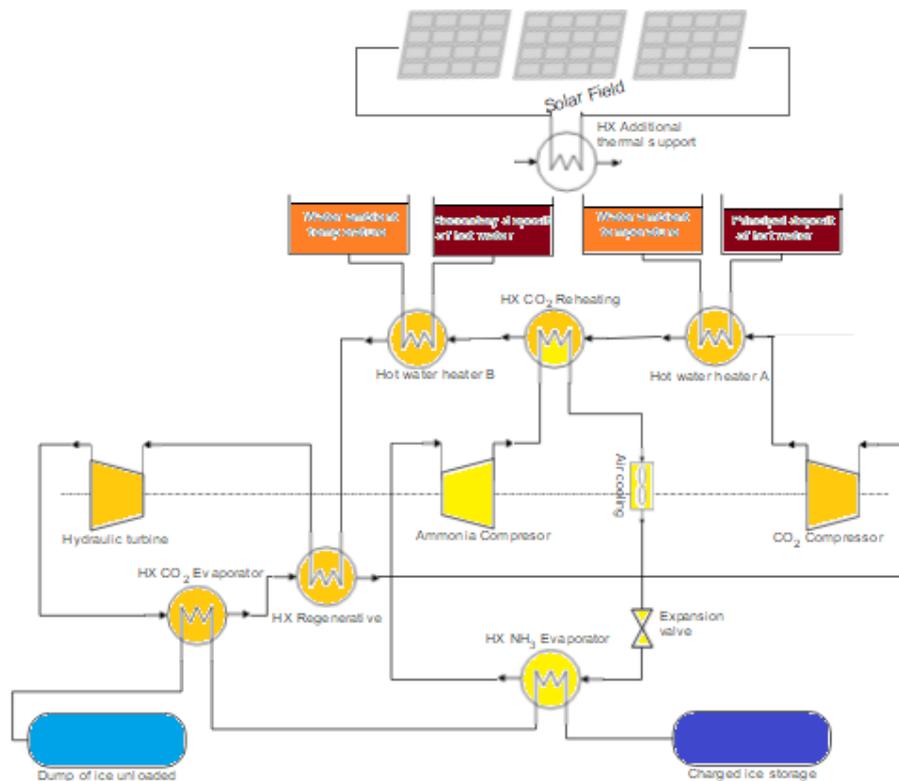


Ilustración 55: Esquema del ciclo de carga eléctrico.

La parte que corresponde con el aporte térmico no se encuentra en funcionamiento, y por lo tanto no se ha resaltado en este esquema. El intercambiador de calor ni siquiera se ha conectado.

5.5.2 Ciclo de carga térmico

El ciclo térmico consiste en la carga de los depósitos de agua caliente a través del aporte térmico de la central termosolar. Cuando opera en solitario, sin que el ciclo eléctrico se ponga en funcionamiento, no se produce el recalentamiento por el amoníaco, dado que el ciclo de amoníaco pertenece al ciclo eléctrico. Esto produce que solo se cargue el depósito primario, lo que sería un problema si los gastos de carga y descarga estuviesen equilibrados.

El ciclo térmico en solitario se pondrá en funcionamiento cuando el recurso solar esté disponible y la electricidad tenga un coste elevado.

En la **ilustración 56** se representa la configuración del ciclo de carga térmico de la planta, de manera que se ha resaltado la parte que se encuentra en funcionamiento. El ciclo de CO₂ térmico se muestra en color marrón, mientras que el depósito de agua caliente cargado está sombreado en rojo intenso. El depósito de agua inicial se indica con el color naranja.

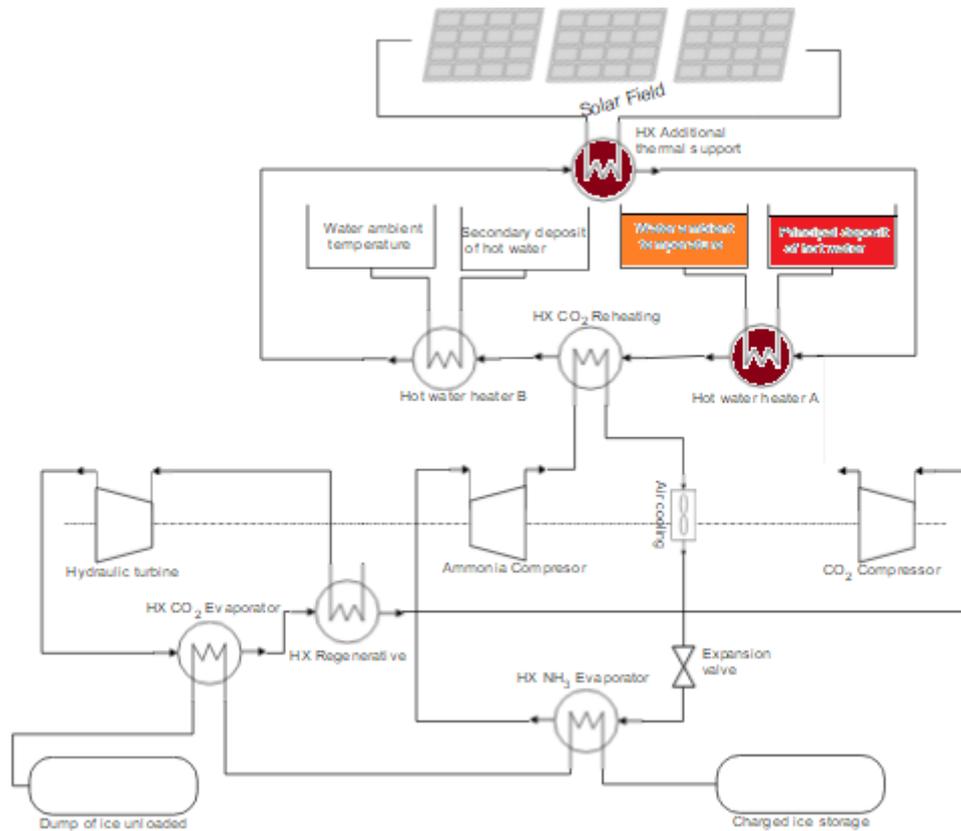


Ilustración 56: Esquema del ciclo de carga térmico.

El tren de intercambiadores de carga de agua caliente se encuentra conectado a la central termosolar. Se puede apreciar que tanto el compresor como el intercambiador regenerativo están desconectados.

Dado que la configuración en la carga de los depósitos de agua caliente es distinta a la de descarga, se producirán desequilibrios en la descarga de los depósitos, desequilibrios que pueden ser compensados, en la medida de lo posible, con la ausencia de carga del depósito secundario por el ciclo térmico.

5.5.3 Ambos ciclos a la vez

Es posible combinar el ciclo eléctrico y el ciclo térmico, de modo que trabajen al mismo tiempo. Ambos ciclos tienen una parte común, la rama de CO_2 que entra en contacto con el depósito de agua caliente primario, el recalentamiento con el NH_3 y el depósito de agua caliente secundario, en ese orden.

Ambos ciclos estarán funcionando al mismo tiempo cuando el recurso solar esté disponible y además el precio de la electricidad sea bajo.

En la **figura 57** se representa la planta cuando el ciclo térmico y el eléctrico trabajan a la vez. Hay que destacar que por el tren de intercambiadores de carga del agua caliente pasa tanto el gasto de CO_2 del ciclo térmico como el gasto de CO_2 del ciclo eléctrico, mientras que por los intercambiadores con los depósitos de hielo solo pasa el gasto de CO_2 del ciclo eléctrico.

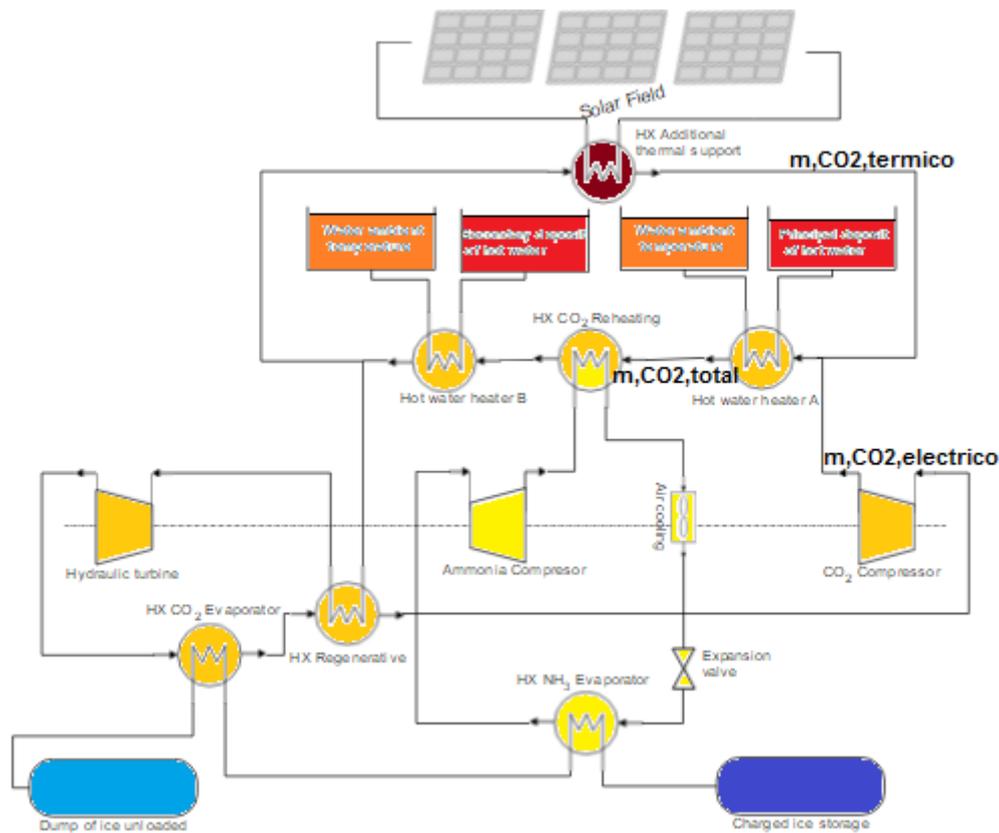


Ilustración 57: Esquema de la carga del ciclo conjunto.

De modo que considerando un gasto unitario de CO₂ en cada ciclo (1 kg/s), tendremos la suma de ambos en la rama que comparten, aumentando de forma proporcional el gasto de agua caliente de ambos depósitos en la carga.

5.5.4 Carga del depósito de hielo mediante el ciclo de NH₃

Con el aporte térmico por parte de la central termosolar, se produce una carga extra en los depósitos de agua caliente, pero no en el depósito de hielo. Al no cargar el depósito de hielo mientras se siguen cargando los de agua caliente pueden producirse desequilibrios en la descarga.

El depósito de hielo puede quedarse vacío antes que los de agua caliente, limitando el tiempo de descarga y provocando la pérdida de energía asociada al agua caliente disponible.

Este desajuste se puede equilibrar llevando a cabo una carga extra del depósito de hielo mientras se produce la propia descarga. Dado que el ciclo de amoníaco solo se utiliza durante el ciclo de carga eléctrico, éste se puede poner en funcionamiento en periodos de inactividad, realizando una carga del depósito de hielo en una única etapa, de forma que el tiempo de descarga disponible de hielo y de agua caliente del depósito primario sea el mismo y ambos depósitos queden descargados al mismo tiempo.

En la **ilustración 58** se muestra un esquema de la planta cuando solo se realiza la carga del depósito de hielo mediante el ciclo de amoníaco.

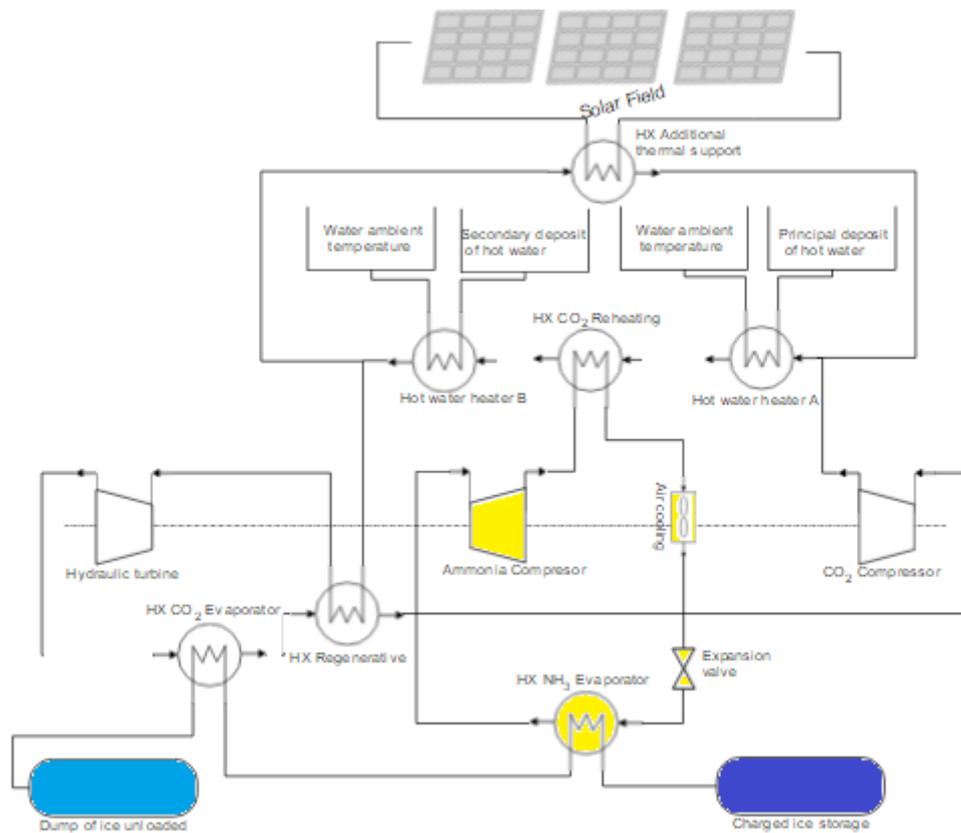


Ilustración 58: Esquema de la carga extra del depósito de hielo.

El primer intercambio del hielo no se realiza, pues el ciclo de carga eléctrico no está operativo, al igual que el recalentamiento. Todo el calor de condensación del amoníaco se retira del sistema mediante air-cooling, y la carga del hielo se realiza completamente con el intercambio con el amoníaco.

Esta es una de las ventajas de la nueva configuración, pues si el intercambio con el amoníaco tuviese lugar en primer lugar, no sería posible alcanzar la temperatura del hielo cuando el depósito está cargado.

5.5.5 Ciclo de descarga

El ciclo de descarga es el mismo que en los casos anteriores. El CO₂ se carga mediante los depósitos de agua caliente de forma consecutiva, entrando en la turbina a la temperatura más alta posible. Tras la expansión, se produce un intercambio con la salida de la bomba (regeneración) para precalentar el CO₂, para después entrar en el condensador donde cede calor al depósito de hielo.

El ciclo de descarga se pone en funcionamiento cuando el precio de la electricidad es alto. Hay que mencionar la posible compatibilidad del ciclo de descarga con el ciclo de carga térmico, pues este no depende del precio de la electricidad y los equipos no entran en conflicto.

En la **ilustración 59** se representa el esquema de la planta en el ciclo de descarga, en el que se muestra en verde el ciclo de CO₂, en azul los depósitos de hielo siendo más intenso el depósito cargado, y en rojo los depósitos de agua caliente principal y secundario, con el depósito inicial en naranja.

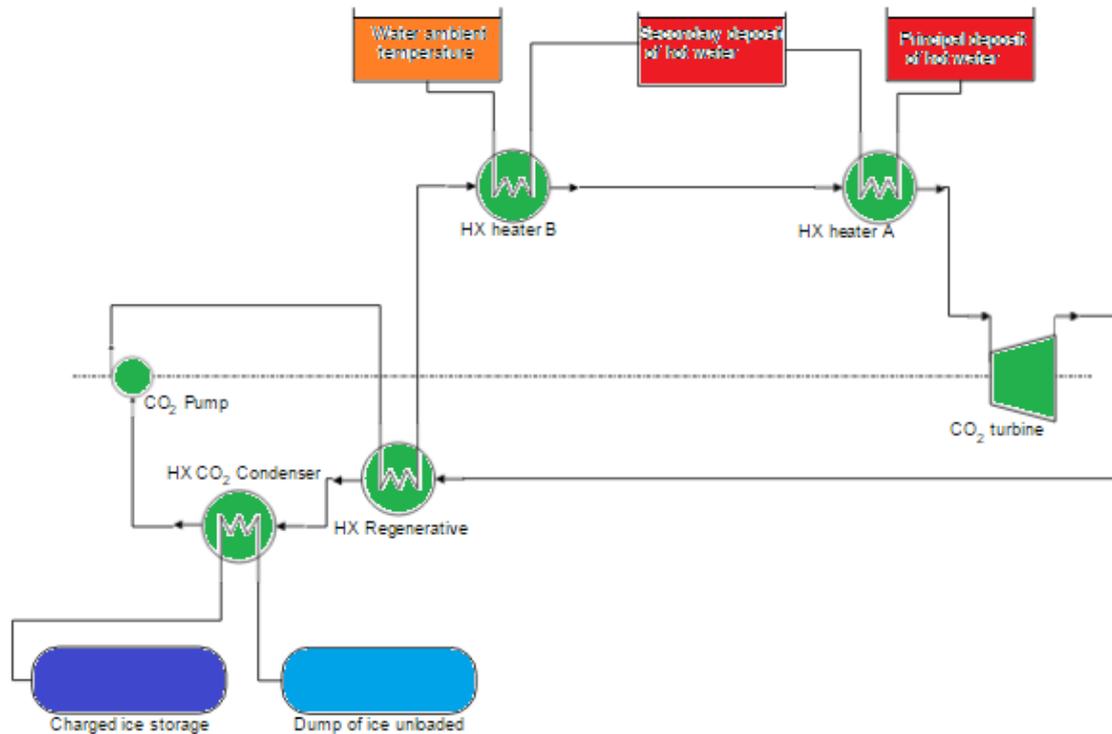


Ilustración 59: Esquema del ciclo de descarga

La descarga de los depósitos de agua caliente se realiza de forma consecutiva, de modo que el agua caliente del depósito principal que sale del intercambio se inyecta en el depósito secundario. Esto producirá que si el gasto másico del agua caliente en el intercambio entre el depósito secundario y el CO₂ no es lo suficientemente alto, el depósito no quedará vacío cuando se hagan el depósito principal de agua caliente y el de hielo. Este exceso servirá para compensar la ausencia de carga del depósito secundario por parte del ciclo térmico o se desechará cuando sea conveniente.

5.6 Balance de energía

5.6.1 Carga del depósito principal de agua caliente

A diferencia de la carga del depósito principal en el ciclo anterior (refrigeración adicional durante la carga), donde el CO₂ se enfriaba hasta una temperatura intermedia, en la configuración alternativa el CO₂ cede todo el calor posible al agua que entra a temperatura ambiente.

Se busca el intercambio de calor óptimo: la temperatura de salida del agua caliente es la de entrada del CO₂ menos la diferencia mínima de temperaturas (**ecuación 15**), mientras que en el otro extremo del intercambiador, la temperatura de salida del CO₂ es la del agua en la entrada más la diferencia mínima de temperaturas (**ecuación 16**). Las líneas del diagrama T-Q (**figura 53**) son paralelas, y el gasto de agua caliente es el óptimo.

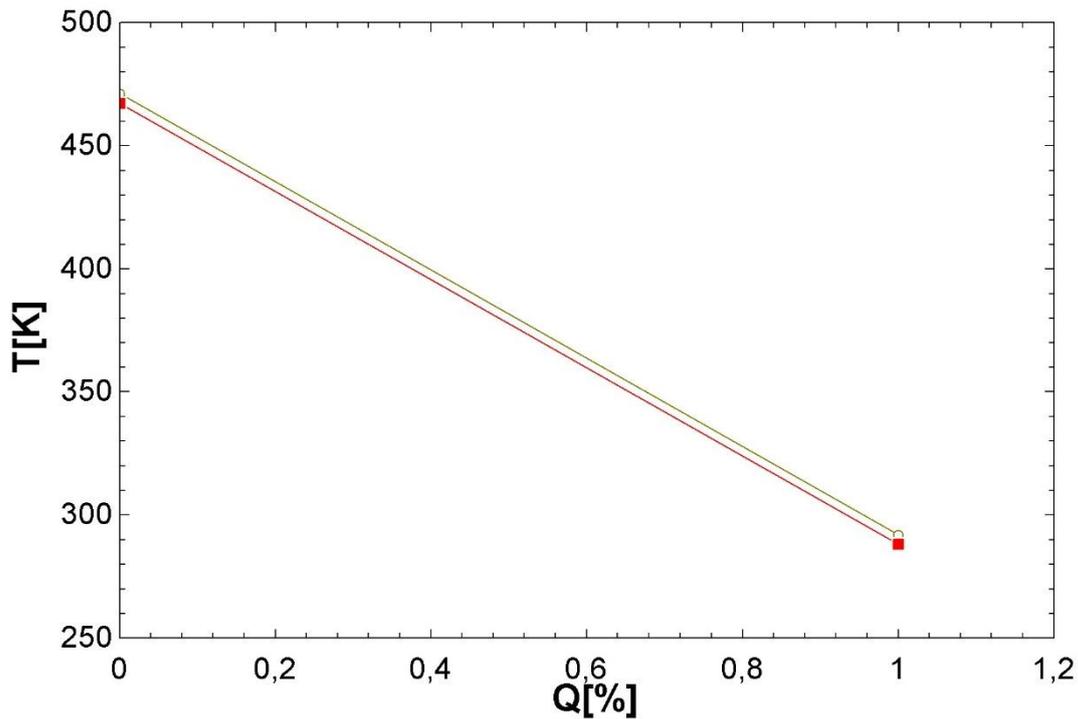


Ilustración 60: Diagrama T-Q de la carga del depósito principal de agua caliente con la configuración alternativa con aporte térmico.

La nueva presión del CO₂ es 21,3 bares superior a la anterior, lo que conlleva una temperatura de salida del compresor 17,2 K más alta, que conservando la diferencia mínima de temperaturas supone el mismo incremento en la temperatura de almacenamiento en el depósito de agua caliente.

Tabla 58: Parámetros en la carga del depósito principal de agua caliente en la configuración alternativa con aporte térmico.

Parámetros		CA,AP	CB,RA	Unidad
Presión del agua caliente	$P_{\text{agua, caliente}}$	100	100	Bares
Presión del CO ₂	$P_{\text{alta, CO}_2, \text{carga}}$	210	188,7	bares
Gasto másico del dióxido de carbono	$m_{\text{CO}_2 \text{carga}}$	1	1	kg/s
Temperatura de entrada del CO ₂	$T_{\text{out, compresor, CO}_2, \text{carga}}$	471,1	453,9	K
Diferencia de temperatura mínima	DT_{min}	4	4	K
Temperatura de salida del agua caliente	$T_{\text{H}_2\text{O, deposito, A, cargado}}$	467,1	449,9	K
Temperatura de entrada del agua caliente	$T_{\text{H}_2\text{O, inicial}}$	288	369	K
Temperatura de salida del CO ₂	$T_{\text{in, recalentamiento, CO}_2, \text{carga}}$	292	373	K

La nueva temperatura de salida del CO₂ es muy inferior a la del ciclo anterior, provocado por el cambio de papel del depósito secundario. El agua entra ahora en el intercambio con el depósito principal y el secundario desde el mismo estado, el inicial. El CO₂ de salida también juega un papel distinto, pues mientras antes seguía cediendo calor al depósito secundario, ahora entra en un recalentamiento previo a la segunda cesión de calor.

El incremento de temperaturas en el CO₂ y en el agua es de casi 179,1 K, por los 80,9 K del caso anterior.

Para un el gasto de CO₂ unitario (se considera de 1 kg/s), se obtiene el gasto de agua caliente del depósito primario por kg de CO₂ que hace óptimo el intercambio (**ecuación 6**).

El calor intercambiado queda determinado con la **ecuación 5** y la eficiencia mediante el **código 2**.

Tabla 59: Resultados de la carga del depósito principal de agua caliente en la configuración alternativa con aporte térmico.

Resultados		CA,AP	CB,RA	Unidad
Calor total intercambiado	$Q_{\text{real,carga,agua,caliente,A}}$	360,6	142	kJ/kg
Gasto másico de agua caliente	$m_{\text{H}_2\text{O,A,carga}}$	0,4762	0,4119	kg/s
Calor máximo	$Q_{\text{max,carga,agua,caliente,A}}$	385,8	143,4	kJ/kg
Eficiencia	$\epsilon_{\text{carga,agua,caliente,A}}$	0,9347	0,9902	

Con un aumento del incremento de temperaturas del 121,38%, el calor almacenado en el depósito principal aumenta en un 153,94%, pues el gasto másico de agua caliente del depósito principal que hace óptimo el intercambio también aumenta en un 15,61%.

5.6.2 Recalentamiento

En este intercambio, se va a aprovechar, en la medida de lo posible, la energía del amoníaco al salir del compresor para calentar el CO₂ que sale de la carga del depósito principal de agua caliente.

Dependiendo de la presión de alta del amoníaco se pueden dar tres casos:

- La temperatura de saturación del amoníaco es mayor que la de entrada de CO₂ y puede tener lugar el cambio de estado del amoníaco. El amoníaco cede calor al CO₂, disminuyendo su temperatura hasta alcanzar el punto de saturación. En este punto se tiene la mínima diferencia de temperaturas en el intercambio. El amoníaco continúa cediendo calor al CO₂, condensando total o parcialmente. En el caso de que condense solo parcialmente, la condensación se completa cediendo calor al ambiente.
- La temperatura de entrada del amoníaco es mayor que la del CO₂ pero la de saturación no lo es. Se produce un intercambio de calor sin cambio de estado en ninguno de los fluidos. La diferencia de temperatura mínima en el intercambio se produce en el extremo de salida del CO₂ y de entrada del amoníaco.
- La temperatura de entrada del amoníaco es inferior a la del CO₂. En este caso, la corriente de amoníaco que debería ceder calor a la del CO₂ actúa como foco frío, por lo que no tiene sentido llevar a cabo el intercambio. La condensación del amoníaco se lleva a cabo completamente cediendo calor al ambiente. El CO₂ permanece en las mismas condiciones y no se produce la carga posterior del depósito secundario de agua caliente.

Tabla 60: Parámetros en el recalentamiento de la configuración alternativa con aporte térmico.

Parámetros		Valor	Unidad
Gasto másico de CO ₂	$m_{\text{CO}_2,\text{total},\text{carga}}$	1	kg/s
Gasto másico de amoníaco	m_{NH_3}	0,2906	kg/s
Presión del CO ₂	$P_{\text{alta},\text{CO}_2,\text{carga}}$	210	bares
Presión del amoníaco	$P_{\text{alta},\text{NH}_3}$	8	bares
Temperatura de entrada del CO ₂	$T_{\text{in},\text{recalentamiento},\text{CO}_2,\text{carga}}$	292	K
Temperatura de entrada del amoníaco	$T_{\text{out},\text{compresor},\text{NH}_3}$	408,7	K
Diferencia de temperatura mínima	DT_{min}	4	K

En este caso, la temperatura de entrada del CO₂ es menor que la de entrada del amoníaco, por lo que sí habrá recalentamiento. Además, la temperatura de entrada del CO₂ es mayor que la de saturación del NH₃ a la nueva presión de alta de 8 bares, por lo que el amoníaco no cambia de estado durante el intercambio.

Tanto el gasto de amoníaco como el de CO₂ están definidos, así como las condiciones de entrada de ambos. Mediante la **ecuación 16**, se sitúa la diferencia mínima de temperaturas y las condiciones de salida del amoníaco.

En la **ilustración 61** se representa el diagrama T-Q del recalentamiento. El enfriamiento del amoníaco se representa con la línea superior amarilla, mientras que la línea inferior corresponde con el recalentamiento del CO₂.

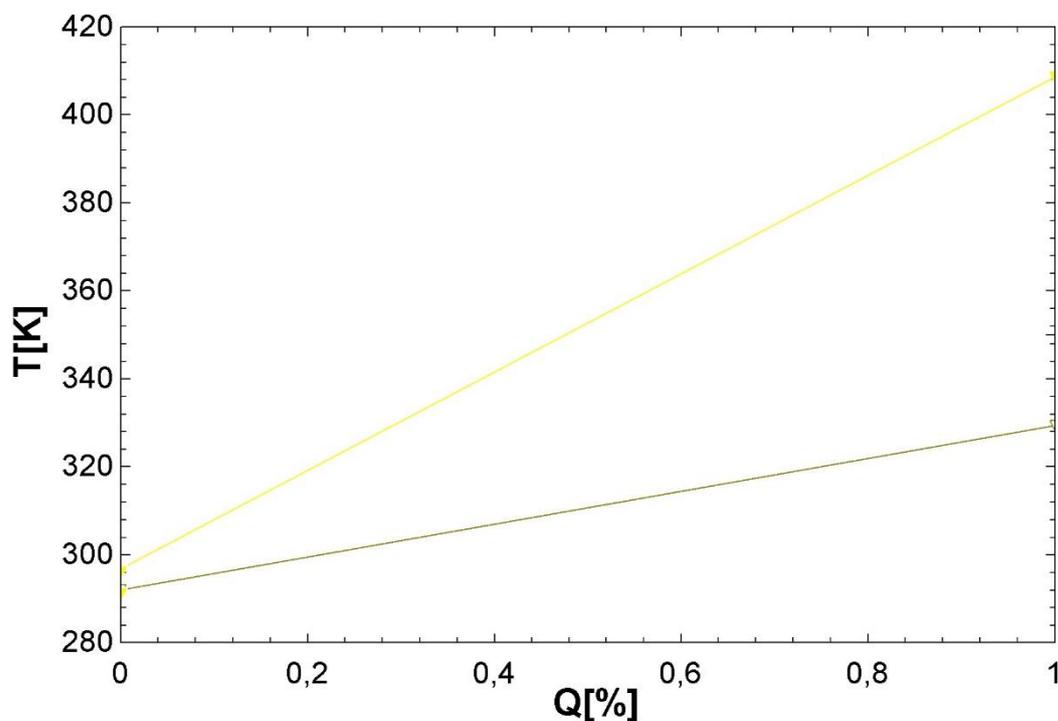


Ilustración 61: Diagrama T-Q del recalentamiento durante el ciclo de carga con la configuración alternativa y aporte térmico.

El calor intercambiado y la salida del CO₂ se determinan con las ecuaciones del calor, **ecuaciones 5 y 6**, respectivamente, y la eficiencia mediante el **código 2**.

Tabla 61: Resultados en el recalentamiento de la configuración alternativa con aporte térmico.

Resultados		Valor	Unidad
Temperatura de salida del CO ₂	$T_{out,recal,CO_2,carga}$	329,4	K
Temperatura de salida del amoníaco	$T_{out,recal,NH_3}$	296	K
Calor total	$Q_{real,recalentamiento}$	81,95	kJ/kg
Calor máximo	$Q_{max,recalentamiento}$	160,3	kJ/kg
Eficiencia	$\epsilon_{recalentamiento}$	0,5113	

El resultado de este intercambio es una corriente de CO₂ con una temperatura de 329,4 K, un incremento de temperatura de 37,4 K que suponen un calor disponible de 81,95 kJ/kg, que se van a aprovechar en la carga del depósito secundario de agua caliente.

5.6.3 Carga del depósito agua caliente secundario

El intercambio de calor es igual que en el depósito principal (depósito A). La única diferencia será la temperatura de entrada del CO₂, que no es la de salida del compresor, sino que es la de salida del recalentamiento con el ciclo de amoníaco.

Tabla 62: Parámetros de la descarga del depósito secundario de agua caliente en la configuración alternativa con aporte térmico.

Parámetros		CA,AP	CB,RA	Unidad
Presión del agua caliente	$P_{agua,caliente}$	100	100	Bares
Presión del CO ₂	$P_{alta,CO_2,carga}$	210	188,7	bares
Gasto másico del dióxido de carbono	$m_{CO_2,carga}$	1	1	kg/s
Temperatura de entrada del CO ₂	$T_{out,recal.CO_2,carga}$	329,4	373	K
Diferencia de temperatura mínima	DT_{min}	4	4	K
Temperatura de salida del agua caliente	$T_{H_2O,deposito,B,cargado}$	325,4	369	K
Temperatura de salida del CO ₂	$T_{out,CO_2,carga,caliente}$	292	292	K
Temperatura de entrada del agua caliente	$T_{H_2O,inicial}$	288	288	K

La temperatura de entrada del CO₂ es la de salida del recalentamiento, 43,6 K por debajo de la temperatura intermedia del CO₂ en la carga del ciclo básico con refrigeración adicional durante la carga, y por consiguiente, lo mismo ocurre con la temperatura de almacenamiento del agua en el depósito secundario.

El estado de entrada del agua caliente si es el mismo, el inicial, al igual que la salida del CO₂, pues depende de la entrada del agua si se mantiene la diferencia mínima de temperaturas.

Con la diferencia mínima de temperaturas en ambos extremos del intercambio, las líneas del perfil de temperaturas en el diagrama T-Q (**ilustración 62**) son paralelas, y el gasto de agua caliente será el óptimo.

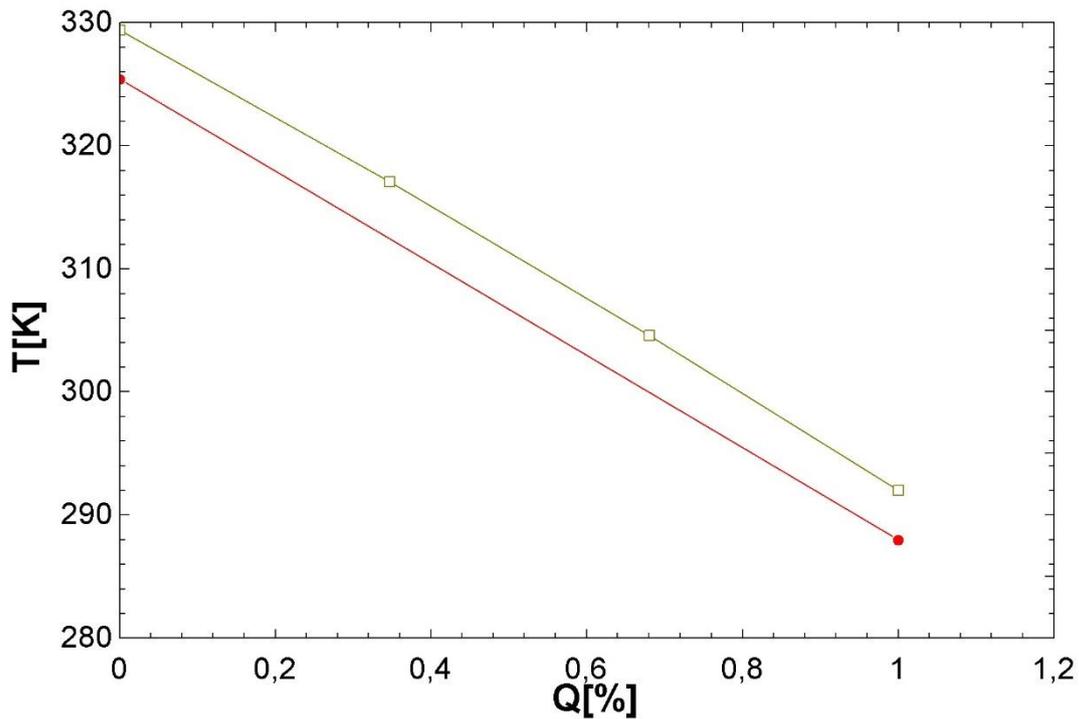


Ilustración 62: Diagrama T-Q de la carga del depósito secundario de agua caliente con la configuración alternativa y aporte térmico.

El calor intercambiado y la eficiencia quedan definidos mediante la **ecuación 5** y el **código 2**, respectivamente. Para un gasto de CO₂ unitario (se considera de 1 kg/s), se obtiene el gasto de agua caliente del depósito secundario que hace óptimo el intercambio mediante la **ecuación 6**.

Tabla 63: Resultados de la descarga del depósito secundario de agua caliente en la configuración alternativa con aporte térmico.

Resultados		CA,AP	CB,RA	Unidad
Calor total intercambiado	$Q_{\text{real,carga,agua,caliente,B}}$	81,95	200,6	kJ/kg
Gasto másico de agua caliente	$m_{\text{H}_2\text{O,B,carga}}$	0,5272	0,595	kg/s
Calor máximo	$Q_{\text{max,carga,agua,caliente,B}}$	90,38	211,9	kJ/kg
Eficiencia	$\epsilon_{\text{carga,agua,caliente,B}}$	0,9067	0,9466	

El calor almacenado en el depósito secundario es de 81,95 kJ/kg, aprovechando completamente el calor recogido del recalentamiento, aunque comparándolo con el almacenado en el caso anterior, disminuye un 59,14%. Esto tiene su origen en el cambio de disposición de la carga, realizándola en paralelo.

En la **tabla 64** se compara la carga de los depósitos de agua caliente en la configuración alternativa (sombreado en verde) y en el ciclo básico con refrigeración adicional durante la carga (sombreado en amarillo).

Tabla 64: Comparativa del calor intercambiado en los depósitos de agua caliente.

Resultados		CA,AP	CB,RA	Unidad
Calor total intercambiado	$Q_{\text{real,carga,agua,caliente,A}}$	360,6	142	kJ/kg
Gasto másico de agua caliente	$m_{\text{H}_2\text{O,A,carga}}$	0,4762	0,4119	kg/s
Calor total intercambiado	$Q_{\text{real,carga,agua,caliente,B}}$	81,95	200,6	kJ/kg
Gasto másico de agua caliente	$m_{\text{H}_2\text{O,B,carga}}$	0,5272	0,595	kg/s
Calor total intercambiado	$Q_{\text{total,carga,agua,caliente}}$	442,55	342,6	kJ/kg

El calor almacenado en el depósito principal de agua caliente de la configuración alternativa es del mismo orden que el calor total almacenado en el ciclo anterior. Es lo esperado cuando el salto de temperaturas es el mismo añadiendo el incremento proporcionado por el aumento de la presión alta de carga, lo que hace que sea un 5,25% mayor.

Además el incremento es del 29,17% si añadimos el almacenamiento del depósito secundario.

5.6.4 Regeneración en la carga

La regeneración, al igual que en el caso anterior, se desarrolla la de salida de la carga del depósito B (lado caliente) y la de salida de la carga del hielo (lado frío).

El intercambio es equivalente al del ciclo básico con refrigeración adicional durante la carga, con diferentes temperaturas derivadas del cambio de presiones.

Tabla 65: Parámetros en la regeneración en la carga de la configuración alternativa con aporte térmico.

Parámetros		CA,AP	CB,RA	Unidad
Gasto másico de la corriente caliente	$m_{\text{CO}_2,\text{carga}}$	1	1	kg/s
Gasto másico de la corriente fría	$m_{\text{CO}_2,\text{carga}}$	1	1	kg/s
Presión del CO ₂ del lado caliente	$P_{\text{alta,CO}_2,\text{carga}}$	210	188,7	Bares
Presión del CO ₂ del lado frío	$P_{\text{baja,CO}_2,\text{carga}}$	16,2	18	Bares
Temperatura de entrada del lado caliente	$T_{\text{out,CO}_2,\text{carga,caliente}}$	292	292	K
Temperatura de salida del lado frío	$T_{\text{in,compresor,CO}_2,\text{carga}}$	247	250,3	K
Diferencia de temperatura mínima	DT_{min}	10	10	K
Temperatura de salida del lado caliente	$T_{\text{in,hidráulica,CO}_2,\text{carga}}$	257	260,3	K

La temperatura del lado frío, constante en todo el intercambio de calor, disminuye desde 250,3 hasta 247 K, al reducir la presión de baja en la carga 1,8 bares. Conservando la diferencia de temperaturas mínima en la salida del lado caliente (**ecuación 15**), la temperatura de salida del lado caliente se reduce en la misma cantidad.

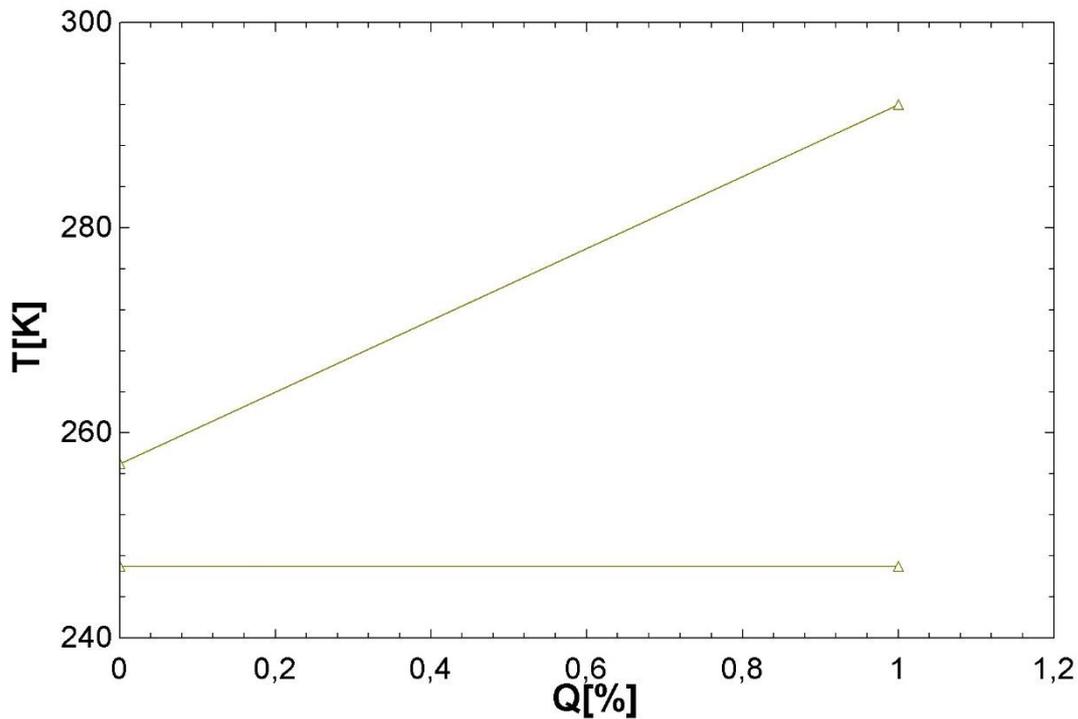


Ilustración 63: Diagrama T-Q de la regeneración durante el ciclo de carga con la configuración alternativa y aporte térmico.

Con la **ecuación 5** se determina el calor intercambiado en la regeneración, y mediante la **ecuación 6** se determina la entalpía de entrada del lado frío. Calculando su temperatura se comprueba que se encuentra dentro de la campana de saturación. Para dar más información se da el valor del título de este punto.

La eficiencia queda determinada a partir del **código 2**.

Tabla 66: Resultados de la regeneración en la carga de la configuración alternativa con aporte térmico.

Resultados		CA,AP	CB,RA	Unidad
Calor real intercambiado	$Q_{\text{real,regenerativo,carga}}$	68,75	63,56	kJ/kg
Temperatura de entrada del lado frío	$T_{\text{intermedia,evaporador,CO2,carga}}$	247	250,3	K
Título de la entrada del lado frío	$X_{\text{intermedia,evaporador,CO2,carga}}$	0,7675	0,7799	
Calor máximo	$Q_{\text{max,regenerativo,carga}}$	115,6	108,3	kJ/kg
Eficiencia	$\epsilon_{\text{regenerativo,carga}}$	0,5946	0,5867	

El calor intercambiado aumenta un 8,16%. Desde el punto de vista del lado frío, este aumento del calor intercambiado, supone mayor parte de la evaporación que cae del lado de la regeneración, lo que contribuye en el descenso del título de vapor en la entrada. Por otra parte, con el descenso de la presión baja de carga, aumenta el calor de condensación total necesario, que empuja positivamente en el aumento del título.

El balance de estos dos efectos opuestos es de un pequeño descenso del título de vapor, menor a dos puntos.

5.6.5 Carga del foco frío

La carga del hielo se realiza en dos pasos: primero un enfriamiento por el CO₂ del ciclo de carga y segundo un enfriamiento con el ciclo de NH₃.

En el primer intercambio, las condiciones de entrada del CO₂ son las de salida de la turbina hidráulica, y las de salida son las de entrada en la regeneración. Con el gasto de CO₂, el calor intercambiado en la primera etapa del enfriamiento del hielo queda determinado.

En esta configuración el intercambio con el CO₂, se realiza primero, de forma que las condiciones de entrada del hielo en el intercambio con el CO₂ son las iniciales y las de salida las condiciones intermedias, a diferencia que en la configuración del ciclo anterior, donde eran las condiciones intermedias y las finales, respectivamente.

Tabla 67: Parámetros en el intercambio hielo-CO₂ en la carga de la configuración alternativa con aporte térmico.

Parámetros		CA,AP	CB,RA	Unidad
Presión del CO ₂	P _{baja,CO2,carga}	16,2	18	bares
Presión del hielo	P _{hielo}	100	100	bares
Gasto másico del dióxido de carbono	m _{CO2,carga}	1	1	kg/s
Temperatura de entrada del CO ₂	T _{out,hidraulica,CO2,carga}	247	250,3	K
Temperatura de salida del CO ₂	T _{intermedia,evaporador,CO2,carga}	247	250,3	K
Incremento de entalpía del CO ₂	Δh _{CO2}	221,3	218,9	kJ/kg
Diferencia de temperatura mínima	DT _{min}	4	1	K
Temperatura intermedia del hielo	T _{hielo,intermedia}	251	251,3	K
Temperatura de entrada del hielo	T _{hielo,inicial}	255,7	254,6	K

Las nuevas presiones de baja en el ciclo de carga y descarga de CO₂, proporcionan mayor margen de maniobra en las temperaturas del hielo, permitiendo fijar una diferencia mínima de temperatura de 4 K, por 1 K de diferencia que era necesario imponer en el ciclo básico con refrigeración adicional durante la carga.

La diferencia mínima en la carga se refleja en la temperatura de salida del hielo, temperatura intermedia, 3 K menor que en el caso anterior.

El incremento de entalpía en la evaporación del CO₂ es 1,09% mayor que el anterior, una pequeña subida propiciada por el descenso de la presión baja de carga del CO₂, que supone una mayor distancia entre el punto de líquido y vapor saturado.

La **figura 63** muestra el diagrama T-Q de la carga del hielo por parte del CO₂. Donde el perfil de temperaturas del hielo se representa como una recta descendente en azul y la evaporación del CO₂ como una línea sin pendiente por el cambio de fase.

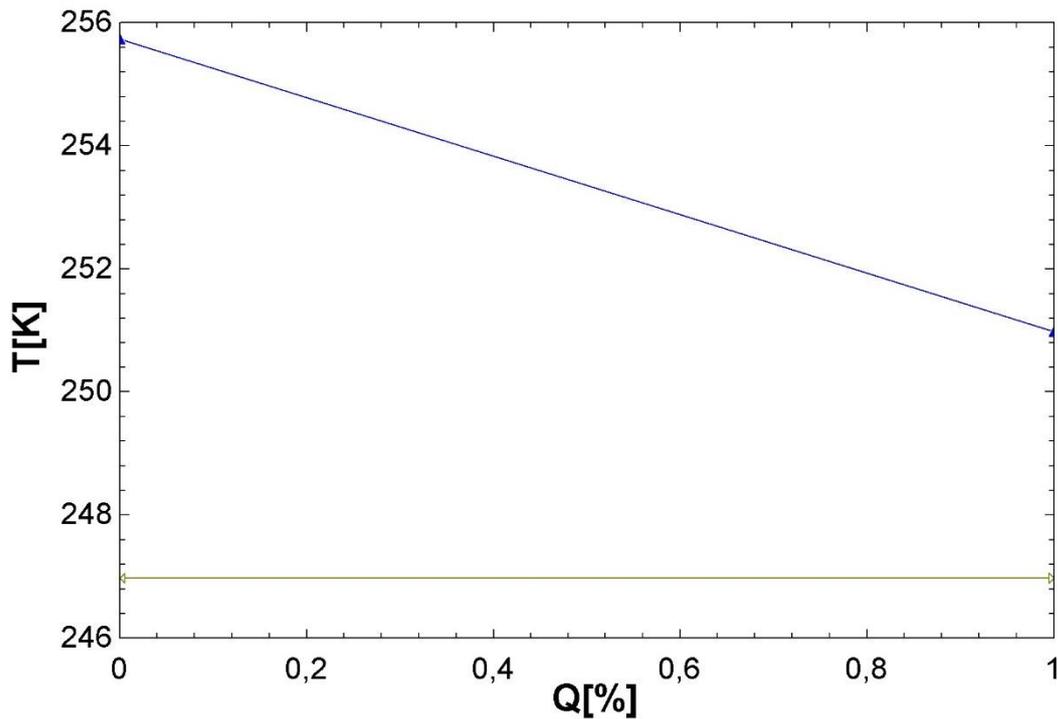


Ilustración 64: Diagrama T-Q de la carga del hielo mediante el ciclo de CO₂ con la configuración alternativa y aporte térmico.

Mediante el calor intercambiado con el CO₂, calculado a partir del **código 3**, se define el gasto másico de hielo necesario con la **ecuación 5**. Con la misma ecuación, y considerando la temperatura inicial y final del hielo, se determina el calor total cedido por hielo en todo el proceso de carga. Por último, la eficiencia del primer intercambio se determina con el **código 2**.

Tabla 68: Resultados del intercambio hielo-CO₂ en la carga de la configuración alternativa con aporte térmico.

Resultados		CA,AP	CB,RA	Unidad
Gasto másico del hielo	$m_{\text{hielo,carga}}$	23,73	34,05	kg/s
Calor total	$Q_{\text{foco,frío,CO2,carga}}$	221,3	218,9	kJ/kg
Calor total cedido por el hielo	$Q_{\text{real,carga,hielo}}$	557,8	227,73	kJ/kg
Calor máximo	$Q_{\text{max,carga,hielo,CO2}}$	221,3	228	kJ/kg
Eficiencia	$\epsilon_{\text{carga,hielo,CO2}}$	0,9634	0,9599	

El calor absorbido por el CO₂ es del orden del anterior, con un pequeño aumento del 1,09%, sin embargo, con el mayor incremento de temperaturas del hielo en la segunda parte de la carga, el calor total cedido por el hielo es más del doble que el anterior, aumentando un 144,94%. Aunque el gasto de hielo disminuye un 30,3%, el considerable aumento del calor provocará un notable incremento de la energía almacenada en el depósito de hielo.

Tras el intercambio con el CO₂, el hielo comienza la segunda etapa de carga mediante otro intercambio de calor, esta vez con el ciclo de amoníaco, donde se produce la evaporación de éste último.

Al igual que en el intercambio anterior, las condiciones de entrada del NH₃ son las de salida de la expansión, y las de salida son las de entrada en el compresor.

Tabla 69: Parámetros del intercambio hielo-amoníaco en la carga de la configuración alternativa con aporte térmico.

Parámetros		CA,AP	CB,RA	Unidad
Presión del hielo	P_{hielo}	100	100	Bares
Presión del amoníaco	$P_{\text{baja,NH}_3}$	1	2	bares
Temperatura de entrada del amoníaco	$T_{\text{out,expansión,NH}_3}$	239,6	254,3	K
Temperatura de salida del amoníaco	$T_{\text{in,compresor,NH}_3}$	239,6	254,3	K
Incremento de entalpía del amoníaco	Δh_{NH_3}	1158	1088,5	kJ/kg
Diferencia de temperatura mínima	DT_{min}	4	0,25	K
Temperatura de salida del hielo	$T_{\text{hielo,deposito,cargado}}$	243,6	254,6	K
Temperatura intermedia del hielo	$T_{\text{hielo,intermedia}}$	251	254,7	K

El incremento de entalpía del amoníaco, también sufre un pequeño aumento por la nueva presión de baja de amoníaco, esta vez de un 6,38%.

Esta nueva presión de baja de amoníaco también permite un mayor margen de maniobra en el intercambio, pudiendo establecer una diferencia de temperaturas mínima de 4 K, tras imponer 0,25 K de diferencia en el caso anterior. El incremento de temperaturas en el hielo es mucho mayor, pasando de 0,1 K a 7,4.

En la **ilustración 65** se muestra el diagrama T-Q de la segunda etapa en la carga del hielo, donde el hielo se vuelve a representar mediante una recta descendente azul y el amoníaco mediante una horizontal amarilla.

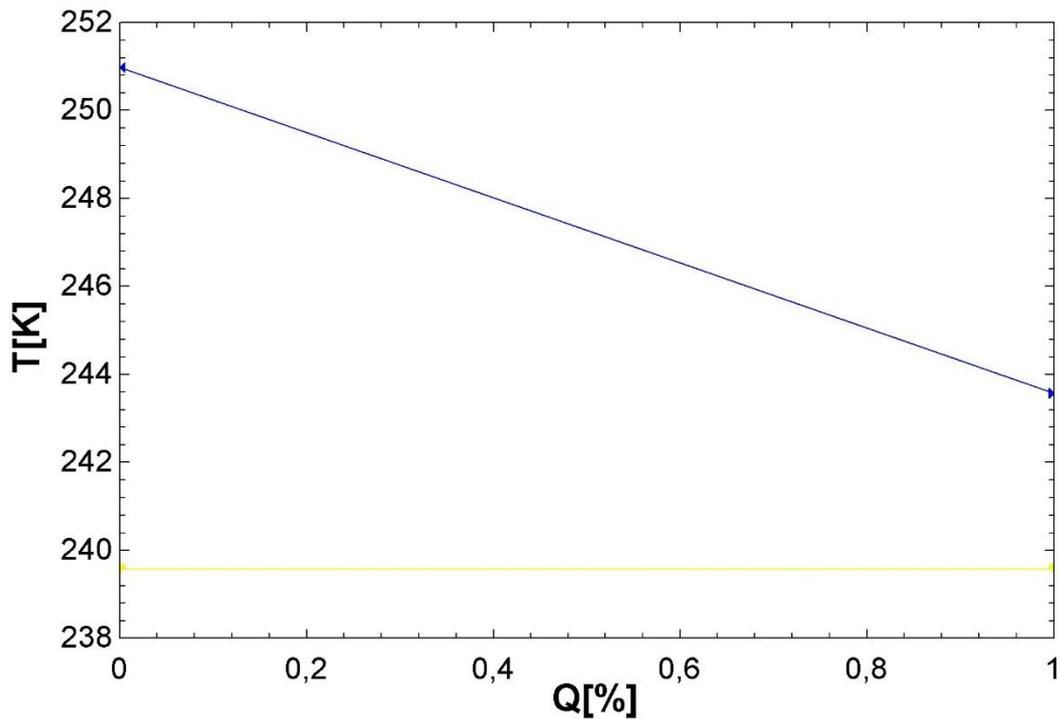


Ilustración 65: Diagrama T-Q de la carga del hielo mediante el ciclo de amoníaco con la configuración alternativa y aporte térmico.

Con el gasto y las condiciones del hielo determinadas, está definido el calor intercambiado con el evaporador del amoníaco con la **ecuación 5**. Puesto que las condiciones de entrada y salida del amoníaco están definidas, se determina el gasto en el ciclo de amoníaco con la **ecuación 6**. La eficiencia se calcula con el **código 2**.

Tabla 70: Resultados del intercambio hielo-amoníaco en la carga de la configuración alternativa con aporte térmico.

Resultados		CA,AP	CB,RA	Unidad
Calor total	$Q_{\text{foco,frio,NH}_3}$	336,4	8,831	kJ/kg
Gasto másico de amoníaco	m_{NH_3}	0,2906	0,0081	kg/s
Calor máximo	$Q_{\text{max,carga,hielo,NH}_3}$	357,3	8,845	kJ/kg
Eficiencia	$\epsilon_{\text{carga,hielo,NH}_3}$	0,9415	0,9984	

En los resultados destaca el gran aumento en el calor intercambiado y en el gasto másico del NH_3 aunque está totalmente justificado, pues el incremento de temperaturas del hielo es 74 veces mayor que el anterior, y el gasto másico de hielo, determinado por el primer intercambio con el CO_2 , aunque menor sigue siendo relativamente alto. Esto provoca un aumento de 327,57 kJ por cada kg de CO_2 y un gasto másico de amoníaco necesario 35 veces mayor que en el ciclo básico con refrigeración adicional durante la carga.

Este incremento en el gasto másico del amoníaco conlleva el proporcional aumento en la potencia de compresión en el ciclo de amoníaco, que puede pasar a tener un papel significativo.

5.6.6 Regeneración en la descarga

Al igual que en la carga, la regeneración es igual que en el caso anterior, y se utiliza para enfriar el CO₂ que sale de la turbina intercambiando calor con la salida de la bomba, realizando un precalentamiento del CO₂ que va a entrar en el intercambio con los depósitos de agua caliente.

Tabla 71: Parámetros de la regeneración en la descarga de la configuración alternativa con aporte térmico.

Parámetros		CA,AP	CB,RA	Unidad
Gasto másico de la corriente caliente	$m_{\text{CO}_2,\text{descarga}}$	1	1	kg/s
Gasto másico de la corriente fría	$m_{\text{CO}_2,\text{descarga}}$	1	1	kg/s
Presión del CO ₂ del lado caliente	$P_{\text{baja},\text{CO}_2,\text{descarga}}$	24	20,8	Bares
Presión del CO ₂ del lado frío	$P_{\text{alta},\text{CO}_2,\text{descarga}}$	190	174,2	Bares
Temperatura de entrada del lado caliente	$T_{\text{out},\text{turbina},\text{CO}_2,\text{des}}$	298,2	281,3	K
Temperatura de entrada del lado frío	$T_{\text{out},\text{bomba},\text{CO}_2,\text{des}}$	270,3	264	K
Diferencia de temperatura mínima	$DT_{\text{min},\text{regenerativo},\text{des}}$	4	4	K
Temperatura de salida del lado caliente	$T_{\text{in},\text{enfriamiento},\text{CO}_2,\text{des}}$	274,3	268	K

La variación de la temperatura de entrada del lado caliente depende del cambio en ambas presiones. Por un lado, al aumentar la presión de alta, la línea de expansión de la turbina se desplaza a la izquierda, pues la temperatura de entrada depende del agua caliente, contribuyendo negativamente al aumento de la temperatura de salida. Por otro lado, al aumentar la presión de baja, la expansión es menor y la temperatura de salida de la turbina es más alta. La influencia de la presión de baja es mucho mayor, y aunque la presión de baja aumenta 3,2 bares por los 15,8 de la presión de alta, la temperatura de salida de la turbina aumenta 16,9 K.

La temperatura de salida de la bomba también se ve afectada por ambas presiones, aunque las dos contribuyen de la misma forma. Al aumentar la presión de baja, la línea de compresión se desplaza a la derecha, pues parte del punto de líquido saturado, aumentando la temperatura tanto de entrada como de salida de la bomba. Al aumentar la presión de alta, directamente aumenta la temperatura de salida de la bomba. La temperatura de salida de la bomba es de 270,3 K, 5,7 K mayor que la anterior.

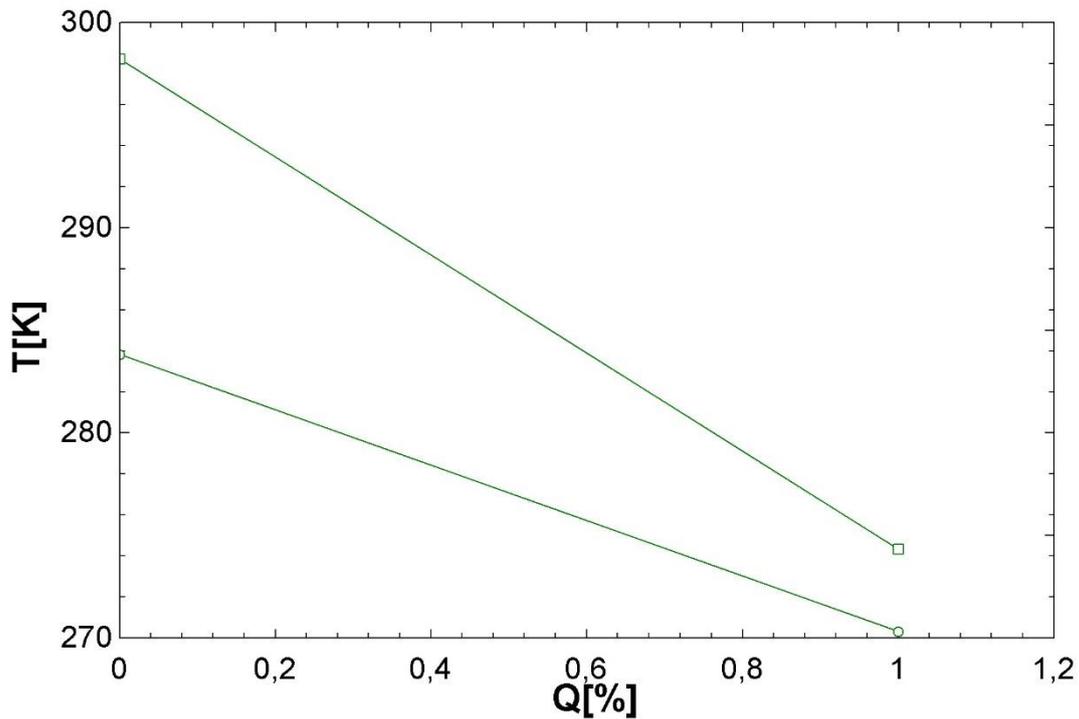


Ilustración 66: Diagrama T-Q de la regeneración durante el ciclo de descarga con la configuración alternativa y aporte térmico.

Las características del intercambio de calor se determinan mediante el **código 7**, donde a partir de las condiciones de entrada y el gasto másico de ambas corrientes se determinan las condiciones de salida, incluyendo la energía de un posible cambio de fase. La eficiencia se calcula con el **código 2**.

Tabla 72: Resultados de la regeneración en la descarga de la configuración alternativa con aporte térmico.

Resultados		CA,AP	CB,RA	Unidad
Calor real intercambiado	$Q_{\text{real,regenerativo,des}}$	26,97	14,81	kJ/kg
Temperatura de salida del lado frío	$T_{\text{in,precalentador,CO2,des}}$	283,8	271,5	K
Calor máximo	$Q_{\text{max,regenerativo,des}}$	31,63	19,47	kJ/kg
Eficiencia	$\epsilon_{\text{regenerativo,des}}$	0,8526	0,7607	

El calor intercambiado aumenta en un 82,1% respecto al ciclo básico con refrigeración adicional durante la carga.

La temperatura de salida del lado frío, que es la del CO₂ cuando entra al intercambio con los depósitos de agua caliente, es 12,3 K mayor, que suponen 12,3 K de ahorro en el intercambio con el agua caliente.

5.6.7 Descarga del agua caliente

En este intercambio, realizado en dos etapas, el CO₂ se calienta desde las condiciones de salida del regenerador hasta la temperatura más alta posible, para conseguir el mayor salto entálpico en la turbina. La diferencia mínima de temperaturas en el

intercambio con el depósito de agua caliente principal (depósito A) se sitúa en la salida del CO₂ y la entrada del agua caliente.

Tabla 73: Parámetros en la descarga del agua caliente en la configuración alternativa con aporte térmico.

Parámetros		CA,AP	CB,RA	Unidad
Presión del CO ₂	P _{alta,CO2,descarga}	190	174,2	bares
Presión del agua caliente	P _{agua,caliente}	100	100	bares
Flujo de CO ₂	m _{CO2}	1	1	kg/s
Temperatura del depósito A	T _{H2O,deposito,A,cargado}	467,1	449,9	K
Diferencia de temperatura mínima	DT _{min}	4	4	K
Temperatura de salida del CO ₂	T _{in,turbina,CO2,des}	463,1	445,9	K
Temperatura de entrada del CO ₂	T _{in,precalentador,CO2,des}	283,8	271,5	K
Calor total absorbido por el CO ₂	Q _{real,descarga,agua,caliente}	372,1	378,3	kJ/kg

Con la nueva presión de alta en la carga se consiguió un aumento de la temperatura de salida del CO₂ del compresor, lo que propició el mismo aumento en el depósito de agua caliente principal y que supone el mismo aumento en la temperatura de entrada en turbina. La temperatura de entrada del CO₂ es la de salida de la regeneración, que también se ve aumentada.

Respecto al calor total absorbido por la corriente de CO₂ se mantiene en el mismo orden, bajando un 1,64%, puesto que la temperatura de entrada también aumenta y prácticamente se mantiene el mismo incremento de temperaturas.

Para aprovechar al máximo la energía disponible en ambos depósitos, el gasto másico de descarga del agua caliente de los depósitos deberían ser proporcionales a los de carga, para que ambos depósitos queden vacíos a la vez. Sin embargo, las características de la carga son diferentes a las de la descarga, pues en la carga, el CO₂ se enfría en ambos intercambios hasta la misma temperatura, pues entre las cesiones de calor tiene lugar el recalentamiento. En la descarga, el CO₂ pasa por el intercambio con los dos depósitos sin que haya nada entre ambos intercambios.

El depósito secundario realizará un primer calentamiento de la corriente de CO₂. Las condiciones de salida del agua caliente en el intercambio serán las del agua al iniciar el ciclo de carga (temperatura ambiente).

En el intercambio con el depósito principal, el CO₂ entra precalentado por el depósito secundario, por lo que la temperatura de salida del agua caliente en el intercambio con el depósito principal no puede ser la inicial en el ciclo de carga. Para aprovechar al máximo la energía, la temperatura de salida del agua caliente será la del depósito B cargado, inyectando el gasto de agua en el depósito B.

En la **ilustración 67** se representa un esquema del balance carga-descarga en los depósitos de agua caliente. En la parte superior, en color naranja se representa el tren intercambiadores del ciclo de carga, y en la parte inferior, en color verde, los intercambiadores del ciclo de descarga. Los depósitos de agua caliente se representan por colores según su temperatura: el depósito de agua caliente inicial, a temperatura ambiente, se muestra en color amarillo. El depósito de agua caliente secundario, a 52,4°C, se representa en un color rojo intenso, mientras que el depósito de agua caliente principal, a 194°C, en un rojo más oscuro.

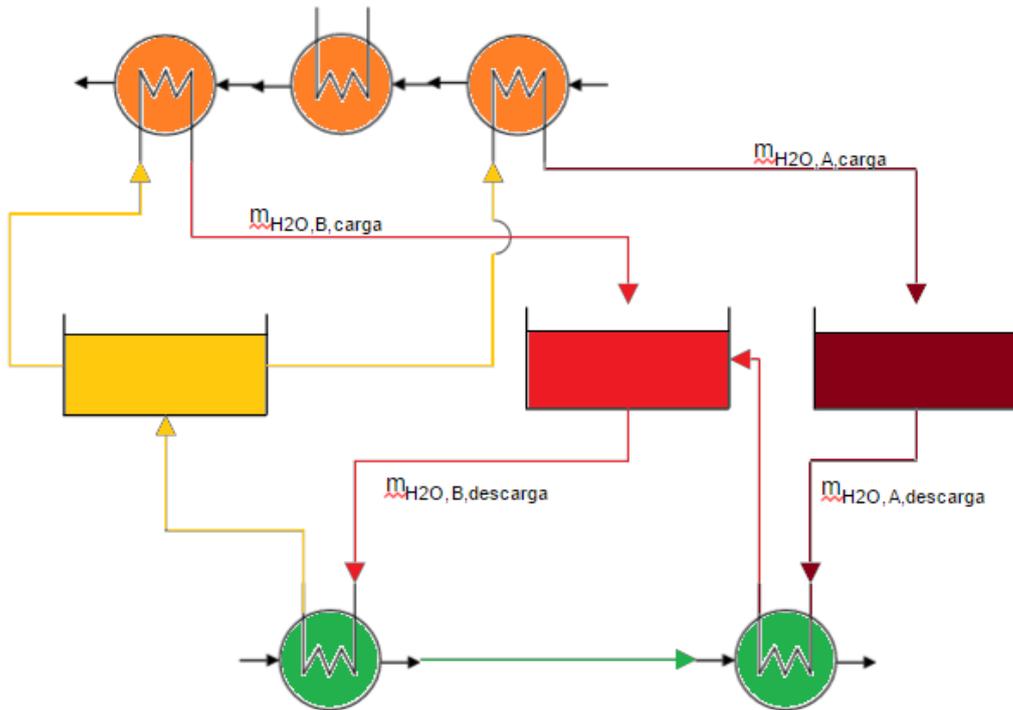


Ilustración 67: Balance de masas en los depósitos de agua caliente

Para que la descarga sea simultánea, el gasto másico del depósito B debe ser bastante mayor que el del depósito A, puesto que la velocidad de descarga debe ser tal que transcurrido un tiempo de descarga determinado, el depósito secundario haya descargado una masa equivalente a la suma de ambos depósitos, como recoge la **ecuación 26**.

$$m_{H2O,B,descarga} \cdot \zeta_{descarga} = m_{H2O,B,carga} \cdot \zeta_{carga} + m_{H2O,A,descarga} \cdot \zeta_{descarga}$$

Ecuación 26: Balance de masas del depósito secundario en la configuración alternativa.

En la práctica, por mucho gasto másico que tengamos en la descarga del depósito secundario, la corriente de CO₂ no pasará de la temperatura que tenga el agua caliente, y aplicando la ecuación anterior, estaríamos utilizando más energía de la necesaria para conseguir el mismo resultado.

Se define la temperatura del CO₂ de salida como la del agua caliente del depósito B menos la diferencia mínima de temperaturas (**ecuación 15**). El intercambio con el depósito A será óptimo, con una evolución de ambas corrientes de forma paralela.

Tabla 74: Parámetros de la descarga del depósito secundario de agua caliente en la configuración alternativa con aporte térmico.

Parámetros		CA,AP	CB,RA	Unidad
Temperatura de salida del agua caliente	T _{H2O,inicial}	288	288	K
Temperatura intermedia del agua caliente	T _{H2O,deposito,B,cargado}	325,4	369	K
Diferencia de temperatura mínima	DT _{min}	4	4	K
Temperatura intermedia del CO ₂	T _{intermedia,CO2,des}	321,4	360,6	K

La **ilustración 68** muestra un diagrama T-Q con el perfil de temperaturas de la descarga del agua caliente. Las líneas evolucionan de forma paralela, y se tendrá el gasto másico de agua caliente óptimo en la descarga de cada depósito.

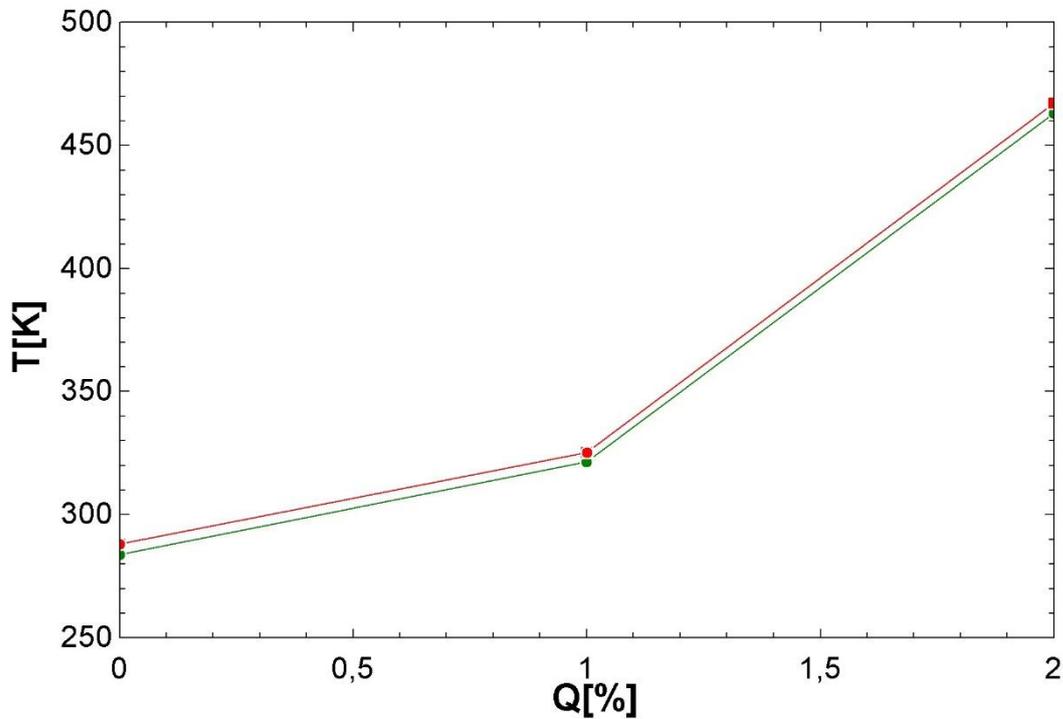


Ilustración 68: Diagrama T-Q de la descarga de los depósitos de agua caliente con la configuración alternativa y aporte térmico.

Este desajuste en los gastos másicos de CO₂ ocasionará que cuando el depósito A quede vacío, el depósito B aún tenga carga. El agua caliente restante del depósito B se puede aprovechar en descargas posteriores (tras un ciclo de carga en el que no se produjera el recalentamiento del CO₂ y la consiguiente carga del depósito B), en otras aplicaciones, como por ejemplo ACS, o simplemente, desechándose.

Con la temperatura intermedia de ambas corrientes definida, se determina el calor intercambiado y el gasto másico de agua caliente del depósito principal con las **ecuaciones 6 y 5**, respectivamente. Mediante el **código 2** se calcula eficiencia.

Tabla 75: Resultados de la descarga del depósito principal de agua caliente en la configuración alternativa con aporte térmico.

Resultados		CA,AP	CB,RA	Unidad
Flujo de agua caliente depósito A	$m_{H_2O,A,des}$	0,4808	0,4548	kg/s
Calor total depósito A	$Q_{real,descarga,agua,caliente,A}$	289,3	156,8	kJ/kg
Calor máximo	$Q_{max,descarga,agua,caliente,A}$	296,4	165	kJ/kg
Eficiencia	$\epsilon_{descarga,agua,caliente,A}$	0,97	0,95	

El gasto de másico de agua caliente en la descarga del depósito principal, que marcará el tiempo de descarga del ciclo, aumenta un 5,71%. Esto significa que por cada hora de carga del ciclo eléctrico, tendremos 57 minutos de descarga disponible.

Aunque el calor del depósito principal aumenta notablemente, antes se mostraba como el calor total de la descarga era similar al del ciclo anterior, de forma que el depósito secundario compensa esta diferencia.

Solo queda por determinar el intercambio de calor con el depósito secundario de agua caliente para completar la descarga. El calor intercambiado y el gasto másico de descarga del depósito secundario se determinan mediante las **ecuaciones 6 y 5**, respectivamente. La eficiencia está definida nuevamente mediante el **código 2**.

Tabla 76: Resultados de la descarga del depósito secundario de agua caliente en la configuración alternativa con aporte térmico

Resultados		Valor	Unidad
Flujo de agua caliente depósito B	$m_{H_2O,B,des}$	0,5323	kg/s
Calor total depósito B	$Q_{real,des,agua,caliente,B}$	82,74	kJ/kg
Calor máximo	$Q_{max,descarga,agua,caliente,B}$	90,91	kJ/kg
Eficiencia	$\epsilon_{descarga,agua,caliente,B}$	0,9101	

El gasto másico disminuye un 19% respecto al del ciclo anterior. Esto no influye en el balance de horas carga-descarga, pues el gasto limitante será el del depósito principal. Además esta comparación tiene aún menos importancia cuando la configuración en los ciclos es diferente, pues en el ciclo básico con refrigeración adicional, la carga se realizaba en serie, mientras que en la nueva configuración se realiza en paralelo.

Como se comentaba antes, el calor del depósito secundario baja notablemente, compensando el incremento que se tenía en el depósito principal.

5.6.8 Descarga del hielo

La descarga del hielo se lleva a cabo en una sola etapa, desde la temperatura del hielo con el depósito cargado hasta la que tenía al iniciar el proceso de carga.

Este rango de temperaturas es mayor que el que tenía el hielo en el intercambio con el CO₂ en la carga, por lo que el gasto másico relativo de descarga será menor, proporcionando más horas de descarga por cada hora carga. Este desajuste se puede compensar de varias maneras: aprovechando el exceso de hielo para descargar el agua caliente de origen térmico (carga del agua caliente mediante el aporte de energía de la fuente térmica alternativa), o realizar una carga del hielo sin utilizar el ciclo de amoníaco.

En el intercambio de calor, las condiciones de entrada y salida de ambas corrientes están definidas, siendo las condiciones de entrada del CO₂ las de salida del regenerador tras la descarga de la turbina y saliendo como líquido saturado para entrar en la bomba, y las del hielo las del depósito cargado y las iniciales del hielo al comenzar el ciclo de carga.

Tabla 77: Parámetros en la descarga de hielo en la configuración alternativa con aporte térmico.

Parámetros		CA,AP	CB,RA	Unidad
Presión del hielo	P_{hielo}	100	100	Bares
Presión del CO ₂	$P_{baja,CO_2,des}$	24	20,8	bares
Gasto másico del dióxido de carbono	$m_{CO_2,des}$	1	1	kg/s
Temperatura de entrada del CO ₂	$T_{in,enfriamiento,CO_2,des}$	274,3	268	K

Temperatura de salida del CO ₂	$T_{in,bomba,CO2,des}$	259,7	254,9	K
Incremento de entalpía del CO ₂	Δh_{CO2}	286,05	294,6	kJ/kg
Temperatura de salida del hielo	$T_{hielo,inicial}$	255,7	251,3	K
Temperatura de entrada del hielo	$T_{hielo,deposito,cargado}$	243,6	254,7	K

Al disminuir las presiones de baja del CO₂ y el amoníaco en la carga y aumentar la de baja en la descarga, la temperatura de salida del hielo aumenta y la de entrada disminuye. El incremento de temperaturas del hielo en el intercambio es de 12,1 K mientras que en el caso anterior era de 3,4 K, una diferencia superior al triple.

Como se muestra en la **figura 69**, el CO₂ se enfría hasta llegar a la temperatura de saturación, donde comienza la condensación. En ese punto de vapor saturado se produce la diferencia mínima de temperaturas en el intercambio.

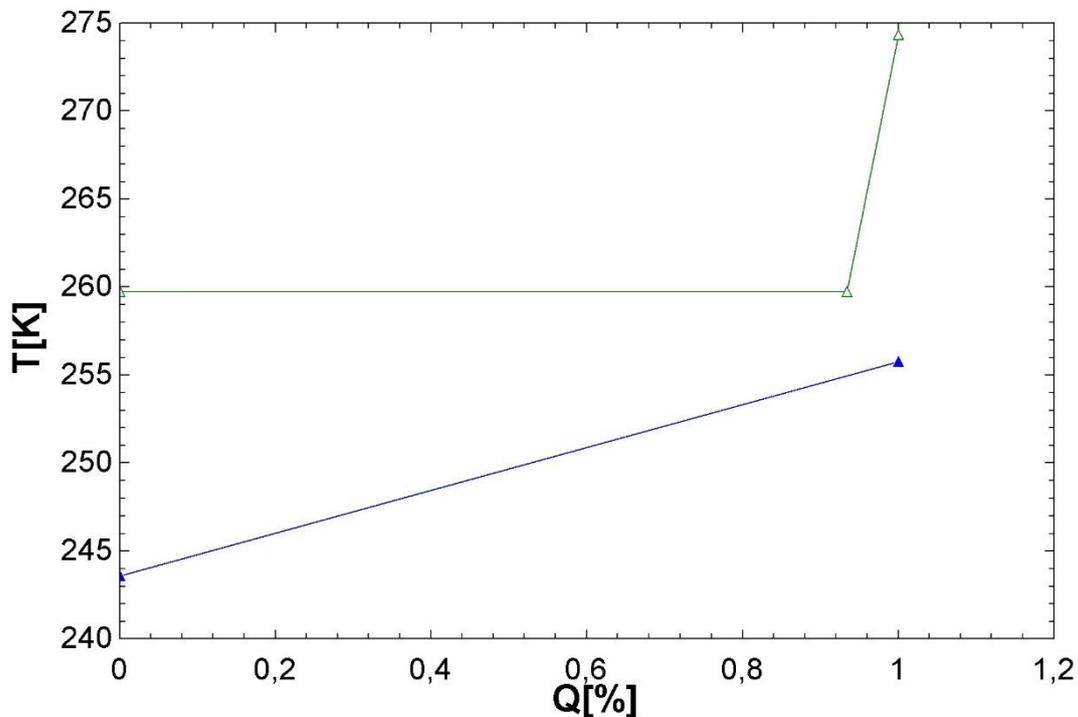


Ilustración 69: Diagrama T-Q de la descarga del hielo con la configuración alternativa y aporte térmico.

Mediante el **código 5** se establece el calor intercambiado en cada parte del intercambio y, con el gasto de CO₂ determinado, se define el gasto de hielo necesario en la descarga con la **ecuación 6**, inferior al de carga como ya se ha comentado anteriormente. La eficiencia se determina mediante el **código 2**.

Tabla 78: Resultados en la descarga de hielo en la configuración alternativa con aporte térmico.

Resultados		CA,AP	CB,RA	Unidad
Calor de enfriamiento	$Q_{enfriamiento,CO2,des}$	18,96	16,17	kJ/kg
Calor de condensación	$Q_{condensación,CO2,des}$	267,1	278,4	kJ/kg
Calor total	$Q_{real,descarga,hielo}$	286,1	294,6	kJ/kg
Flujo de hielo	m_{hielo}	12,17	44,05	kg/s

Temperatura del hielo en el cambio de pendiente	$T_{\text{hielo,CO}_2,\text{saturado}}$	254,9	254,5	K
Diferencia de temperatura mínima	$DT_{\text{min,descarga,hielo}}$	4	0,4365	K
Calor máximo	$Q_{\text{max,descarga,hielo}}$	310,9	300,6	kJ/kg
Eficiencia	$\epsilon_{\text{descarga,hielo}}$	0,9201	0,98	

El gasto másico de hielo necesario en la descarga se reduce un 72,37%. Esto permitirá un mayor número de horas de descarga por cada hora de carga, pues el gasto másico del agua caliente de los depósitos de la descarga sí se mantiene más cercano a los del caso anterior.

La diferencia de temperatura mínima en el intercambio se determina en 4 K. Esto es posible por el aumento de la presión baja de descarga de CO₂, que proporcionaba un mayor rango de maniobra en el intervalo de temperaturas disponible para el depósito de hielo.

5.6.9 Carga por la central termosolar

La central termosolar se modela como una corriente con unas condiciones definidas e invariables de entrada y de salida.

Las condiciones del CO₂ en el intercambio también están determinadas: el CO₂ entra en el intercambio según sale del intercambio con el depósito B, aumentando su temperatura hasta alcanzar la temperatura de salida del compresor de CO₂, punto donde se reincorpora el CO₂ al ciclo.

Con las condiciones de entrada y salida de ambos fluidos determinadas, un definiendo un gasto másico se definirá el otro.

Tabla 79: Parámetros en el ciclo de carga térmico en la configuración alternativa con aporte térmico.

Parámetros		Valor	Unidad
Gasto másico del dióxido de carbono	$m_{\text{CO}_2\text{termico}}$	1	kg/s
Temperatura de entrada del fluido térmico	$T_{\text{out,campo,solar}}$	666	K
Temperatura de salida del fluido térmico	$T_{\text{in,campo,solar}}$	566	K
Incremento de entalpía del fluido térmico	$\Delta h_{\text{fluido,termico}}$	260	kJ/kg
Temperatura de salida del CO ₂	$T_{\text{out,compresor,CO}_2,\text{carga}}$	471,1	K
Temperatura de entrada del CO ₂	$T_{\text{out,CO}_2,\text{carga,caliente}}$	292	K
Gasto másico del fluido térmico	$m_{\text{fluido,termico}}$	1,387	kg/s

En la **ilustración 70** se muestra el diagrama T-Q del intercambio, donde la línea superior representa el enfriamiento del fluido térmico de la central termosolar, y la línea inferior el calentamiento del CO₂.

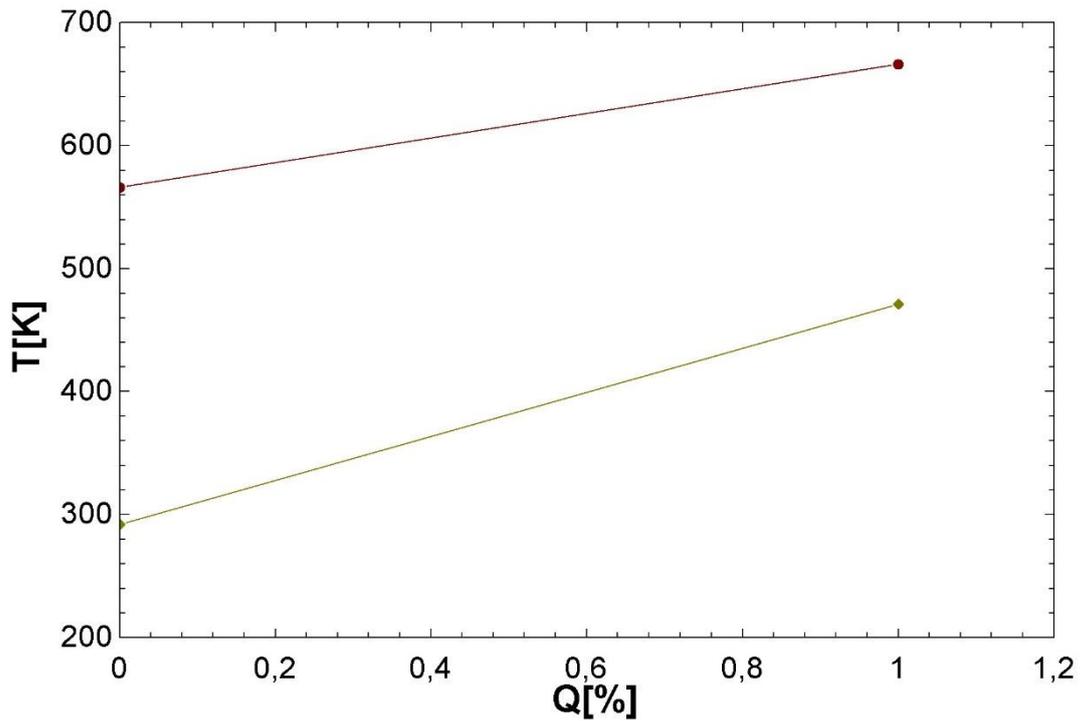


Ilustración 70: Diagrama T-Q del calentamiento del CO₂ por la central termosolar.

Para hacer una mención especial al funcionamiento de la central termosolar en solitario, se muestra un esquema de la carga del agua caliente mediante éste en la **figura 71**. El fluido térmico (representado en color marrón) cede calor al CO₂ (color naranja), que alcanza la temperatura que tendría a la salida del compresor en el ciclo de carga eléctrico. El CO₂ entra en el tren de intercambiadores de agua caliente, de los que solo se encuentra en funcionamiento el primero, pues al no estar conectado el ciclo de carga eléctrico no se produce recalentamiento.

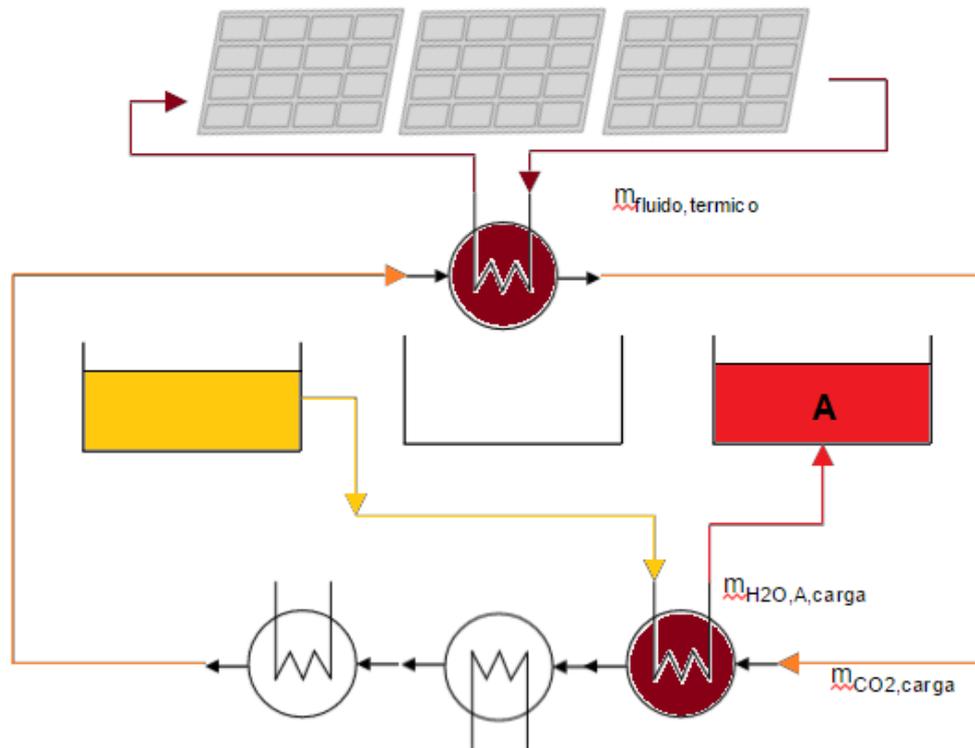


Ilustración 71: Esquema del intercambio con la central termosolar

El depósito de agua caliente principal, que limita la descarga, se carga en solitario. Esto permite aumentar el número de horas de descarga, de forma que sumando una hora de carga térmica (solo se carga el depósito principal de agua caliente) y otra de carga eléctrica (se cargan los tres depósitos) se tendrían aproximadamente dos horas de plena descarga.

5.6.10 Carga de hielo extra

Si se diera el caso de una cantidad insuficiente de hielo almacenada en el depósito para completar la descarga completa del depósito de agua caliente principal, se lleva a cabo una carga de hielo adicional.

La carga extra del depósito de hielo se realiza cuando la masa de hielo existente en el depósito no es suficiente para descargar completamente el depósito de agua caliente principal. Para cargar el depósito de hielo se pone en funcionamiento el ciclo de amoníaco. El ciclo de amoníaco opera en las mismas condiciones de temperatura y presión que en la carga.

Sin embargo, las condiciones del hielo no son las mismas; el enfriamiento que se llevaba a cabo mediante dos etapas en la carga, se realiza únicamente con el ciclo de amoníaco. La temperatura de entrada del hielo es la inicial y la de salida es la del depósito cargado. El gasto de hielo dependerá de la masa necesaria y del tiempo disponible de carga.

Tabla 80: Parámetros en el ciclo de carga extra de hielo en la configuración alternativa con aporte térmico.

Parámetros		Valor	Unidad
Presión del hielo	P_{hielo}	100	Bares
Presión del amoníaco	$P_{\text{baja,NH}_3}$	2	bares

Temperatura de entrada del amoníaco	$T_{out,expansión,NH3}$	254,3	K
Temperatura de salida del amoníaco	$T_{in,compresor,NH3}$	254,3	K
Temperatura de entrada del hielo	$T_{hielo,inicial}$	255,7	K
Temperatura de salida del hielo	$T_{hielo,deposito,cargado}$	243,6	K

El enfriamiento y posterior condensación del amoníaco tras la compresión en el ciclo de amoníaco se lleva a cabo completamente mediante una refrigeración con el ambiente.

5.7 Trabajo y calor

5.7.1 Ciclo de CO₂ en la carga

En la **tabla 81** se recogen los resultados del calor y trabajo en el ciclo de CO₂ de carga. El trabajo de compresión y expansión se define con las **ecuaciones 7 y 8**, respectivamente.

Tabla 81: Trabajo y calor del ciclo de CO₂ durante la carga en la configuración alternativa con aporte térmico

		CA,AP	CB,RA
Trabajo de compresión	$W_{compresion,CO2,carga}$	154,7	137,6
Trabajo de expansión en turbina hidráulica	$W_{hidraulica,CO2,carga}$	15,42	13,81
Calor cedido al agua caliente en el ciclo de carga	$Q_{foco,caliente,CO2,carga}$	442,55	200,6
Calor cedido por el hielo en el ciclo de carga	$Q_{foco,frío,CO2,carga}$	221,3	218,9

El trabajo de compresión, que depende únicamente de las presiones de alta y baja del CO₂ en el ciclo de carga, aumenta un 12,43%, pues la presión de alta es mayor y la de baja es menor que las anteriores, contribuyendo ambas en el aumento del trabajo.

Como la compresión parte del punto de vapor saturado, la temperatura de salida del compresor aumenta, y colabora en el destacado aumento del 120,61% del calor almacenado en el depósito de agua caliente. Sin embargo, la mayor parte corresponde con la inclusión del recalentamiento.

El calor del almacenado en el foco frío apenas aumenta un 1,09%. Este pequeño aumento se debe a la mayor distancia entre el punto de líquido y vapor saturado de la nueva presión de baja en la carga del CO₂.

5.7.2 Ciclo de NH₃ en la carga

En la **tabla 82** se muestran los valores de calor y trabajo en el ciclo de NH₃ durante la carga. Al igual en el ciclo de CO₂, el trabajo del compresor y, en este caso, la válvula, por cada kg de CO₂ de carga, queda determinado por las **ecuaciones 8 y 9**.

Tabla 82: Trabajo y calor en el ciclo de NH₃ durante la carga en la configuración alternativa con aporte térmico

		CA,AP	CB,RA
Trabajo de compresión	$W_{compresion,NH3,carga}$	103,9	2,838

Trabajo de expansión en turbina hidráulica	$W_{\text{expansion,NH3,carga}}$	6,782	0,2245
Calor cedido al agua caliente en el ciclo de carga	$Q_{\text{foco,caliente,NH3,carga}}$	81,95	0
Calor cedido por el hielo en el ciclo de carga	$Q_{\text{foco,frio,NH3,carga}}$	336,4	8,831

El trabajo de compresión del amoníaco aumenta considerablemente, alcanzando un valor del orden del trabajo de compresión del CO₂. Este aumento viene derivado del gran incremento de temperaturas del hielo en el intercambio con el amoníaco durante la carga, que provoca el aumento en 37 veces del calor cedido por el hielo al amoníaco.

Con la nueva configuración, el recalentamiento del CO₂ absorbe 81,95 kJ/kg que antes de cedían al ambiente.

5.7.3 Ciclo de CO₂ en la descarga

La **tabla 83** expone el calor y trabajo en el ciclo de CO₂ de descarga. El trabajo de la bomba se define con la **ecuación 9**, mientras que el de la turbina se determina con la **ecuación 10**.

Tabla 83: Trabajo y calor en el ciclo de CO₂ durante la descarga en la configuración alternativa con aporte térmico

		CA,AP	CB,RA
Trabajo de compresión en bomba	$W_{\text{bomba,descarga}}$	19,19	17,39
Trabajo de expansión en turbina	$W_{\text{turbina,descarga}}$	105,2	101,1
Calor cedido por el agua caliente en el ciclo de descarga	$Q_{\text{foco,caliente,des}}$	372,1	378,3
Calor cedido al hielo en el ciclo de descarga	$Q_{\text{foco,frio,des}}$	286,1	294,6

En el ciclo de descarga, tanto la presión de alta como la de baja se aumentaron. El aumento de la presión de alta conlleva el incremento del trabajo de bomba y turbina, mientras que el aumento de la presión de baja tiene el efecto contrario. El balance es un aumento del 10% en el trabajo de la bomba y un aumento del 4,05% en el de la turbina. Aunque el crecimiento es mayor en la bomba, el resultado neto es un aumento del trabajo en un 2,74%.

Este aumento del trabajo neto se consigue, además, con menos calor en la descarga de los focos caliente y frío, reduciéndose en un 1,64% y 2,88% respectivamente.

5.8 Balance de energía

5.8.1 Horario de funcionamiento de la planta.

En la **tabla 89** se muestra un esquema con el precio de electricidad por horas, expresado en c€/kWh, en el día 15 de cada mes del año. A partir de esta tabla se diseña un horario de funcionamiento de la planta, procediendo de la siguiente forma:

- En el período de precio alto, marcado en rojo, se desarrolla la descarga. Siempre será un periodo de 10 horas, aprovechando al máximo la tarifa de discriminación horaria, empezando a las 12:00 o a las 13:00 según se muestra en la tabla. Para realizar una descarga completa de 10 horas, se combina una carga térmica y otra eléctrica de 5 horas cada una.

- El período de carga eléctrico, sombreado en amarillo, comienza a una hora distinta en cada mes dependiendo del precio horario, pudiendo comenzar a la 1:00, 2:00 o 3:00. Siempre con una duración de 5 horas.
- El período de carga térmico, sombreado en naranja, comienza a las 12:00, con una duración de 5 horas, realizándose al mismo tiempo que el período de descarga.

Tabla 84: Precio de la electricidad con tarifa de discriminación horaria. [5]

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
0 h	9,07	7,07	5,83	7,41	7,00	4,39	5,04	5,41	5,51	6,21	6,64	8,74
1 h	8,46	6,55	5,32	6,66	6,41	4,21	4,62	5,06	5,02	5,74	6,58	7,97
2 h	7,99	6,25	5,32	6,32	6,16	3,92	4,33	4,97	5,04	5,65	6,36	7,52
3 h	7,66	6,18	4,90	6,34	5,96	3,83	4,26	4,97	5,06	5,85	5,98	7,13
4 h	7,41	6,18	4,80	6,15	5,90	3,68	4,15	5,00	5,19	5,72	5,96	7,10
5 h	7,37	6,22	5,26	6,14	5,99	3,98	4,17	5,03	5,19	5,63	6,39	7,52
6 h	7,50	7,01	5,95	6,31	6,48	4,17	4,32	5,18	5,36	5,97	7,32	8,63
7 h	7,68	8,16	6,77	6,45	6,82	4,75	4,57	5,26	6,08	6,29	7,80	9,14
8 h	7,93	8,27	6,67	6,45	6,71	5,21	5,24	5,49	6,28	6,50	8,10	9,39
9 h	8,12	8,16	6,48	6,76	6,68	4,84	5,46	5,77	6,32	6,56	7,54	8,93
10 h	8,41	7,77	6,39	6,59	6,61	4,68	5,17	5,76	6,16	6,49	7,47	8,85
11 h	8,52	7,56	6,22	6,36	6,53	4,77	5,22	5,86	6,21	6,05	7,29	8,82
12 h	15,03	14,11	12,83	6,22	6,55	4,60	5,31	5,74	6,08	5,84	14,10	15,33
13 h	15,34	14,33	12,88	13,11	13,21	11,12	12,04	12,48	12,66	12,46	14,52	15,67
14 h	15,02	14,13	12,96	13,04	13,24	11,23	12,30	12,67	12,74	12,45	14,27	15,70
15 h	14,89	14,27	12,98	12,75	13,24	10,90	12,37	12,32	12,33	11,92	14,25	15,62
16 h	14,81	14,22	12,93	12,35	13,16	10,83	12,46	12,15	12,23	11,92	14,22	15,67
17 h	15,16	14,31	12,88	12,20	13,10	10,93	12,32	12,17	12,28	12,26	14,59	15,68
18 h	16,29	14,98	13,07	12,26	13,07	11,30	12,19	11,83	12,38	13,35	15,13	16,07
19 h	17,36	15,38	13,49	12,62	13,18	11,51	12,02	11,85	12,63	14,39	15,19	16,13
20 h	17,33	15,55	13,71	13,19	13,40	11,40	12,08	12,07	12,96	14,27	15,27	15,72
21 h	16,94	15,55	13,68	13,84	13,92	11,38	12,39	13,14	13,34	13,79	15,34	15,12
22 h	10,11	8,23	6,72	13,42	13,81	11,68	12,35	13,01	12,52	13,00	8,26	8,52
23 h	9,38	7,23	6,58	6,65	6,88	4,96	5,62	5,89	5,17	5,96	7,61	8,14

5.8.2 Aporte térmico y descarga simultáneos.

En la **figura 72** se muestra la evolución de la carga de los depósitos de agua caliente y hielo durante un día completo en los meses en los que el ciclo de aporte térmico y el de descarga comienzan al mismo tiempo.

Esto ocurre desde noviembre a marzo, ambos inclusive. En la gráfica se ha representado el ciclo eléctrico cuando comienza a las 01:00. Esto no se cumple en el mes de enero, donde la carga no comienza hasta las 03:00, sin embargo, no es de relevancia pues el perfil de carga de los depósitos será exactamente igual al representado comenzando dos horas más tarde.

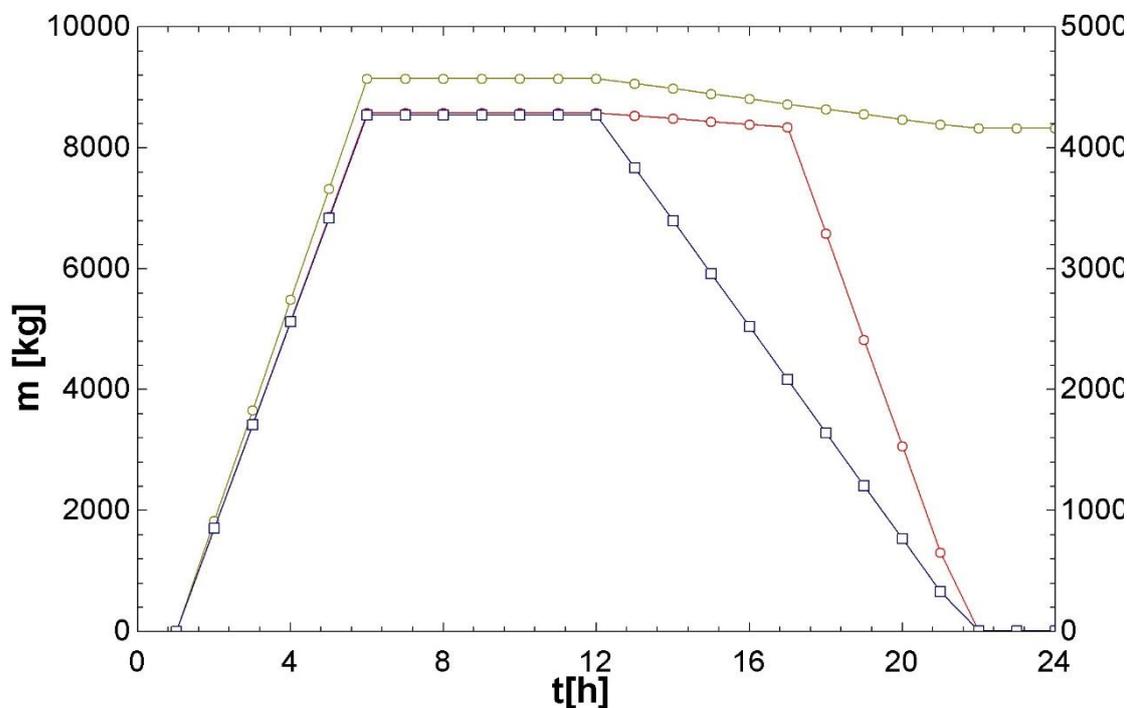


Ilustración 72: Perfil de carga de los depósitos cuando el ciclo térmico y el de descarga comienzan al mismo tiempo.

El ciclo de carga eléctrico funciona en solitario durante 5 horas de la noche, aprovechando la tarifa baja de electricidad, cargando los depósitos de agua caliente primario y secundario hasta un nivel muy parecido, y el depósito de hielo.

A las 12:00, coincidiendo con el cambio de tarifa de la electricidad eléctrica durante los meses citados arriba, se pone en marcha el ciclo de descarga, que permanecerá activo durante las 10 horas en las que el precio de la electricidad es alto.

El ciclo térmico se desarrolla durante 5 horas, para que la descarga del depósito principal de agua caliente se complete a la vez que lo hace la descarga del hielo. Durante el tiempo en el que funcionan el ciclo térmico y el de descarga, el nivel del depósito principal se mantiene casi constante, pues el gasto másico de descarga es muy parecido al de carga.

Cabe recordar que en el ciclo de carga mediante el aporte térmico no se consume electricidad, por lo que no importa que se desarrolle durante el periodo de alto precio de la energía eléctrica.

5.8.3 Aporte térmico y descarga desfasados.

Durante los meses cálidos (desde abril hasta octubre), la tarifa de discriminación horaria cambia ligeramente, aplazando el período de alto precio una hora, de modo

que el ciclo de descarga de la planta se pondrá en marcha una hora más tarde respecto al caso anterior.

Como el ciclo térmico mantiene su horario, el perfil de carga de los depósitos se verá alterado como muestra la **figura 73**. Durante la hora de funcionamiento del ciclo térmico en solitario, el nivel del depósito de agua caliente principal aumenta, para después mantenerse constante durante las horas en las que el ciclo térmico se desarrolla de forma simultánea con la descarga.

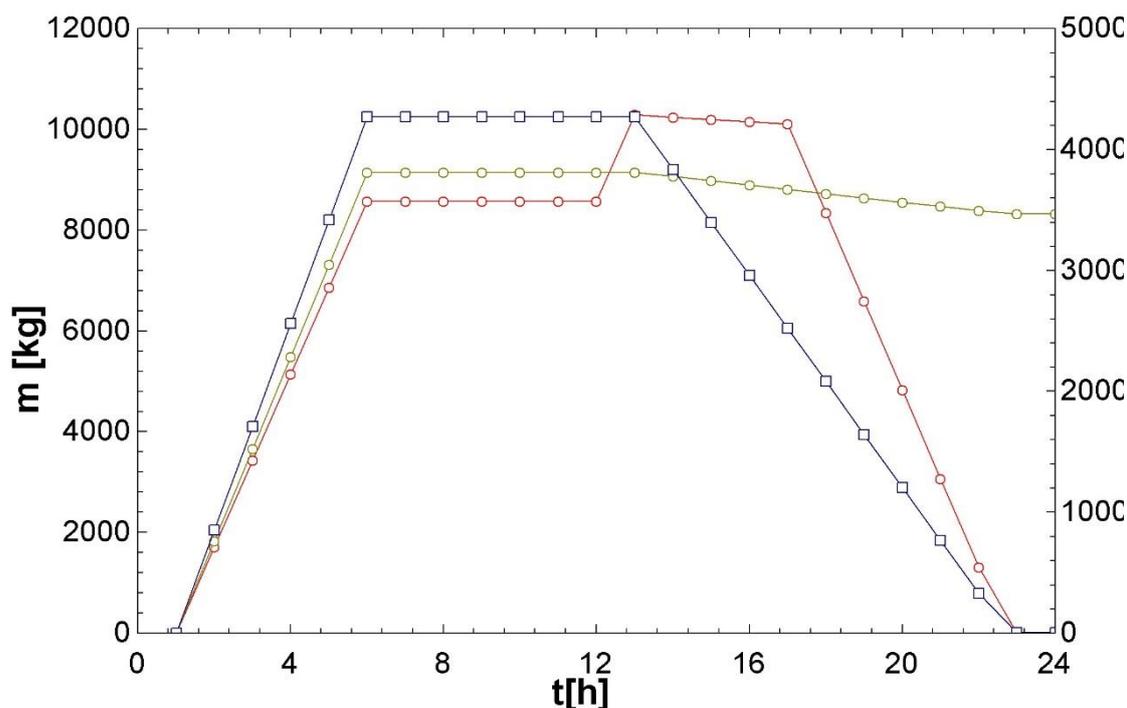


Ilustración 73: Perfil de carga de los depósitos cuando el ciclo térmico y el de descarga no comienzan al mismo tiempo.

Como en el caso anterior, el ciclo de carga no siempre comienza a la 01:00, desplazándose la recta ascendente que se corresponde con la carga hacia la derecha, con la misma pendiente pero comenzando con una hora de retraso.

Como se observa en la gráfica, el desfase entre el comienzo del ciclo térmico y el de descarga no afecta a la descarga simultánea de los depósitos de agua caliente principal y el de hielo.

5.9 Eficiencia

Aunque el rendimiento termodinámico de un sistema de almacenamiento de energía se indica a través de la eficiencia de carga y descarga, que es la relación entre la electricidad que se produce en la descarga para un tiempo ζ_D y la que se utiliza en la carga en un tiempo ζ_C , como ya se ha comentado previamente, antes de analizar tiempos de carga y descarga en los diferentes modos de funcionamiento se muestra la eficiencia de la planta desde el punto de vista de calor y trabajo.

El rendimiento de los diferentes ciclos en el caso con la configuración alternativa y aporte térmico adicional se determinan desde el punto de vista mecánico, definidos en orden por las **ecuaciones 27-31**.

$$\text{COP}_{\text{carga,CO}_2} = \frac{(\dot{Q}_{\text{FC,carga}} + \dot{Q}_{\text{FF,CO}_2})}{(\dot{W}_{\text{C,CO}_2,\text{carga}} - \dot{W}_{\text{H,carga}})}$$

Ecuación 27: Rendimiento del ciclo de CO₂ durante la carga en la configuración alternativa con aporte térmico

$$\text{COP}_{\text{carga,NH}_3} = \frac{\dot{Q}_{\text{FF,NH}_3,\text{carga}} + \dot{Q}_{\text{Recal,CO}_2,\text{carga}}}{\dot{W}_{\text{C,NH}_3,\text{carga}}}$$

Ecuación 28: Rendimiento del ciclo de NH₃ durante la carga en la configuración alternativa con aporte térmico

$$\text{COP}_{\text{carga}} = \frac{(\dot{Q}_{\text{FC,carga}} + \dot{Q}_{\text{FF,carga}})}{(\dot{W}_{\text{C,CO}_2,\text{carga}} + \dot{W}_{\text{C,NH}_3,\text{carga}} - \dot{W}_{\text{H,CO}_2,\text{carga}})}$$

Ecuación 29: Rendimiento del ciclo de carga en la configuración alternativa con aporte térmico

$$\eta_{\text{descarga}} = \frac{\dot{W}_{\text{T,des}} - \dot{W}_{\text{B,des}}}{\dot{Q}_{\text{FC,des}} + \dot{Q}_{\text{FF,des}}}$$

Ecuación 30: Rendimiento del ciclo de descarga en la configuración alternativa con aporte térmico

$$\eta_{\text{total}} = \frac{\tau_{\text{des}}(\dot{W}_{\text{T,CO}_2,\text{des}} - \dot{W}_{\text{B,CO}_2,\text{des}})}{\zeta_{\text{C,elec}}(\dot{W}_{\text{C,CO}_2,\text{carga}} + \dot{W}_{\text{C,NH}_3,\text{carga}} - \dot{W}_{\text{H,CO}_2,\text{carga}})}$$

Ecuación 31: Rendimiento del caso con configuración alternativa y aporte térmico

En la **tabla 85** se comparan los valores de rendimiento en el ciclo básico con refrigeración adicional con amoníaco durante la carga, sombreado en amarillo, y en el ciclo con la configuración alternativa con aporte térmico, sombreado en verde.

Tabla 85: Rendimientos en la configuración alternativa con aporte térmico

Rendimiento		CA,AP	CB,RA
Rendimiento del ciclo de CO ₂ en la carga	COP _{carga,CO₂}	4,767	4,537
Rendimiento del ciclo de NH ₃ en la carga	COP _{carga,NH₃}	4,029	7,143
Rendimiento total del ciclo de carga	COP _{carga}	4,114	4,505
Rendimiento del ciclo de descarga	η _{descarga}	0,1307	0,1243
Rendimiento global	η _{total}	0,707	0,6609

El ciclo de CO₂ en el modo de funcionamiento de carga eléctrico tiene un rendimiento de 4,767, que aumenta un 5,06% respecto al del caso anterior. La subida tiene su origen en la energía extra que se almacena en el depósito secundario por el recalentamiento.

El rendimiento del ciclo de amoníaco es el que tiene una caída más acusada, del 43,6%, provocada por el aumento en la potencia de compresión debido a la subida del gasto másico de amoníaco por cada kg de CO₂. La bajada de rendimiento es en favor de un mejor funcionamiento del sistema, con menor gasto de hielo en la carga y en la descarga, y mayor diferencia mínima de temperatura entre las corrientes del intercambio.

El rendimiento total de carga se ve afectado por los dos anteriores, el balance es de una bajada del 8,68%, y el rendimiento en el ciclo de descarga aumenta un 5,15%

El resultado global, es un rendimiento mecánico del 70,7%, que supone una subida del 6,97% si lo comparamos con el rendimiento global del ciclo básico con refrigeración adicional durante la carga. Este valor de rendimiento se alcanza considerando la energía aportada desde el ciclo de carga térmico, algo ausente en el caso anterior. Si solo se comparara el ciclo eléctrico, el rendimiento sería menor, pues en la configuración alternativa, las nuevas condiciones de intercambio con el foco frío, concretamente la nueva presión baja de descarga del CO₂, repercuten negativamente en el rendimiento.

6. Análisis económico

Para terminar el estudio del sistema de almacenamiento de energía termoeléctrica mediante ciclos transcíticos de CO₂ y almacenamiento en agua y hielo, se realiza un análisis económico de la planta con la configuración alternativa con aporte térmico, en el que se han tenido en cuenta los costes de inversión, los costes de operación y mantenimiento fijos y los costes de energía eléctrica asociados al funcionamiento del ciclo de carga para el tiempo de vida asociado a la planta y para diferentes tasas de inflación.

Hasta ahora, todo el análisis anterior se ha hecho referenciado a un gasto másico unitario de CO₂ de 1 kg/s. En todas las configuraciones de planta analizadas, se obtenía un trabajo en la turbina que rondaba los 100 kJ por cada kg de CO₂. En concreto, el último caso, con la configuración alternativa y el aporte térmico, se tenía un trabajo en la turbina de 105,2 kJ/kg.

Para el análisis económico se considera una planta de 100 MW de potencia. Para conseguir 100 MW de potencia eléctrica en el alternador, considerando un rendimiento de 0,98, la potencia en turbina debe de ser de 102,04 MW, que se consiguen con un gasto másico de CO₂ de 970,1 kg/s.

6.1 Inversión

La primera parte del análisis económico es la inversión inicial. En Appendix D. Preliminary Cost Estimation Data [9] se recogen datos acerca del coste de los equipos del sistema en función de su potencia. El coste de los equipos se muestra en la parte superior de la **tabla 86**. En la parte inferior de la tabla se representa el resto de la inversión, considerando costes asociados a instrumentación, regulación y control, sistemas auxiliares, conexión a la red, obra civil, instalación y comisionado y costes del proyecto. Se estima un porcentaje del total para cada una de las diferentes partes de la inversión [10].

Tabla 86: Costes de inversión de la planta

Costes de inversión	Coste (€)	Equipos	Total
Equipos del ciclo de carga de CO ₂	22.452.200	37,1%	
Equipos del ciclo de NH ₃	20.317.000	33,54%	
Equipos del ciclo de carga	42.769.200	70,64%	
Equipos del ciclo de descarga	10.898.600	17,99%	
Intercambiadores	6.902.400	11,4%	
Total de los equipos	60.570.200	100%	55%[10]
Instrumentación, regulación y control	16.519.000		15%[10]
Sistemas auxiliares	5.506.400		5%[10]
Conexión a la red	5.506.400		5%[10]
Obra civil	11.012.800		10%[10]
Instalación y comisionado	5.506.400		5%[10]
Costes del proyecto	5.506.400		5%[10]

Total	110.127.600
--------------	--------------------

El coste de los equipos de la central de 100 MW de potencia eléctrica de salida se estima en 60.570.200 €, y se considera como el 55% de la inversión inicial. Este valor se utiliza como referencia para la estimación del resto de gastos considerados, llegando a una inversión total de 110.127.600 €.

6.2 Operación y mantenimiento

En los costes de operación y mantenimiento se consideran tres gastos: fluidos de trabajo, mantenimiento y seguros. Los costes asociados a la generación de energía eléctrica se tratan en el punto 6.3 de este estudio (Balance de electricidad). En la **tabla 87** se muestra un resumen de los cálculos de los costes de operación y mantenimiento, presentando en la parte superior los gastos relacionados con los fluidos de trabajo.

En los fluidos de trabajo se considera un gasto tal que cubra la renovación completa de estos cada año, calculando la cantidad necesaria de cada fluido para realizar un ciclo completo de carga y descarga diario, a partir del gasto. El caso del hielo es un caso especial, pues aunque en los intercambios de calor se ha modelado como una corriente, la realidad es que el hielo es un sólido.

Tabla 87: Costes de operación y mantenimiento

	Gasto (kg/s)	Horas	Cantidad	Coste unitario	Coste (€)	Porcen.
Agua	982,7	10	35.377.450 kg	0,0005 €/kg	17.690	36,06%
Hielo	-	5	5.754.500 kg	0,0005 €/kg	2.880	5,86%
CO ₂	970,1	10	242.500 kg	0,1 €/kg	24.250	49,44%
Amoníaco	281,88	5	42.282 kg	0,1 €/kg	4.230	8,62%
Total fluidos					49.050	
Mantenimiento			619.522,2 MWh	5 €/MWh	3.097.600	
Seguros					550.640	
Total					3.697.290	

Para estimar un coste de mantenimiento anual, se parte del coste promedio de mantenimiento de una turbina de gas, que suele estar entre 5,4 – 4,6 (€/MWh) [10]. Para el sistema de estudio, se considera un coste promedio de mantenimiento de 5 €/MWh.

En cuanto al coste de los seguros, se suelen situar entre el 0,25% y 2% del coste de capital [10]. Para este caso, se considera de 0,5%.

El resultado es un gasto total de 3.697.280 € cada año de funcionamiento de la planta.

6.3 Balance de electricidad

En la **tabla 88** se recoge el balance de ingresos y gastos en compra y venta de electricidad en múltiplos de 1000€, para un día representativo de cada mes del año, asumiendo que ese precio se mantiene para todos los días de dicho mes.

En la parte superior se representa en color verde el coste de la compra de electricidad en las 5 horas en las que el ciclo de carga eléctrico se encuentra en funcionamiento. A continuación, se muestran en rojo los ingresos relativos a las 10 horas en las que el ciclo de descarga se encuentra activo. Tras los periodos de carga y descarga se muestra el coste y los ingresos diarios, respectivamente, así como el beneficio diario y el mensual.

Tabla 88: Balance de gastos e ingresos por compra y venta de electricidad.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1º hora de carga	12,82	10,97	8,90	10,58	10,73	6,57	7,25	8,48	8,40	9,62	11,01	13,34
2º hora de carga	12,41	10,46	8,91	10,61	10,31	6,41	7,12	8,32	8,43	9,46	10,65	12,58
3º hora de carga	12,35	10,34	8,21	10,30	9,97	6,15	6,95	8,32	8,48	9,79	10,02	11,93
4º hora de carga	12,56	10,35	8,03	10,27	9,87	6,66	6,99	8,38	8,69	9,58	9,98	11,89
5º hora de carga	12,86	10,42	8,81	10,57	10,02	6,98	7,24	8,41	8,68	9,42	10,70	12,59
Coste diario	63,01	52,55	42,86	52,33	50,91	32,78	35,55	41,91	42,69	47,86	52,35	62,34
1º hora descarga	12,92	12,13	11,03	11,28	11,37	9,56	10,36	10,74	10,89	10,72	12,13	13,18
2º hora descarga	13,20	12,33	11,08	11,21	11,39	9,65	10,57	10,90	10,96	10,71	12,49	13,47
3º hora descarga	12,92	12,15	11,15	10,97	11,38	9,37	10,64	10,60	10,61	10,25	12,28	13,50
4º hora descarga	12,81	12,27	11,16	10,62	11,32	9,31	10,71	10,45	10,52	10,25	12,26	13,43
5º hora descarga	12,74	12,23	11,12	10,49	11,26	9,40	10,59	10,47	10,56	10,55	12,23	13,48
6º hora descarga	13,04	12,31	11,08	10,55	11,24	9,72	10,48	10,18	10,65	11,48	12,55	13,49
7º hora descarga	14,01	12,88	11,24	10,85	11,34	9,90	10,34	10,19	10,86	12,37	13,02	13,82
8º hora descarga	14,93	13,23	11,61	11,35	11,53	9,81	10,39	10,38	11,15	12,27	13,06	13,88
9º hora descarga	14,91	13,37	11,79	11,91	11,98	9,79	10,66	11,31	11,47	11,86	13,13	13,52
10 hora descarga	14,57	13,37	11,76	11,54	11,88	10,05	10,62	11,19	10,77	11,18	13,19	13,00
Ingreso diario	136	126,3	113	110,8	114,7	96,56	105,4	106,4	108,4	111,7	126,3	134,8
Beneficio diario	73,03	73,73	70,15	58,44	63,77	63,78	69,82	64,49	65,74	63,80	73,98	72,44
Número de días	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31
Beneficio Mensual	2263,85	2064,34	2174,69	1753,09	1976,78	1913,43	2164,28	1999,26	1972,12	1977,85	2219,50	2245,52

El gasto diario de energía se sitúa en torno a 45.000 € de media, con unas máximas de 63.340 €/día y 62.340 €/día, en diciembre y enero, respectivamente. Los precios más bajos se encuentran en los meses de verano, estableciendo unos costes mínimos de 32.780 €/día y 35.550 €/día en junio y julio, respectivamente. El resultado es un coste anual de 17.553.170 €.

Los ingresos diarios por venta de electricidad rondan los 115.000 € de media. Al igual que los costes, los valores máximos se sitúan en los meses de invierno, con diciembre y enero como los meses más destacados, con un ingreso de 134.800 €/día y 136.000

€/día, respectivamente. El precio más bajo de venta coincide también con los meses de verano, con un mínimo en los ingresos de 96.560 €/día en junio. El total supone un ingreso anual de 42.277.950 €.

El balance entre la compra y venta de electricidad diaria, es un beneficio de unos 67.000 €/día de media. En total producen un beneficio anual de más de 24 millones de euros.

Beneficio anual: 24.724.778 €

6.3 Coste normalizado de la energía

El coste normalizado de la energía (Levelized cost of Energy “LCOE”) se usa como medida resumen de la competitividad global de las distintas tecnologías de generación. Representa el costo por kilovatio/megavatio hora de construir y operar una planta de generación. En el cálculo de este factor económico se tienen en cuenta los costes de inversión (€/MWh), costes de combustible (€), los costes de operación y mantenimiento fijo y variable (O&M), los costes de financiación, y una tasa de utilización que depende del tipo de tecnología empleada. [8]

La importancia de los factores varía entre tecnologías. Por ejemplo, tecnologías como la generación de energía solar y eólica que no tienen los costos de combustible, y relativamente pequeños costos de operación y mantenimiento, los cambios del LCOE debido a los costes de inversión estimados en función de la capacidad de generación son pequeños. Para las tecnologías con un coste significativo de combustible, tanto en el coste del combustible como las estimaciones de costes de inversión afectan de manera significativa al LCOE.

La **ecuación 32** representa el cálculo de LCOE, donde I es el coste de inversión (€), $L_{energía}$ es el coste de gastos de energía empleada (€), M los gastos de operación y mantenimiento (€), R como gastos de repuestos (€), F, los costes de financiación (€), E, la energía anual producida (MWh/año), r el ratio de descuento y n años de vida.

$$LCOE = \frac{I + L_{energía} + M + R + F}{E \sum_{i=1}^n \frac{1}{(1+r)^i}}$$

Ecuación 32: Coste normalizado de la energía [8]

En la **tabla 89** se presentan los datos necesarios para calcular el LCOE. Se ha considerado una vida útil de 25 años. No se han tenido en cuenta costes de financiación ni de repuestos. En la parte inferior de la tabla se muestran tres valores del LCOE, calculados a partir de un ratio de descuento del 5%, 10% y 15%, respectivamente.

Tabla 89: Resumen de datos para el cálculo de LCOE

	Anual (€/año)	Total (€)
Inversión		110.127.854
Coste de energía	17.553.170	438.829.272
Gastos de operación y mantenimiento	3.697.294	92.389.203
Repuestos	0	0
Financiación	0	0

Energía anual (MWh/año)		313.936
LCOE	r = 5%	144,95 €
LCOE	r = 10%	225,06 €
LCOE	r = 15%	316,04 €

Los valores se encuentran entre los presentados en el documento Electricity Storage Handbook in Collaboration with NRECA, SANDIA REPORT (A. Bradshaw, and W. Gauntlett) [9] para sistemas CAES y PHS de bombeo hidráulico.

7. Conclusiones

El propósito del proyecto era analizar el nuevo tipo de tecnología de almacenamiento de electricidad a gran escala, el almacenamiento electro-térmico de energía, basado en una bomba de calor y tecnologías de motores térmicos que utilizan ciclos transcíticos de CO₂, almacenamiento de calor mediante agua caliente, y la generación de hielo y deshielo en el extremo frío de los ciclos.

El caso básico consistía en dos ciclos de CO₂, uno de carga y otro de descarga, muy parecidos, con un equipo que comprime y otro que expande en cada uno, interactuando con un depósito de agua caliente y otro de hielo. Era una forma sencilla de almacenar energía cuando la tarifa de electricidad era baja, para descargar cuando la tarifa de la electricidad es la alta.

En los intercambios de calor con el foco caliente, se dejó como parámetro libre el gasto másico de agua caliente por cada kg de CO₂, con el objetivo de coordinar posteriormente el gasto másico de agua caliente con el de hielo, para realizar la descarga a la vez. En un primer análisis, después de realizar un tanteo, se consideró un gasto másico de agua caliente de 0,4 kg/s por cada kg de CO₂, igual en la carga y en la descarga, obteniendo un rendimiento en torno al 58%.

Al optimizar el ciclo, mediante el ajuste de la fracción másica del agua caliente, haciendo óptimo el intercambio, el rendimiento subió notablemente, alcanzando un 70% para los valores de presión iniciales, aunque la descarga de los depósitos de hielo y agua caliente no se realizaba al mismo tiempo.

En el segundo sistema de estudio, donde se incorporaba la refrigeración adicional con amoníaco durante la carga, el sistema crecía en complejidad y coste, incorporando más intercambios y equipos, así como un ciclo más a base de amoníaco, buscando regular el gasto másico óptimo de hielo y poder coordinar la carga y descarga completa de los depósitos de agua caliente y hielo.

Al incorporar el ciclo de amoníaco, con las presiones iniciales, el incremento de temperaturas entre la temperatura de saturación del CO₂ a la presión baja de descarga y la de saturación del amoníaco a la presión de baja era de 0,6 K en total, y dejando una diferencia de temperaturas de 0,25 K en cada extremo del intercambio (en la carga y en la descarga), dejaba un incremento de temperaturas en el hielo de 0,1 K.

El balance es una inversión de 20.317.000 € en equipos para incorporar un ciclo que se utiliza en enfriar 0,1 K del hielo, cuando está funcionando con los parámetros de presión establecidos [1]. Además, el resultado global fue un menor rendimiento que en el ciclo básico optimizado.

El hecho de aplicar la configuración alternativa se hizo buscando dos objetivos: conseguir un funcionamiento más desahogado del sistema, sobre todo en la parte que corresponde al intercambio con el foco frío, pues se tenían incrementos de temperatura muy bajos y diferencias de temperatura entre las corrientes del intercambio casi inexistentes, e implementar el uso de las energías renovables, consiguiendo un mayor rendimiento del sistema.

El cambio de presiones se hizo en función de los datos obtenidos en el análisis del ciclo básico, buscando por un lado aumentar rendimiento y trabajo, y por otro un mejor funcionamiento del sistema a costa de una bajada en el rendimiento.

Al incorporar el ciclo térmico, aportando energía de origen renovable desde la central termosolar, el rendimiento mecánico del ciclo aumenta, situándose en el 70%. Además el modo de funcionamiento establecido, combinando 5 horas de carga eléctrica con 5 horas de carga térmica, se consiguen 10 horas de descarga sincronizada de los depósitos de hielo y agua caliente.

Pensando en el punto en el que acaba este estudio, y que podría ser partida de otro, se plantean varias opciones de nuevas modificaciones en la configuración alternativa con aporte térmico. El hielo como medio de almacenamiento que se carga y descarga con dos procesos a temperatura constante es uno de ellos, mientras la incógnita que plantea la regeneración en la carga es otra.

El objetivo del ciclo de carga es transferir el máximo calor posible a los focos con el mínimo trabajo de compresión. La regeneración en la carga tiene un doble efecto contradictorio. Por un lado, el CO_2 se enfría antes de entrar en la turbina hidráulica, desplazando la línea de expansión a la izquierda, aumentando el calor de evaporación. Por otro lado, el calor que se absorbe se emplea en la evaporación, situando el intercambio entre la carga del hielo y la entrada al compresor, disminuyendo el calor que se transmite al hielo. Esto plantea si la inclusión de la regeneración es buena o no y si la localización es la correcta.

En el caso en el que el calor ganado al desplazar la línea de expansión a la izquierda es mayor al perdido en la entrada del compresor, la regeneración actual tendría resultados positivos.

Otra posibilidad es la evaporación completa en el intercambio con el foco frío, de forma que la entrada en la regeneración sea el punto de vapor saturado. El CO_2 se calienta antes de entrar en el compresor, desplazando la línea de compresión a la derecha, obteniendo una temperatura de salida del compresor más alta, que también proporcionaría un aumento del calor transferido en el foco caliente. Al desplazar la línea de compresión a la derecha, aumenta el trabajo de compresión, pues las líneas de presión constante se alejan.

El nuevo parámetro de presión de baja en el ciclo de descarga de CO_2 , era más alto al original, bajando el trabajo en turbina y disminuyendo el rendimiento. Tenía como objetivo conseguir una mayor distancia entre presiones pues la condensación y evaporación del CO_2 se desarrollan a temperatura constante, y el rango de temperaturas del hielo es mínimo. Existe la posibilidad de buscar un fluido distinto al hielo en el almacenamiento, que cambie de fase con el CO_2 , almacenando energía a temperatura constante sin necesitar distancia entre las presiones de carga y descarga.

En lo referente a las energías renovables, también sería interesante estudiar cómo implementar otras tecnologías. Como algunas ideas, podría realizarse un ciclo de carga eléctrico mediante energía eólica o solar fotovoltaica, o aprovechar energía geotérmica como aporte térmico.

Referencias

1. M. Mercangöz, J. Hemrle, L. Kaufmann, A. Z'Graggen, Ch. Ohler, Electrothermal energy storage with transcritical CO₂ cycles, *Elsevier*, 2012. Energy 45 (2012) 407-415.
2. M. Morandin, F. Maréchal, M. Mercangöz, F. Buchter, Conceptual design of a thermo-electrical energy storage system based on heat integration of thermodynamic cycles - Part A: Methodology and base case, *Elsevier*, 2012. Energy 45 (2012) 375-385.
3. M. Morandin, F. Maréchal, M. Mercangöz, F. Buchter, Conceptual design of a thermo-electrical energy storage system based on heat integration of thermodynamic cycles - Part B: Methodology and base case, *Elsevier*, 2012. Energy 45 (2012) 386-396.
4. Manuel Rodríguez. Refrigeración con amoníaco: aplicaciones, funcionamiento y propiedades. Revista Digital.
5. Red Eléctrica de España. Precio medio del día: Media aritmética de los precios del día en función del tipo de tarifa.
6. Principales Equipos y sistemas en centrales CCP. Colección Operación y mantenimiento de centrales termo solares CCP. Capítulo 1. Renovetec
7. Sistema HTF en centrales termo solares. Capítulo 1. Renovetec
8. Levelized Cost of New Generation Resources in the Annual Energy Outlook, 2013, Independent Statistics and Analysis, U.S Energy Information Administration
9. Appendix D. Preliminary Cost Estimation Data
10. Departamento de Ingeniería Energética, Escuela Técnica Superior de Ingenieros, Universidad de Sevilla. Evaluación económica instalaciones cogeneración, Cogeneración, 4º GIE.
11. A. Bradshaw, and W. Gauntlett, Electricity Storage Handbook in Collaboration with NRECA, SANDIA REPORT, 2013. Akhil, G. Huff, A. Currier, B. Kaun, D. Rastler, S. Bingqing Chen, A. Cotter.

