

Máster Universitario en  
Ingeniería Industrial

## Trabajo de Fin de Máster

# Sistema inteligente para la gestión energética de instalaciones ACS en hoteles

Autor:

Marlon Llano Suárez

Tutor:

Dr. Juan Albino Méndez Pérez

Septiembre 2020

La publicación de este Trabajo Fin de Máster solo implica que el estudiante ha obtenido al menos la nota mínima exigida para superar la asignatura correspondiente, no presupone que su contenido sea correcto, aunque si aplicable. En este sentido, la ULL no posee ningún tipo de responsabilidad hacia terceros por la aplicación total o parcial de los resultados obtenidos en este trabajo. También pone en conocimiento del lector que, según la ley de protección intelectual, los resultados son propiedad intelectual del alumno, siempre y cuando se haya procedido a los registros de propiedad intelectual o solicitud de patentes correspondientes con fecha anterior a su publicación.

*Un enorme agradecimiento al equipo técnico del Hotel Ritz-Carlton Abama y en especial su Director de Ingeniería D. Juan Francisco Acosta.*

# Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>12</b>
1.1. Resumen . . . . .	12
1.2. Abstract . . . . .	12
1.3. Hipótesis de partida . . . . .	13
1.4. Alcance . . . . .	13
1.5. Objetivos . . . . .	13
<b>2. Gestión energética en edificios</b>	<b>15</b>
2.1. Panorama energético europeo. . . . .	15
2.2. Panorama energético español . . . . .	16
2.2.1. Políticas de eficiencia energética nacionales . . . . .	17
2.2.2. Políticas de eficiencia energética autonómicas . . . . .	18
2.3. Eficiencia energética en los edificios . . . . .	18
2.3.1. Panorama energético de la industria hotelera . . . . .	20
2.3.2. Calefacción/Aire acondicionado y agua caliente sanitaria en instalaciones hoteleras . . . . .	22
<b>3. Modelado y simulación del proceso</b>	<b>25</b>
3.1. Producción de Agua Caliente Sanitaria . . . . .	26
3.1.1. Producción instantánea . . . . .	26
3.1.2. Producción con acumulación . . . . .	27
3.2. La bomba de calor . . . . .	30
3.2.1. Modelado de la bomba de calor . . . . .	31
3.3. Intercambiadores de calor . . . . .	33
3.3.1. Modelado del intercambiador de calor . . . . .	34
3.4. Depósito de almacenamiento de agua caliente sanitaria . . . . .	37
3.4.1. Modelado del depósito de almacenamiento de ACS . . . . .	37
3.5. Bombas de circulación . . . . .	39
3.6. Tuberías . . . . .	40
3.7. Presión . . . . .	41
<b>4. Análisis energético de una instalación real</b>	<b>43</b>
4.1. Descripción de las instalaciones de producción de agua caliente sanitaria en la zona de villas del Ritz-Carlton Abama . . . . .	44
4.1.1. Bomba de calor WWB0900XHL . . . . .	45
4.1.2. Bombas de impulsión Grundfos . . . . .	46
4.1.3. Intercambiador de calor Alfa-Laval . . . . .	47
4.1.4. Bombas de calentamiento Grundfos . . . . .	47
4.1.5. Depósito acumulador . . . . .	48
4.1.6. Bombas de retorno Grundfos . . . . .	48

4.2. Análisis energético de la instalación actual . . . . .	49
4.3. Repercusión del caudal de retorno sobre la instalación . . . . .	51
4.4. Repercusión de la temperatura de distribución sobre la instalación . . . . .	52
4.5. Repercusión de la temperatura del depósito de ACS sobre la instalación . . . . .	54
4.6. Repercusión del caudal primario del intercambiador sobre la instalación . . . . .	58
4.7. Repercusión de la bomba de calor sobre la instalación . . . . .	60
4.8. Gasto térmico asociado a la distribución de ACS . . . . .	62
<b>5. Propuesta de una política de gestión energética eficiente en instalaciones de ACS</b>	<b>65</b>
5.1. Discretización de los intervalos de consumo de ACS . . . . .	66
5.2. Política de gestión No. 1 . . . . .	68
5.3. Política de gestión No. 2 . . . . .	71
5.3.1. Preparación del servicio matutino . . . . .	71
5.3.2. Máxima demanda matutina . . . . .	72
5.3.3. Consumo bajo vespertino . . . . .	74
5.3.4. Máxima demanda vespertina . . . . .	76
5.3.5. Consumo bajo nocturno . . . . .	79
5.4. Política de gestión No. 3 . . . . .	81
5.5. Legionella, su tratamiento y repercusión económica sobre la instalación . . . . .	82
<b>6. Diseño de un sistema inteligente para la gestión energética en instalaciones de ACS</b>	<b>88</b>
6.1. La lógica difusa como herramienta para el control de sistemas . . . . .	89
6.2. Diseño del sistema de gestión . . . . .	90
6.2.1. Variables de salida del sistema . . . . .	91
6.2.2. Variables de entrada al sistema . . . . .	99
6.3. Generación de reglas del sistema de inferencia . . . . .	104
<b>7. Resultados</b>	<b>107</b>
7.1. Resultados de las simulaciones . . . . .	107
7.1.1. Horario de madrugada . . . . .	107
7.1.2. Transcurso del horario de madrugada a la preparación del servicio matutino. . . . .	109
7.1.3. Horario vespertino donde el consumo de la instalación es bajo . . . . .	111
7.1.4. Horario de servicio vespertino . . . . .	113
7.2. Discusión de resultados finales . . . . .	116
<b>8. Conclusiones</b>	<b>118</b>
8.1. Conclusiones . . . . .	119
<b>9. Líneas abiertas</b>	<b>120</b>
<b>10. Anexos</b>	<b>121</b>
<b>11. Presupuesto</b>	<b>123</b>
11.1. Precios unitarios . . . . .	123
11.2. Precios descompuestos . . . . .	123
11.3. Mediciones y presupuesto . . . . .	125
11.4. Resumen general . . . . .	125
<b>Bibliografía</b>	<b>126</b>

# Índice de tablas

2.1. Consumo energético del sector terciario español . . . . .	20
3.1. Variables de entrada y salida en el modelado de la bomba de calor . . . . .	31
3.2. Variables de entrada de la simulación . . . . .	32
3.3. Simulación de calentamiento no. 1 . . . . .	33
3.4. Simulación de calentamiento no. 2 . . . . .	33
3.5. Puertos del bloque de la bomba en Simscape . . . . .	40
3.6. Puertos del bloque que modela las tuberías en Simscape . . . . .	41
3.7. Características internas de las tuberías en Simscape . . . . .	41
3.8. Puertos del bloque de presión en Simscape . . . . .	42
4.1. Características del motor de la bomba de impulsión . . . . .	47
4.2. Intercambiador de calor calle 1-3 . . . . .	47
4.3. Intercambiadores de calor calle 4 . . . . .	47
4.4. Características del motor de la bomba de calentamiento . . . . .	47
4.5. Características del motor de la bomba de retorno . . . . .	48
4.6. Punto de operación actual de la instalación de ACS del hotel Abama . . . . .	49
4.7. Punto de operación fijo con caudal de retorno variable . . . . .	51
4.8. Resultado de ahorro en las simulaciones variando el caudal de retorno . . . . .	52
4.9. Punto de operación fijo con temperatura de distribución variable . . . . .	54
4.10. Resultado de ahorro en las simulaciones variando el caudal de retorno . . . . .	55
4.11. Variación del punto de consigna del tanque acumulador. Simulación 1 . . . . .	55
4.12. Variación del punto de consigna del tanque acumulador. Simulación 2 . . . . .	56
4.13. Variación del punto de consigna del tanque acumulador. Simulación 3 . . . . .	56
4.14. Variación del punto de consigna del tanque acumulador. Simulación 2 . . . . .	57
4.15. Variación del punto de consigna del caudal primario . . . . .	60
4.16. Gasto asociado a la bomba de calor WWB0900XHL . . . . .	60
4.17. Relación entre temperatura del primario y tiempo de funcionamiento de la bomba de calentamiento . . . . .	61
4.18. Relación entre temperatura del primario y la potencia eléctrica consumida por la bomba de calor . . . . .	61
4.19. Pérdidas térmicas asociadas a la variación de la temperatura de distribución. Caudal de retorno fijo en 1.1 lit/seg . . . . .	64
4.20. Pérdidas térmicas asociadas a la variación del caudal de retorno. Temperatura de distribución fija en 52 °C . . . . .	64
5.1. Políticas de gestión aplicadas con una breve descripción . . . . .	67
5.2. Variables de proceso modificadas . . . . .	68
5.3. Punto de operación para el horario 22:00 a 6:00 . . . . .	68
5.4. Consumo energético en el horario 22:00 a 6:00 con política de gestión . . . . .	70
5.5. Consumo energético en el horario 22:00 a 6:00 con política de gestión . . . . .	70

5.6. Consumo energético en el horario 22:00 a 6:00 sin política de gestión . . . . .	70
5.7. Comparación de gastos entre la política actual y la política de gestión durante las 8 horas de estudio (de 22:00 a 6:00 horas) . . . . .	70
5.8. Comparación de gastos entre la política actual y la política de gestión No.1 durante un día completo (24 horas) . . . . .	70
5.9. Consumo energético en el horario 5:40 a 7:00 horas . . . . .	71
5.10. Tiempo de calentamiento del circuito primario . . . . .	71
5.11. Punto de operación para el horario 7:00 a 9:00 . . . . .	72
5.12. Consumo energético en el horario 7:00 a 9:00 horas . . . . .	73
5.13. Punto de operación para el horario entre las 9:00 y las 18:00 horas . . . . .	74
5.14. Consumo energético en el horario 9:00 a 18:00 horas . . . . .	75
5.15. Punto de operación para el horario entre las 18:00 y las 20:00 horas . . . . .	77
5.16. Consumo energético en el horario 18:00 a 20:00 horas . . . . .	78
5.17. Punto de operación para el horario entre las 20:00 y las 22:00 horas . . . . .	79
5.18. Consumo energético en el horario 20:00 a 22:00 horas . . . . .	80
5.19. Consumo energético de la Política de gestión No. 2(desde las 6:00 horas hasta las 22:00 horas) . .	81
5.20. Consumo energético en el horario 6:00 a 22:00 sin política de gestión . . . . .	81
5.21. Comparación de gastos entre la política actual y la política de gestión No. 2 durante las 16 horas de estudio . . . . .	81
5.22. Comparación de gastos diarios entre la gestión actual y la política de ahorro No. 3 . . . . .	81
5.23. Comparación de gastos mensuales entre la gestión actual y la política de ahorro No. 3 . . . . .	81
5.24. Comparación de gastos anuales entre la gestión actual y la política de ahorro No. 3 . . . . .	82
5.25. Punto de operación del sistema para la operación de pasteurización . . . . .	85
5.26. Tiempos consumidos por la operación de pasteurización . . . . .	86
5.27. Energía consumida durante la operación de pasteurización . . . . .	86
5.28. Coste asociado a la operación de pasteurización . . . . .	86
5.29. Comparativa de costes anuales incluyendo el propuesta de desinfección . . . . .	87
6.1. Punto de consigna del depósito de acumulación . . . . .	92
6.2. Variable: SPDEP. Valor lingüístico/Regla semántica . . . . .	92
6.3. Punto de consigna de la válvula mezcladora . . . . .	93
6.4. Variable: SPDIST. Valor lingüístico/Regla semántica . . . . .	94
6.5. Punto de consigna del caudal de retorno . . . . .	95
6.6. Variable: SPDIST. Valor lingüístico/Regla semántica . . . . .	95
6.7. Punto de consigna de la bomba de calor . . . . .	96
6.8. Variable: SPBC. Valor lingüístico/Regla semántica . . . . .	97
6.9. Punto de consigna de la válvula de 3 vías del primario . . . . .	98
6.10. Variable: SPV3V. Valor lingüístico/Regla semántica . . . . .	98
6.11. Hora del día . . . . .	99
6.12. Variable: HORA. Valor lingüístico/Regla semántica . . . . .	100
6.13. Consumo instantáneo . . . . .	101
6.14. Variable: HORA. Valor lingüístico/Regla semántica . . . . .	101
6.15. Error . . . . .	102
6.16. Variable: ERRORV1. Valor lingüístico/Regla semántica . . . . .	102
6.17. Rango de temperaturas del depósito . . . . .	103
6.18. Variable: DEPVILLA1. Valor lingüístico/Regla semántica . . . . .	103
7.1. Consumo energético en el horario 22:00 a 6:00 horas con automatización de la política de gestión	116
7.2. Comparación del rendimiento entre el sistema automatizado y el manual para el horario 22:00-6:00	116

7.3. Consumo energético en el horario 6:00 a 22:00 con automatización de la política de gestión . . .	116
7.4. Comparación del rendimiento entre el sistema automatizado y el manual para el horario 6:00-22:00	117
7.5. Comparación de gastos anuales entre la gestión actual y la propuesta automatizada sin tener en cuenta los ciclos manuales trimestrales contra la legionella. . . . .	117
7.6. Comparación de gastos anuales entre la gestión actual y la propuesta automatizada teniendo en cuenta los ciclos manuales trimestrales contra la legionella. . . . .	117
7.7. Ahorro estimado con la aplicación del método de gestión al conjunto de las Villas. . . . .	117
7.8. Ahorro estimado en términos financieros. . . . .	117



# Índice de figuras

2.1. Emisiones de GEI en la Unión Europea. <i>Fuente: Comisión Europea</i> . . . . .	15
2.2. Consumo energético en los edificios. <i>Fuente: MITECO/IDAE</i> . . . . .	19
2.3. Consumo de energía final en el sector terciario español. <i>Fuente: EUROSTAT</i> . . . . .	20
2.4. Consumo anual de un hotel litoral. <i>Fuente: Certificados energéticos.com</i> . . . . .	21
2.5. Consumo anual de un hotel urbano. <i>Fuente: Certificados energéticos.com</i> . . . . .	21
2.6. Desagregación de consumos energéticos en la industria hotelera. <i>Fuente: EUROSTAT</i> . . . . .	23
3.1. Separación entre circuito primario y secundario. <i>Fuente: Propia</i> . . . . .	26
3.2. Producción instantánea de ACS. Regulación en primario y secundario. <i>Fuente: IDAE/Guía técnica. Agua caliente sanitaria central</i> . . . . .	27
3.3. Producción con acumulador. Regulación en primario y secundario. <i>Fuente: IDAE/Guía técnica. Agua caliente sanitaria central</i> . . . . .	28
3.4. Conexión de depósitos verticales esbeltos en serie. <i>Fuente: IDAE/Guía técnica. Agua caliente sanitaria central</i> . . . . .	29
3.5. Esquema de funcionamiento que permite el funcionamiento en serie. <i>Fuente: IDAE/Guía técnica. Agua caliente sanitaria central</i> . . . . .	29
3.6. Esquema de funcionamiento de una bomba de calor. <i>Fuente: Gasfríoalor.com</i> . . . . .	30
3.7. Modelado y simulación en Simulink de una bomba de calor. <i>Fuente: Propia</i> . . . . .	32
3.8. Resultados de una simulación en Simulink de una bomba de calor. <i>Fuente: Propia</i> . . . . .	32
3.9. Simulación de calentamiento de una masa de agua. <i>Fuente: Propia</i> . . . . .	33
3.10. Efectividad en intercambiadores de calor. <i>Fuente: [39]</i> . . . . .	36
3.11. Modelado de un intercambiador de calor Matlab. <i>Fuente: Propia</i> . . . . .	36
3.12. Modelo del depósito de acumulación en Simscape. <i>Fuente: Propia</i> . . . . .	39
3.13. Modelo de las bombas de circulación de Simscape. <i>Fuente: Propia</i> . . . . .	40
3.14. Modelo de las tuberías en Simscape. <i>Fuente: Propia</i> . . . . .	40
3.15. Modelo de una tubería con pérdidas de calor en Simscape. <i>Fuente: Propia</i> . . . . .	41
3.16. Modelo de una tubería con pérdidas de calor en Simscape. <i>Fuente: Propia</i> . . . . .	42
3.17. Esquema de una instalación de agua caliente sanitaria genérica. <i>Fuente: Propia</i> . . . . .	42
4.1. Circuito primario de calentamiento de ACS. <i>Fuente: [20]</i> . . . . .	45
4.2. Bomba de calor Booster. <i>Fuente: Hotel Abama</i> . . . . .	45
4.3. Características técnicas de la bomba de calor. <i>Fuente: Hotel Abama</i> . . . . .	46
4.4. Motor de bombas de impulsión del circuito primario. <i>Fuente: Hotel Abama</i> . . . . .	46
4.5. Esquemático de estratificación dentro de un depósito de ACS. <i>Fuente: [4]</i> . . . . .	48
4.6. Subestación de producción Calle 1. <i>Fuente: SCADA Honeywell-Abama</i> . . . . .	49
4.7. Energía diaria consumida por la Subestación de producción Calle 1. <i>Fuente: Propia</i> . . . . .	50
4.8. Consumo de la subestación de producción por porcentos. <i>Fuente: Propia</i> . . . . .	50
4.9. Repercusión del caudal de retorno sobre el depósito. <i>Fuente: Propia</i> . . . . .	52
4.10. Repercusión de la temperatura de distribución sobre el depósito. <i>Fuente: Propia</i> . . . . .	53

4.11. Repercusión de la temperatura del depósito sobre la instalación. <i>Fuente: Propia</i> . . . . .	55
4.12. Repercusión de la temperatura del depósito sobre la instalación cuando existe consumo final <i>Fuente: Propia</i> . . . . .	57
4.13. Consumo instantáneo de ACS <i>Fuente: Propia</i> . . . . .	57
4.14. Variación en el caudal primario del intercambiador de calor. Simulación 1 <i>Fuente: Propia</i> . . . . .	58
4.15. Variación en el caudal primario del intercambiador de calor. Simulación 2 <i>Fuente: Propia</i> . . . . .	59
4.16. Variación en el caudal primario y su repercusión en los tiempos de subida de la señal controlada. <i>Fuente: Propia</i> . . . . .	59
4.17. Variación en la temperatura del primario y su repercusión <i>Fuente: Propia</i> . . . . .	61
4.18. Comparación entre las bombas de calentamiento y la bomba de calor <i>Fuente: Propia</i> . . . . .	62
4.19. Aislamiento térmico en tuberías de ACS <i>Fuente: [24]</i> . . . . .	62
4.20. Pérdidas térmicas asociadas a la variación de la temperatura de distribución. <i>Fuente: Propia</i> . . . . .	63
4.21. Pérdidas térmicas asociadas a la variación del caudal de retorno. <i>Fuente: Propia</i> . . . . .	63
5.1. Temperatura del depósito durante el horario nocturno. <i>Fuente: Propia</i> . . . . .	67
5.2. Temperatura del depósito durante el horario nocturno. <i>Fuente: Propia</i> . . . . .	69
5.3. Arranques de la bomba de calentamiento durante el horario nocturno. <i>Fuente: Propia</i> . . . . .	69
5.4. Temperatura del depósito entre las 5:40 y las 7:00 horas. <i>Fuente: Propia</i> . . . . .	72
5.5. Temperatura del depósito durante el servicio matutino. <i>Fuente: Propia</i> . . . . .	73
5.6. Consumo instantáneo de ACS. <i>Fuente: Propia</i> . . . . .	73
5.7. Temperatura del agua de retorno. <i>Fuente: Propia</i> . . . . .	74
5.8. Temperatura del depósito durante el reposo entre las 9:00 y las 18:00 horas. <i>Fuente: Propia</i> . . . . .	75
5.9. Caudal de consumo instantáneo entre las 9:00 y las 18:00 horas. <i>Fuente: Propia</i> . . . . .	75
5.10. Arranques de las bombas de calentamiento entre las 9:00 y las 18:00 horas. <i>Fuente: Propia</i> . . . . .	76
5.11. Temperatura del caudal de retorno durante el reposo entre las 9:00 y las 18:00 horas. <i>Fuente:</i> <i>Propia</i> . . . . .	76
5.12. Temperatura del depósito de acumulación entre las 18:00 y las 20:00 horas. <i>Fuente: Propia</i> . . . . .	77
5.13. Consumo instantáneo de ACS entre las 18:00 y las 20:00 horas. <i>Fuente: Propia</i> . . . . .	77
5.14. Arranque de las bombas de calentamiento entre las 18:00 y las 20:00 horas. <i>Fuente: Propia</i> . . . . .	78
5.15. Temperatura del caudal de retorno entre las 18:00 y las 20:00 horas. <i>Fuente: Propia</i> . . . . .	78
5.16. Temperatura del depósito entre las 20:00 y las 22:00 horas. <i>Fuente: Propia</i> . . . . .	79
5.17. Caudal instantáneo de consumo entre las 20:00 y las 22:00 horas. <i>Fuente: Propia</i> . . . . .	80
5.18. Arranques de la bomba de calentamiento entre las 20:00 y las 22:00 horas. <i>Fuente: Propia</i> . . . . .	80
5.19. Comparativa energética. <i>Fuente: Propia</i> . . . . .	82
5.20. Infección por legionelosis asociadas a hoteles y no-hoteles. <i>Fuente: [34]</i> . . . . .	83
5.21. Infección por legionelosis asociadas a hoteles y no-hoteles. <i>Fuente: [34]</i> . . . . .	84
5.22. Tiempo de calentamiento del circuito secundario durante operación de pasteurización. <i>Fuente:</i> <i>Propia</i> . . . . .	85
5.23. Temperatura de retorno durante la operación de pasteurización. <i>Fuente: Propia</i> . . . . .	85
5.24. Comparativa energética anual. <i>Fuente: Propia</i> . . . . .	87
5.25. Comparativa energética anual incluyendo la propuesta de desinfección. <i>Fuente: Propia</i> . . . . .	87
6.1. Diagrama del sistema de inferencian con las variables de entrada y salida. <i>Fuente: Propia</i> . . . . .	91
6.2. Variable difusa SPDEP. <i>Fuente: Propia</i> . . . . .	93
6.3. Variable difusa SPDIST. <i>Fuente: Propia</i> . . . . .	94
6.4. Variable difusa SPDIST. <i>Fuente: Propia</i> . . . . .	96
6.5. Variable difusa SPBC. <i>Fuente: Propia</i> . . . . .	97
6.6. Variable difusa SPV3V. <i>Fuente: Propia</i> . . . . .	99
6.7. Variable difusa HORA. <i>Fuente: Propia</i> . . . . .	100

6.8. Variable difusa CONSV1. <i>Fuente: Propia</i> . . . . .	101
6.9. Variable difusa ERRORV1. <i>Fuente: Propia</i> . . . . .	103
6.10. Variable difusa DEPVILLA1. <i>Fuente: Propia</i> . . . . .	104
6.11. Esbozo del sistema de gestión difuso. <i>Fuente: Propia</i> . . . . .	104
6.12. Superficies de control de la variable: SPDEP. . . . .	105
6.13. Superficie de control de la variable: SPDIST. <i>Fuente: Propia</i> . . . . .	105
6.14. Superficie de control de la variable: SPRET. <i>Fuente: Propia</i> . . . . .	105
6.15. Superficies de control de las variable: SPBC(a) y SPV3V(b). . . . .	106
7.1. Evolución temporal de la señal de error. Simulación 1. <i>Fuente: Propia</i> . . . . .	108
7.2. Evolución temporal de la temperatura dentro del depósito. <i>Fuente: Propia</i> . . . . .	108
7.3. Evolución temporal de la consigna de temperatura del depósito. <i>Fuente: Propia</i> . . . . .	108
7.4. Evolución temporal de la consigna de la bomba de calor. <i>Fuente: Propia</i> . . . . .	109
7.5. Evolución temporal de la consigna de la válvula de 3 vías del primario. <i>Fuente: Propia</i> . . . . .	109
7.6. Evolución temporal de la señal de error. Simulación 2. <i>Fuente: Propia</i> . . . . .	110
7.7. Evolución temporal de la temperatura dentro del depósito. Simulación 2. <i>Fuente: Propia</i> . . . . .	110
7.8. Evolución temporal de la consigna de temperatura del depósito. Simulación 2. <i>Fuente: Propia</i> . . . . .	110
7.9. Evolución temporal de la consigna de la bomba de calor. Simulación 2. <i>Fuente: Propia</i> . . . . .	111
7.10. Evolución temporal de la consigna de la válvula de 3 vías del primario. Simulación 2. <i>Fuente: Propia</i> . . . . .	111
7.11. Evolución temporal de la consigna de la señal de error. Simulación 3. <i>Fuente: Propia</i> . . . . .	111
7.12. Evolución temporal de la temperatura dentro del depósito. Simulación 3. <i>Fuente: Propia</i> . . . . .	112
7.13. Evolución temporal de la consigna de temperatura del depósito. Simulación 3. <i>Fuente: Propia</i> . . . . .	112
7.14. Evolución temporal de la consigna de la bomba de calor. Simulación 3. <i>Fuente: Propia</i> . . . . .	112
7.15. Evolución temporal de la consigna de la válvula de 3 vías del primario. Simulación 3. <i>Fuente: Propia</i> . . . . .	113
7.16. Evolución temporal de la señal de error. Simulación 4. <i>Fuente: Propia</i> . . . . .	113
7.17. Evolución temporal de la señal de temperatura dentro del depósito. Simulación 4. <i>Fuente: Propia</i> . . . . .	113
7.18. Evolución temporal de la consigna de temperatura del depósito. Simulación 4. <i>Fuente: Propia</i> . . . . .	114
7.19. Evolución temporal de la consigna de la bomba de calor. Simulación 4. <i>Fuente: Propia</i> . . . . .	114
7.20. Evolución temporal de la consigna de la válvula de 3 vías del primario. Simulación 4. <i>Fuente: Propia</i> . . . . .	114
7.21. Evolución temporal del consumo instantáneo en la instalación. Simulación 5. <i>Fuente: Propia</i> . . . . .	115
7.22. Evolución temporal de la consigna de caudal de retorno. Simulación 5. <i>Fuente: Propia</i> . . . . .	115
7.23. Evolución temporal de la temperatura del caudal de retorno. Simulación 5. <i>Fuente: Propia</i> . . . . .	116
10.1. Reglas de inferencia del sistema difuso. Simulación 5. <i>Fuente: Propia</i> . . . . .	122
10.2. Script de Matlab para modelar el intercambiador de calor. <i>Fuente: Propia</i> . . . . .	122

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Resumen

Este proyecto se enmarca sobre los pilares de la legislación europea, nacional y comunitaria sobre eficiencia energética en edificios. Dentro del amplio espectro de contenido que engloba esta temática, se profundizará en las instalaciones térmicas debido al elevado porcentaje que representan en el reparto final de la energía. Particularmente, las instalaciones centralizadas de generación de agua caliente sanitaria (ACS) tendrán el foco principal de atención. Esto se debe a la carencia que presentan estos sistemas de un método que gestione los recursos energéticos asignados a la propia instalación, siendo por tanto, poco eficientes. Para abordar esta problemática primeramente se creará un modelo funcional de una instalación de ACS, luego se realizará un estudio sobre el modelo de gestión actual aplicado y las pérdidas energéticas que trae consigo. Una vez logrado esto, se realizarán propuestas de gestión de la instalación para mejorar sus deficiencias. Finalmente, habiendo comprobado que las propuestas realizadas mejoran el rendimiento de la instalación, se diseñará un sistema inteligente de gestión basado en lógica difusa que administre los recursos de la misma de forma automática.

**Palabras clave:** Eficiencia energética, instalaciones térmicas, agua caliente sanitaria, gestión de instalaciones, lógica difusa.

### 1.2. Abstract

This project is based on the pillars of European, national and community legislation on energy efficiency in buildings. Within the broad spectrum of content that encompasses this topic, thermal installations will be studied in depth due to the high percentage they represent in the final distribution of energy. In particular, centralized facilities for the generation of domestic hot water (DHW) will be the main focus of attention. This is due to the lack of these systems of a method that manages the energy resources assigned to the installation itself, being therefore not very efficient. To address this problem, first a functional model of a DHW installation will be created, then a study will be carried out on the current management model applied and the energy losses that it entails. Once this is achieved, proposals will be made for the management of the facility to improve its deficiencies. Finally, having verified that the proposals made improve the performance of the installation, an intelligent management system based on fuzzy logic will be designed to manage its resources automatically.

**Keywords:** Energy efficiency, thermal facilities, domestic hot water, facilities management, fuzzy logic.

### 1.3. Hipótesis de partida

Las gran mayoría de instalaciones de agua caliente sanitaria centralizada carecen de un sistema de gestión de los puntos de consigna. Si se diseñara un procedimiento que se encargue de modificar las consignas de la instalación de acuerdo a la demanda de consumo final, este se vería reflejado en forma de ahorro energético y monetario en el sistema de generación de ACS.

### 1.4. Alcance

Dentro del alcance del presente proyecto está comprendido el modelado y la simulación en el software Matlab de una instalación de agua caliente sanitaria centralizada. Un análisis energético de la instalación para encontrar sus puntos débiles y deficiencias, reconocimiento de las principales variables del proceso que mayor impacto tienen sobre el desempeño de la misma. La identificación de estas como variables de interés sujetas a modificación con el objetivo de conmutar el punto de operación del sistema de agua caliente. Realizar propuestas de planes de gestión de la instalación con el fin de mejorar su rendimiento energético; y finalmente diseñar un sistema inteligente basado en lógica difusa que ayude a la toma de decisiones acerca de la modificación de los valores de consigna de las variables del proceso.

### 1.5. Objetivos

Para la planificación del proyecto se definieron una serie de objetivos generales que vienen listados a continuación:

1. Estudio de la normativa vigente en cuanto a eficiencia energética en edificios.
2. Modelado y simulación de una instalación de generación de agua caliente sanitaria centralizada.
3. Estudio energético de una instalación de generación de agua caliente sanitaria centralizada.
4. Mejorar el rendimiento de la instalación a través de la modificación de los puntos de consignas del conjunto de variables embebidas en el proceso.
5. Diseñar un método que ayude a la toma de decisiones en lo que respecta a la modificación de los puntos de consigna.

Para cada uno de los objetivos definidos con anterioridad, se listan una serie de objetivos o tareas específicas que de llegarse a cumplir, darán por finalizado satisfactoriamente el objetivo general trazado.

- Estudio de la normativa vigente en cuanto a eficiencia energética en edificios.
  1. Estudio de la normativa europea en cuanto a energía y eficiencia energética.
  2. Estudio de la normativa nacional de eficiencia energética en edificios.
  3. Estudio de las políticas trazadas por la Comunidad Autónoma de Canarias con respecto a la temática de la eficiencia energética.
- Modelado y simulación de una instalación de generación de agua caliente sanitaria centralizada.
  1. Estudio de una instalación de agua caliente sanitaria, sus principales componentes y configuraciones de operación.
  2. Modelado mediante software de cada componente de la instalación.
  3. Parametrización de los componentes.
  4. Simulación del comportamiento de una instalación de agua caliente sanitaria.

- Estudio energético de una instalación de generación de agua caliente sanitaria centralizada.
  1. Identificación de los elementos de mayor consumo energético de la instalación.
  2. Cuantificación de la energía consumida por dichos elementos durante un período definido de tiempo.
  3. Identificación de las principales variables del proceso.
  4. Estudio de la repercusión que conlleva la modificación de dichas variables sobre el comportamiento temporal del proceso.
- Mejorar el rendimiento de la instalación a través de la modificación de los puntos de consignas del conjunto de variables embebidas en el proceso.
  1. Discretizar los intervalos de consumo diario de ACS.
  2. Realizar propuestas para gestionar los puntos de consigna.
  3. Cuantificación de la energía consumida por cada propuesta realizada.
  4. Comparación energética entre el sistema de planificación actual y las propuestas realizadas.
  5. Evaluación de las ventajas presentadas.
- Diseñar un método que ayude a la toma de decisiones en lo que respecta a la modificación de los puntos de consigna.
  1. Creación de las variables difusas de entrada y salida del sistema para una instalación de ACS.
  2. Creación del sistema de reglas específico de la instalación a controlar.
  3. Evaluar el desempeño del sistema de decisión sobre la instalación de ACS.

## Capítulo 2

# Gestión energética en edificios

### 2.1. Panorama energético europeo.

Este año viene a finalizar un período de tiempo acordado por los dirigentes de la Unión Europea en 2007 [30] en el que se establecieron las siguientes metas:

- 1. Reducir un 20 por ciento las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) respecto a los niveles de 1990.
- 2. Aumentar un 20 por ciento las energías renovables en la Unión Europea.
- 3. Mejorar la eficiencia energética un 20 por ciento.

En 2018, como parte del paquete de medidas “Energía limpia para todos los europeos”, se estableció un nuevo objetivo consistente en la reducción del consumo de energía en al menos un 32,5 % en el horizonte 2030. Las medidas de eficiencia energética se consideran cada vez más un medio no solo para conseguir un abastecimiento de energía sostenible, reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, mejorar la seguridad del suministro y reducir los costes de las importaciones, sino también para fomentar la competitividad de la Unión. Por ello, la eficiencia energética es una de las prioridades estratégicas de la Unión de la Energía y la Unión fomenta el principio de “anteponer la eficiencia energética”.

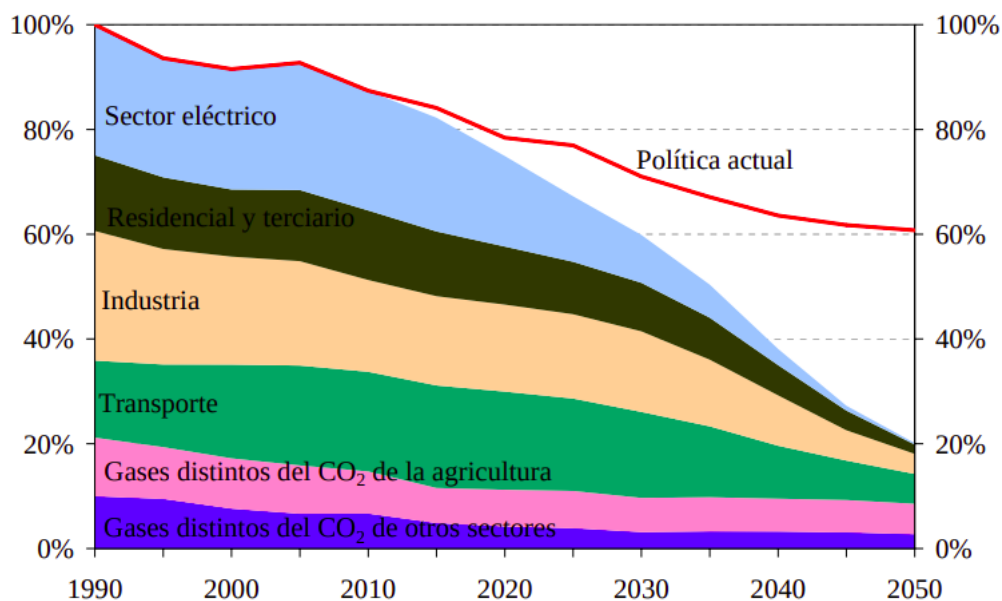


Figura 2.1: Emisiones de GEI en la Unión Europea. Fuente: Comisión Europea

El marco actual en materia de eficiencia energética se compone de una serie de directivas cuya revisión está o bien en curso o bien prevista. La Directiva relativa a la eficiencia energética (2012/27/UE)[30], que entró en vigor en diciembre de 2012, exige a los Estados miembros que fijen objetivos nacionales orientativos de eficiencia energética a fin de asegurar la consecución por parte de la Unión del objetivo principal de reducir el consumo de energía en un 20 % para 2020. Los Estados miembros tienen la facultad de aplicar requisitos mínimos más estrictos en su empeño por ahorrar energía. Esta Directiva también supone la introducción de un conjunto de medidas vinculantes para ayudar a los Estados miembros a lograr este objetivo y dispone normas jurídicamente vinculantes para los usuarios finales y los proveedores de energía. Se introdujeron normas de eficiencia energética adicionales para productos y edificios mediante las Directivas relativas al diseño ecológico(2009/125/CE)[28], el etiquetado de la eficiencia energética (2010/30/UE), actualizada en 2017 (2017/1369/UE)[31], y la eficiencia energética de los edificios (2010/31/UE)[29].

En la Directiva 2010/31/UE se incluyen varias disposiciones para mejorar la eficiencia energética de los mismos tanto nuevos como existentes. Entre las disposiciones clave de la Directiva hay requisitos en relación con:

- El marco común general de una metodología de cálculo de la eficiencia energética integrada de los edificios o de unidades del edificio.
- La aplicación de requisitos mínimos en materia de rendimiento energético de los edificios nuevos o de nuevas unidades de edificios, estableciendo, por ejemplo, que para el 31 de diciembre de 2020 todos los edificios nuevos deberán tener un consumo de energía casi nulo.
- La aplicación de requisitos mínimos de eficiencia energética, en particular a: edificios y elementos de edificios existentes que sean objeto de reformas importantes e instalaciones técnicas de los edificios cuando se instalen, sustituyan o mejoren.
- La certificación energética de edificios o unidades de edificios, la inspección periódica de las instalaciones de calefacción y aire acondicionado de edificios, y los sistemas de control independiente de los certificados de eficiencia energética y de los informes de inspección.

El 30 de noviembre de 2016, la Comisión presentó una propuesta de revisión de la Directiva 2010/31/UE sobre la eficiencia energética de los edificios como parte del paquete de carácter más general «Energía limpia para todos los europeos» (COM(2016)0860), que se pretende que ayude a alcanzar los objetivos energéticos y climáticos de la Unión para 2030. Según datos de la Comisión, los edificios representan el 40 % del consumo energético y el 36 % de las emisiones de  $CO_2$  en la Unión. En la actualidad, alrededor del 35 % de los edificios de la Unión tienen más de 50 años. La mejora de la eficiencia energética de los edificios podría suponer una reducción del conjunto del consumo de energía en la Unión que oscilaría entre el 5 y el 6 % y un descenso del 5 %, aproximadamente, en lo que a las emisiones de  $CO_2$  se refiere.

El 28 de noviembre de 2018, la Comisión Europea presentó su visión estratégica a largo plazo para una economía próspera, moderna, competitiva y neutra desde el punto de vista del clima de aquí a 2050. La estrategia muestra cómo Europa puede liderar el camino hacia la neutralidad climática mediante la inversión en soluciones tecnológicas realistas, la capacitación de los ciudadanos y la armonización de la acción en ámbitos clave como la política industrial, la financiación o la investigación, garantizando al mismo tiempo la justicia social para una transición justa.

## 2.2. Panorama energético español

En España, a través del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico se definió el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) 2021-2030[32], el mismo define los objetivos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, de penetración de energías renovables y de eficiencia energética.



Determina las líneas de actuación y la senda que, según los modelos utilizados, es la más adecuada y eficiente, maximizando las oportunidades y beneficios para la economía, el empleo, la salud y el medio ambiente; minimizando los costes y respetando las necesidades de adecuación a los sectores más intensivos en  $CO_2$ . Es un documento programático que fue presentado a la Comisión Europea para su evaluación y debatido con los distintos agentes en España a lo largo de 2019.

Anteriormente a la definición de este plan para la década 2021-2030, teníamos 3 documentos marco que formalizan la estrategia energética española:

- 1. Estrategia de Ahorro y Eficiencia Energética en España 2004-2012[36].
- 2. Plan de Energías Renovables en España 2005-2010[11].
- 3. Plan de Acción para el período 2008-2012[10].

En estos documentos marco, vienen recogidos acuerdos y medidas entorno a la política energética española, que van desde los porcentajes de generación de energía eléctrica que deben cubrirse con fuentes renovables, las necesidades de trabajar en función de que el combustible destinado al transporte sean biocarburantes, hasta el refuerzo de las medidas que han demostrado excelentes resultados en la mejora de la eficiencia energética de cada sector, detallando plazos, recursos y responsabilidades.

### 2.2.1. Políticas de eficiencia energética nacionales

El primer referente a la eficiencia energética en el sector edificios en España se remonta a 1979 con la aprobación mediante el Real Decreto 2429/1979, de 6 de julio, de la norma básica de edificación NBECT-79, sobre condiciones térmicas en los edificios. Desde entonces, la legislación en materia de edificios ha ido evolucionando al dictado de las directrices comunitarias de aplicación en este sector, en concreto, la Directiva 2010/31/UE, de 19 de mayo de 2010, relativa a la eficiencia energética de los edificios y la Directiva 2012/27/UE, en lo que respecta a la eficiencia energética y la Directiva 2009/28/CE, en lo referente a la cobertura renovable a la demanda energética de los edificios. Esta dinámica legislativa se ha visto acompañada por numerosas medidas de eficiencia energética orientadas a este sector, que han sido implementadas en España en el marco de los sucesivos Planes de Acción a partir del lanzamiento de la Estrategia de Ahorro y Eficiencia Energética 2004-2012.

Con respecto a la Directiva 2010/31/UE, en los últimos años se ha adoptado un conjunto de disposiciones normativas que endurecen los requisitos de eficiencia de la edificación y se concretan en el Código Técnico de la Edificación (CTE), el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE)[24] y la certificación energética de los edificios[33].

El CTE, actualizado mediante la Orden FOM/1635/2013, de 10 de septiembre, incrementa los requisitos de eficiencia energética de aplicación en los edificios de nueva construcción, ampliación y rehabilitación de los existentes, que hayan solicitado licencia de obra a partir del marzo de 2014. Esta actualización constituye una primera fase de aproximación al objetivo de la Directiva 2010/31/UE de conseguir edificios de consumo casi nulo.

El RITE, actualizado mediante el Real Decreto 238/2013, de 5 de abril, por el que se modifican determinados artículos e instrucciones técnicas, establece, entre otros aspectos, los requisitos mínimos de rendimiento de las instalaciones térmicas de calefacción, refrigeración, ventilación y producción de ACS e inspección periódica de la eficiencia energética. Las mayores exigencias de eficiencia se plasman en un mayor rendimiento de las instalaciones térmicas, un mejor aislamiento en los equipos y conducciones de los fluidos térmicos, la utilización de energías renovables y de sistemas de recuperación de energía, así como la incorporación de sistemas obligatorios de contabilización de consumos en las instalaciones colectivas.

### 2.2.2. Políticas de eficiencia energética autonómicas

La vulnerabilidad energética del archipiélago canario ha hecho necesaria la creación de un plan el cual lleva a cabo el estudio de la evolución de los precios de la energía y sus consecuencias sobre la estructura económica y social de Canarias. El PECAN [6] se encuentra asimismo dotado de organismos responsables para su gestión, seguimiento y actualización, buscando la coherencia con otros Planes generales de la Comunidad Autónoma y con otros instrumentos de planificación sectorial.

La Consejería de Transición Ecológica, Lucha contra el Cambio Climático y Planificación Territorial del Gobierno de Canarias ha desarrollado un conjunto de acciones que disminuyen el consumo energético en el archipiélago. Estas acciones pueden ir encaminadas a mejorar el rendimiento energético de instalaciones, a la disminución de pérdidas de energía, a la mejora de los hábitos de consumo, etc. Dichas acciones vienen estructuradas en distintas categorías como se muestra a continuación:

#### 1. Subvenciones:

- Subvenciones para la mejora de la eficiencia energética y el uso de energías renovables en infraestructuras públicas, incluidos los edificios públicos, cofinanciados con FEDER en el ámbito del Programa Operativo de Canarias.
- Subvenciones para la mejora de la eficiencia energética y el uso de energías renovables en empresas y edificios residenciales, cofinanciadas con el FEDER en el ámbito del Programa Operativo de Canarias.

#### 2. Normativas autonómicas:

- DECRETO 26/2009, de 3 de marzo, por el que se regula el procedimiento de visado del Certificado de Eficiencia Energética de Edificios y se crea el correspondiente Registro en el ámbito de la Comunidad Autónoma de Canarias.
- ORDEN de 23 de marzo de 2009, por la que se crea el fichero de datos automatizado denominado Registro Oficial de Certificados de Eficiencia Energética de Edificios.
- CIRCULAR de la Dirección General de Energía N° 02/08 de 10 de septiembre relativa a la zonificación climática aplicada por el programa de referencia para la obtención de la calificación de eficiencia energética de un edificio

#### 3. Normativa en trámite:

- Proyecto de decreto por el que se regula el procedimiento de emisión del certificado de eficiencia energética de edificios y el funcionamiento del correspondiente registro en el ámbito de la Comunidad Autónoma de Canarias.

#### 4. Programa de uso racional de la energía(P.U.R.E)

- ORDEN de 28 de noviembre de 2008, por la que se aprueba el Documento de Referencia para elaborar el Informe de Sostenibilidad Ambiental del Programa de Uso Racional de la Energía del Gobierno de Canarias (P.U.R.E.).

## 2.3. Eficiencia energética en los edificios

Los edificios son parte fundamental de nuestra vida diaria, cuyos días transcurren en buena medida en su interior, ya estemos en casa, en el trabajo o en los locales de ocio. Los inmuebles de todo tipo (viviendas, lugares de trabajo, escuelas, hospitales, bibliotecas u otros edificios públicos) son, no obstante, los mayores consumidores de energía de la UE y se encuentran entre los principales emisores de dióxido de carbono.

El sector de la eficiencia energética ha experimentado un vertiginoso auge en la última década. El mundo moderno se está desplazando hacia nuevas filosofías de consumo y de ahorro porque así se precisa. Dicho cambio

se ve representado en novedosas tecnologías de la construcción que optimizan la energía utilizada en los recintos, bien sea por la orientación que le den, por los materiales de construcción utilizados, o por el equipamiento para brindar confort a la estructura (*iluminación y clima*).

En la actualidad, aproximadamente el 75 % del parque inmobiliario de la UE es ineficiente desde el punto de vista energético. Eso significa que gran parte de la energía consumida se malgasta. Las pérdidas de energía pueden minimizarse mejorando los edificios ya existentes y apostando por soluciones inteligentes y materiales eficientes desde el punto de vista energético para las nuevas construcciones.

Mediante los proyectos de investigación e innovación de Horizonte 2020, la UE invierte en subvenciones o préstamos que ayudan a impulsar la tecnología y las mejores prácticas en el sector. Los contadores inteligentes y otros dispositivos, los materiales de mejor rendimiento y las herramientas digitales contribuyen a la eficiencia energética y pueden facilitar que los consumidores controlen mejor su consumo de energía y ahorren dinero.

Para impulsar la reforma de edificios, la Comisión Europea ha anunciado su intención de poner en marcha una nueva iniciativa de «oleada de renovación», en el marco del Pacto Verde Europeo. El objetivo es aumentar la tasa de renovación de los edificios ya construidos y reunir a los distintos agentes del sector para crear posibilidades de financiación, promover la inversión en edificios y articular los esfuerzos de renovación.

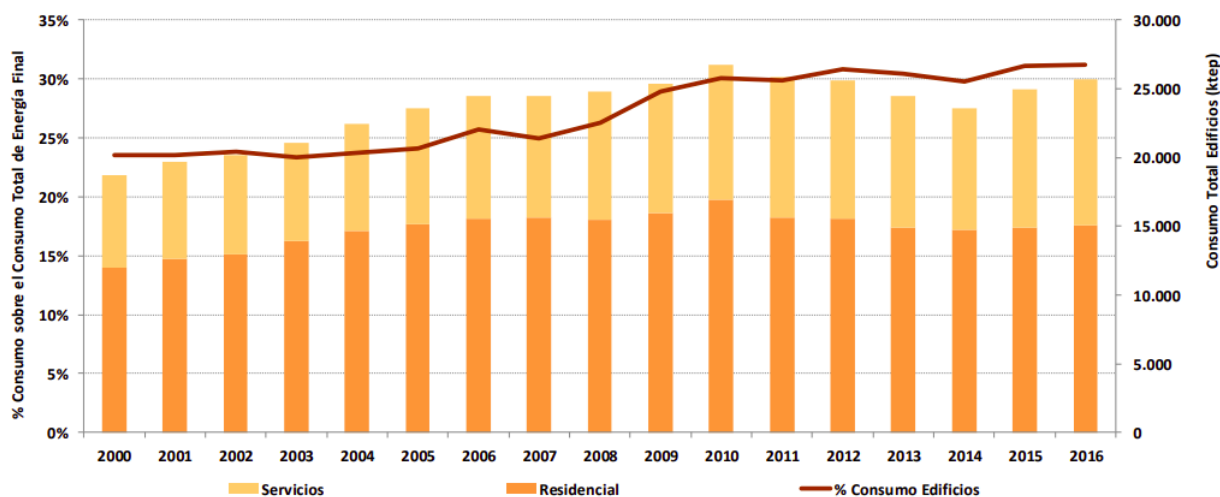


Figura 2.2: Consumo energético en los edificios. Fuente: MITECO/IDAE

Según se muestra en la figura anterior en 2016 el consumo de los edificios representa el 31,2 % del consumo de energía final total, y el 60,9 % del consumo eléctrico, representatividad ligeramente inferior a la del conjunto de los edificios de la UE.

Dentro de la edificación, los ámbitos con mayor espacio para mejoras de eficiencia energética son la calefacción y el agua caliente sanitaria (ACS). Entre las principales actuaciones que se presentan dentro del sector destacan las reformas en la envolvente térmica para reforzar el aislamiento, las estrategias basadas en arquitectura bioclimática y el aprovechamiento de las aportaciones de energía renovable, tanto desde un punto de vista térmico como eléctrico.

Por otra parte, según datos brindados por EUROSTAT, se muestran los datos de consumo final de energía en el sector de los servicios en España:

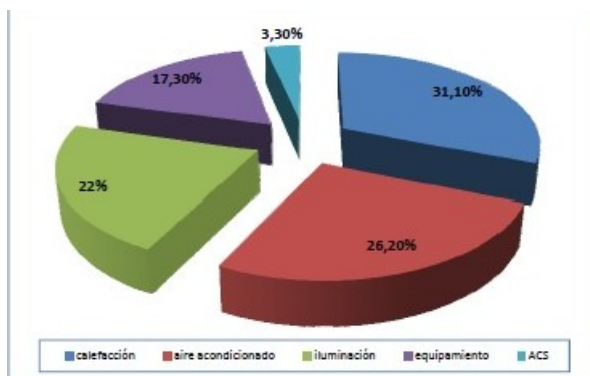


Figura 2.3: Consumo de energía final en el sector terciario español. Fuente: EUROSTAT

La siguiente tabla muestra como es la distribución de estos valores y nos ayudará a estrechar el objetivo de nuestro estudio.

Tabla 2.1: Consumo energético del sector terciario español

Categoría	Porcentaje
HVAC y ACS	60.6
Iluminación	22
Equipamiento	17.3

Los porcentajes mostrados anteriormente varían en tanto varíe el tipo de instalación sobre la que nos enfocamos. Por ejemplo, si comparamos una instalación hotelera y un banco, la primera va a tener más peso sobre la producción de ACS que el segundo. En cualquier caso, con cierta aproximación sabemos que más de la mitad del consumo energético de estos edificios se destina a la climatización y la producción de ACS, por lo que debe ser este el campo principal en el cual enfocaremos nuestros esfuerzos para mejorarlo.

### 2.3.1. Panorama energético de la industria hotelera

La evolución de la industria hotelera está íntimamente relacionada con la capacidad del sector para identificar las posibilidades de mejora en la gestión energética.

A pesar de que es la energía la que puede permitir a los establecimientos hoteleros alcanzar una mayor calidad en los servicios prestados, también es cierto que existe la necesidad de racionalizar su factura de energía global, cuestión sin duda prioritaria al representar el gasto energético de estas empresas. Es por esto que es necesario tomar conciencia de la importancia que supone el gasto energético y potenciar su ahorro, animando a los establecimientos a que realicen un control riguroso sobre su consumo de energía, agua y conozcan en detalle sus instalaciones energéticas.

Para una correcta gestión energética en el sector hotelero, es necesario conocer los aspectos que determinan cuáles son los elementos más importantes a la hora de lograr la optimización energética, conocimiento que nos permita un mejor aprovechamiento de nuestros recursos. Como fue mencionado en el epígrafe anterior, la partida mayor en la factura eléctrica de este sector proviene de la calefacción/aire acondicionado y producción de ACS, por consiguiente, es hacia donde van a estar dirigidos los principales esfuerzos de los empresarios a la hora de realizar el mayor monto de inversiones.

Se han de contemplar 2 aspectos fundamentales que permiten optimizar el coste de la energía y por lo tanto maximizar el beneficio[3]:

1. Optimización de tarifa.
  - Revisión de los contratos de energía:
    - a) Electricidad.

b) Gas.

## 2. Optimización de las instalaciones.

### ■ Análisis de las instalaciones:

- a) Detección de puntos de mejora.
- b) Establecimiento de planes de mejora.
- c) Valoración económica de la mejora

El coste de los edificios va más allá de su simple construcción, también debemos incluir su demanda energética así como su mantenimiento. El consumo energético y su racionalización son objetivos del mantenimiento de la edificación, y deben moverse entre el angosto camino de mantener los costes más bajos posibles y el cumplimiento de las exigencias legales.

El coste derivado del consumo de energía es susceptible de ser minorado a través de la optimización de las instalaciones y maquinaria con la que contamos en el hotel, para ello es necesario conocer cuál es nuestro consumo y las características de las instalaciones.

Aquellas instalaciones del sector terciario (*bancos, hoteles, grandes oficinas, hospitales*) cuya construcción no se ha realizado bajo los estándares modernos, han tenido que ir adaptándose con el tiempo a ser respetuosas con el medio ambiente (*ecofriendly*) de diversas maneras. La gran mayoría han adoptado medios sofisticados para las tareas de gestión de la energía como son sistemas SCADA, CRM's y ERP's. Áreas como la climatización de la instalación y la electricidad la controlan softwares centralizados que aseguran el confort de los clientes. Estas herramientas, desde un punto de vista económico representan un arma de doble filo si no se realiza un uso adecuado de las mismas. Esto significa que si se realiza la gestión de la forma tradicional, aún teniendo las facilidades de ahorro energético que nos brindan la tecnología, los costes de operación de la instalación podrían llegar a ser mayores que los de una instalación convencional. Las figuras 2.4 y 2.5 muestran las curvas anuales de demanda de energía eléctrica de dos hoteles con distinta ubicación.

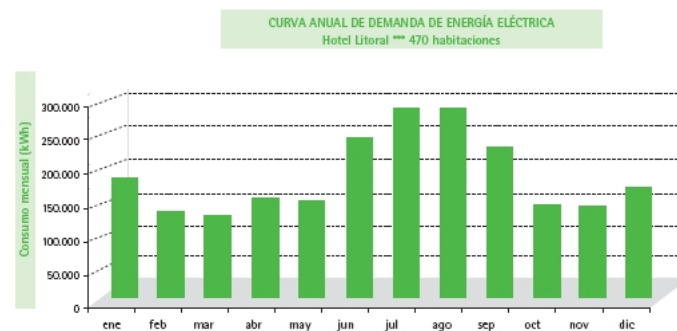


Figura 2.4: Consumo anual de un hotel litoral. Fuente: *Certificados energéticos.com*

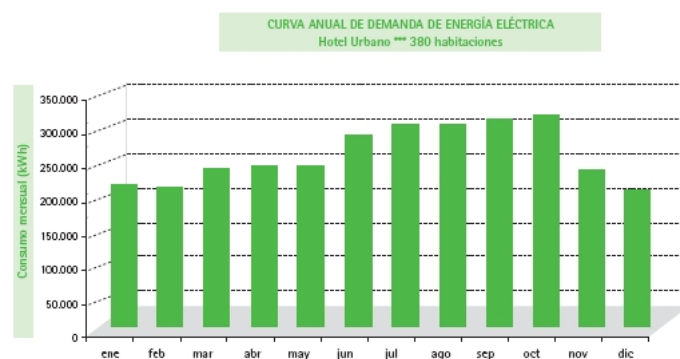


Figura 2.5: Consumo anual de un hotel urbano. Fuente: *Certificados energéticos.com*

El consumo energético de un hotel supone uno de sus gastos principales. La abundante maquinaria y la constante climatización e iluminación son piezas fundamentales en la rentabilidad del mismo. Por otra parte, un mayor consumo energético no siempre equivale a un mejor servicio. Se conseguirá un grado de eficiencia óptimo cuando el consumo y el confort estén en la proporción adecuada[3].

Podríamos, de acuerdo a lo que plantea la Guía de Gestión Energética en el Sector Hotelero definir la eficiencia de la siguiente manera:

$$Eficiencia[E] = \frac{Demanda}{Consumo}$$

Según dicha ecuación está claro que la eficiencia óptima será cuando se iguallen la demanda con el consumo. Entonces el valor de E sería la unidad, o si lo expresamos porcentualmente, estaríamos en el 100 por ciento de eficiencia.

### 2.3.2. Calefacción/Aire acondicionado y agua caliente sanitaria en instalaciones hoteleras

En 2012 operaban en España 19.149 establecimientos hoteleros, que contaban con 1,84 millones de plazas, según el último informe Balantur de TourSpain[13]. Alrededor de los servicios hoteleros fundamentales se encuentran los derivados de la necesidad de mantener un ambiente determinado. Es decir, la iluminación y la climatización (calefacción, refrigeración y ventilación), y la disponibilidad de agua fría y caliente. Asimismo, los hoteles pueden prestar una serie de servicios extra de esparcimiento de índole cultural, deportivo, relax, etc. Para tener disponible tal oferta de comodidades para los clientes, los hoteles tienen que mantener operativos una serie de sistemas técnicos, que son los verdaderos consumidores de energía.

Según el último Informe Anual de Consumos Energéticos (MINETUR), el desglose del consumo de energía en el subsector de Hoteles y restaurantes fue de un 73,10 % para usos eléctricos y 26,90 % para usos térmicos. La distribución del consumo energético, entre energía eléctrica y energía térmica, demandada por un hotel, depende de varios factores: del tipo de hotel, de su situación, categoría, los servicios que ofrece, etc.

Otro factor que influye de manera determinante en este reparto es el sistema utilizado para la calefacción del hotel. Aunque el sistema tradicional utilizado consiste en el empleo de calderas de agua caliente, cada vez está más implantado el empleo de sistemas basados en bombas de calor, con lo cual disminuye considerablemente el consumo de energía térmica, incrementándose como contrapartida el consumo de energía eléctrica. De acuerdo al área del hotel donde centremos nuestra atención, se presentan unas u otras estrategias y medidas para contribuir con el ahorro y así mejorar la eficiencia del recinto, estas áreas se observan en la siguiente figura. Analizando la misma se puede distinguir el gran porcentaje que recae sobre el área de calefacción/aire acondicionado y agua caliente sanitaria. Entre ambos sectores, ocupan casi el 70 % de la energía consumida en las instalaciones hoteleras.

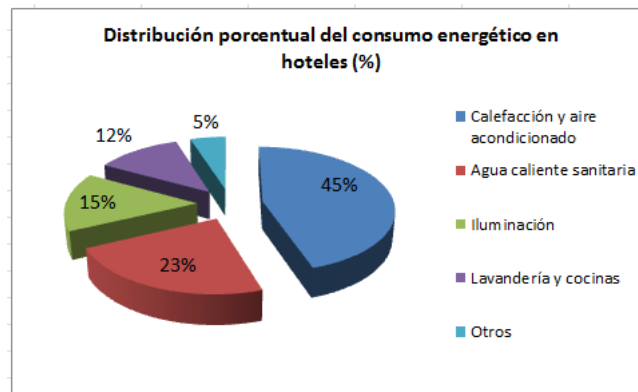


Figura 2.6: Desagregación de consumos energéticos en la industria hotelera. Fuente: EUROSTAT

A la hora de realizar la distribución del consumo energético en el sector hotelero, se observa que debido a la gran variedad de tipos de establecimientos, número de habitaciones, categoría, situación geográfica, combustibles y fuentes de energía utilizadas, es difícil hacer una distribución estándar del consumo de energía de los mismo, ya que existe una gran variedad en los porcentajes de consumo de los diferentes servicios que suministra un hotel, debido a estos factores.

Para un edificio construido y funcionando, el valor de la demanda está determinado por su orientación, condiciones climáticas, envolvente térmica del edificio y cargas internas (personal, luminarias y equipos). Todos estos factores a excepción de la envolvente térmica del edificio son variables en el tiempo, de manera que el consumo ha de variar en sincronismo con la demanda. Posibles soluciones para esta disyuntiva serían:

#### 1. Puntos de consigna óptimos.

- Adecuar la producción de agua caliente de calefacción o fría de refrigeración con consignas variables en función de las condiciones interiores (no exteriores, como muchas veces ocurre) del edificio. Esta es una actuación de suma importancia por ser el mayor consumo energético del edificio.

#### 2. Fraccionamiento de la potencia.

- Tanto las enfriadoras como las calderas suelen accionarse en función de la demanda energética. Lógicamente cuanto mayor sea el fraccionamiento, mejor ajustaremos el consumo energético a la demanda.

#### 3. Enfriamiento gratuito.

- La mayoría de los climatizadores actuales están dotados del sistema “free-cooling”. Como es sabido, este sistema se utiliza en la época estival durante la noche y primera hora de la mañana para aprovechar el aire fresco exterior en lugar de recircular el aire interior más caldeado y de esa manera, ahorrar energía para en enfriarlo

#### 4. Recuperación de energía del aire de extracción.

- Este sistema instalado en los climatizadores actuales (rueda entálpica) en cumplimiento de la normativa vigente, consiste, básicamente, en extraer el calor existente en aire de retorno interior (durante el invierno) y transferirlo al aire de impulsión al edificio.

#### 5. Instalación solar térmica.

- Según la sección HE-4 del Código Técnico de Edificación[38], la contribución solar mínima anual (fracción entre los valores anuales de la energía solar aportada exigida y la demanda energética anual) debe tener un valor determinado en función de la zona geográfica donde nos encontremos. En el archipiélago canario este valor es 70 por ciento. Si estamos por debajo, la instalación estará mal diseñada, o hay algún problema de mantenimiento.

Es preciso establecer algunos parámetros de consumo que nos sirvan de referencia. Para ello, no remitimos a la normativa más exigente en la actualidad: Directiva Europea 2018/844 [27], según la cual todos los estados miembros deberán tomar medidas para que a partir del 2020 (2018 en el caso de edificios públicos) todos los edificios de nueva planta sean de consumo de energía casi nulo. Desde luego esta directiva aporta una definición ambigua de lo que es un edificio con consumo energético “casi nulo”. Si embargo recientemente, al amparo de la directiva descrita, hace su entrada el concepto de **Passivhause** que establece los siguientes hitos a tener en cuenta:

- Demanda máxima para calefacción de  $15 \text{ kW}/m^2/\text{año}$ .
- Demanda máxima de refrigeración de  $15 \text{ kW}/m^2/\text{año}$ .
- Para edificios con calefacción y refrigeración por aire, se incorpora como nueva alternativa conseguir una carga de frío y calor menor de  $10 \text{ W}/m^2$ .
- Consumo de energía primaria no superior a  $120 \text{ kW}/m^2/\text{año}$ .
- Temperaturas superficiales interiores de la envolvente térmica en invierno  $> 17^\circ\text{C}$



## Capítulo 3

# Modelado y simulación del proceso

Ya en el capítulo anterior se mencionó el gran consumo energético que tienen las instalaciones de aire acondicionado/calefacción (HVAC *por sus siglas en inglés*) y ACS en el sector hotelero. Se están realizando grandes esfuerzos desde varias áreas del conocimiento para mejorar el rendimiento de este tipo de instalaciones debido su gran impacto tanto financiero como la huella de carbono que dejan. Las leyes a diferentes niveles son cada vez son más restrictivas para este tipo de proceso donde existe una transformación de energía, ya sea química (en el caso de combustibles) o eléctrica en energía térmica aprovechable. Este trabajo aporta un grano de arena a dicha labor y propone soluciones novedosas para mejorar la eficiencia en el funcionamiento de las instalaciones de agua caliente sanitaria centralizadas.

Para ser efectivos en la propuesta de soluciones que mejoren el rendimiento de las instalaciones es interesante disponer de un modelo del proceso a estudiar. Dicho modelo nos permitirá modificar los puntos de operación de la instalación sin afectar la planta real y percibir la respuesta de la misma. Esto representa una gran ventaja, ya que da la posibilidad de recrear diferentes escenarios de funcionamiento, estudiar su comportamiento, las principales variables del proceso que lo afectan y las modificaciones que se le pueden aplicar.

Es escasa la literatura técnica que trata acerca del modelado y simulación de las instalaciones de agua caliente sanitaria centralizada. Cuando queremos hacer un proceso más eficiente se hace necesario aplicar ciertas modificaciones sobre el mismo y ver como responde, para luego eliminar las malas prácticas que se venían aplicando y sólo quedarnos con aquellas que nos representan una ventaja. Una vez realizada la puesta en marcha de una instalación, resulta complejo hacer propuestas de cambio sobre su funcionamiento si se desconoce el resultado exacto que tendrán estos. Estas pruebas podrían llevar a la reducción del confort que brinda la instalación y por tanto el descontento de los consumidores. Por esta razón, para comprender realmente como funciona, y para poder realizar modificaciones en el funcionamiento sin que este afecte a los usuarios finales, este capítulo brinda una propuesta de modelado y simulación de una instalación de agua caliente sanitaria en el software Matlab.

Para ello, se hizo uso de diversos “toolboxes” que brinda este software como son **Simscape** y **Simulink** por las facilidades y potencialidades que brindaban ambos. Dichas ventajas radican en que muchos componentes físicos de sistemas reales ya vienen en un modelo “bruto” y sólo hay que hacer la parametrización de dichos elementos para ajustarlos al funcionamiento del sistema que queremos simular. Por otro lado los tiempos de simulación son variables y brindan la ventaja de hacer un estudio de comportamiento desde unos pocos segundos, hasta las 24 horas del día. Tiene la posibilidad de realizar gráficas durante la ejecución de la simulación, e igualmente exportarlas al espacio de trabajo con el objetivo de editarlas y mejorar su lectura. También podemos crear numerosos espacios de simulación que funcionen en paralelo, cada uno con sus respectivas variables específicas y guardarlos independientemente.

### 3.1. Producción de Agua Caliente Sanitaria

Las instalaciones de producción centralizada de ACS habitualmente se integran en las de calefacción de los edificios. La producción de calor que se realiza en la sala de máquinas es conjunta para todos los servicios térmicos del edificio y los generadores de calor (calderas, bombas de calor) se conectan con unos colectores desde los que parten los diferentes servicios de calefacción y el circuito primario del ACS. Debido a que el agua de los generadores de calor no es apta para el consumo humano, siempre deben existir intercambiadores en cuyo interior se transfiera el calor de los generadores (primario) al ACS (secundario) sin que exista mezcla entre ambos circuitos. Una vez que el agua ya se encuentra a la temperatura deseada, la misma es distribuida hasta los puntos finales de consumo mediante una red de tuberías.

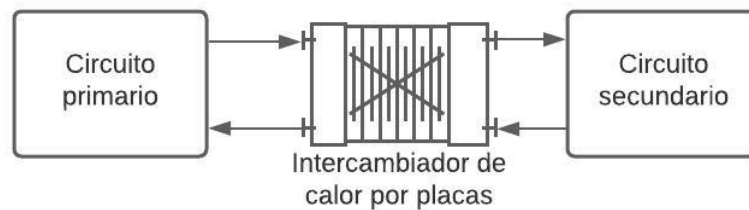


Figura 3.1: Separación entre circuito primario y secundario. *Fuente: Propia*

Como las distancias que normalmente existen entre los puntos de producción y los de consumo son largas, si no se adoptasen medidas para ello, los usuarios deberían esperar un tiempo excesivo para recibir el ACS, lo que implicaría consumos innecesarios de agua, además de la correspondiente falta de confort. Para evitarlo, las instalaciones centrales cuentan con los circuitos de recirculación, que consisten en una red de tuberías que retornan el agua desde los puntos de consumo más alejados, hasta el lugar de producción mediante bombas de recirculación, que la mueven continuamente por toda la instalación, manteniendo las tuberías a la temperatura adecuada para el uso, de manera que salga de forma prácticamente inmediata por los grifos. Las instalaciones de ACS se pueden clasificar en dos grupos atendiendo a la forma de producción del agua caliente:

#### Clasificación de la producción de ACS

1. Instantáneas.
2. Con acumulación.

##### 3.1.1. Producción instantánea

La característica más destacable de los sistemas de producción instantánea es que el diseño de los intercambiadores está condicionado al momento de máxima demanda de la instalación, pues en ellos el agua de calderas calienta el agua de consumo al mismo tiempo que se demanda. Como elementos auxiliares estos sistemas requieren de bombas en el circuito primario, encargadas de hacer circular el agua de los colectores de calderas a los intercambiadores. Seguidamente una figura muestra el esquema de una instalación de producción instantánea de ACS.

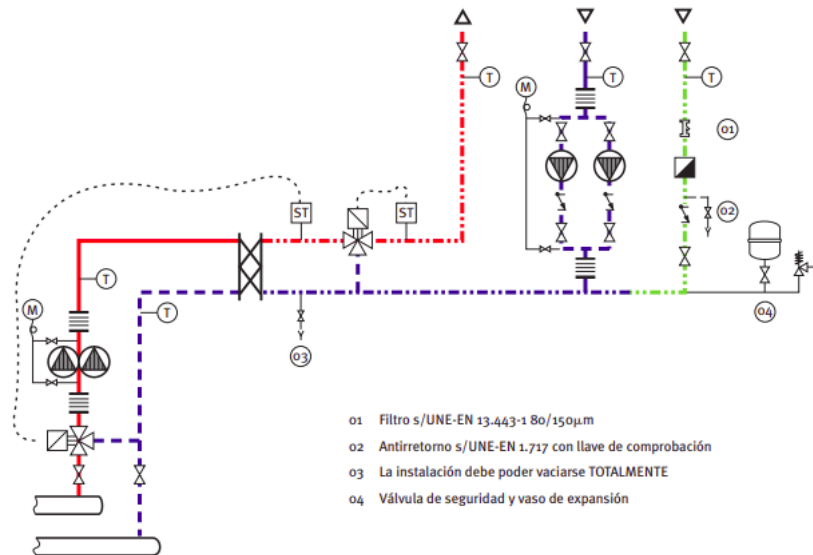


Figura 3.2: Producción instantánea de ACS. Regulación en primario y secundario. Fuente: IDAE/Guía técnica. Agua caliente sanitaria central

### 3.1.2. Producción con acumulación

Para reducir la potencia necesaria en producción y al mismo tiempo obtener funcionamientos más homogéneos de la instalación se utilizan los sistemas con acumulación en depósitos en los que se mantiene el agua caliente hasta el momento de su uso, de manera que en las puntas de demanda del edificio se utiliza el agua acumulada, solicitándose una potencia inferior a la del sistema de producción.

Además de los intercambiadores, presentes en ambas formas de producción, en esta forma se añade el elemento del depósito de acumulación. Los sistemas con acumulación requieren una bomba adicional de secundario (bomba de calentamiento), que mueva el agua entre los depósitos y los intercambiadores. Esta solución, que desde el punto de vista del montaje es más sencilla requiriendo menos conexiones en los depósitos, provoca que las condiciones de funcionamiento de la bomba de retorno varíen continuamente en función de los consumos instantáneos, cuando los mismos sean muy altos, la bomba puede llegar a trabajar sin circular agua, ya que es el propio consumo el que mantiene la circulación. El agua acumulada habitualmente se mantiene a una temperatura superior a la de consumo, por lo que a la salida de los depósitos se efectúa una regulación, mediante una válvula motorizada de tres vías que mezcla agua de acumulación con agua fría. El circuito de retorno se debe conectar a la tercera vía de la válvula de regulación para que cuando no haya consumo no se eleve la temperatura en la distribución, si la bomba se conectase únicamente al depósito, al no haber consumo por la entrada de agua fría no habría aportación de agua, extrayéndose únicamente agua del depósito que se encuentra a alta temperatura. Un esquema tipo de la instalación de ACS descrita anteriormente se muestra en la figura 3.2.

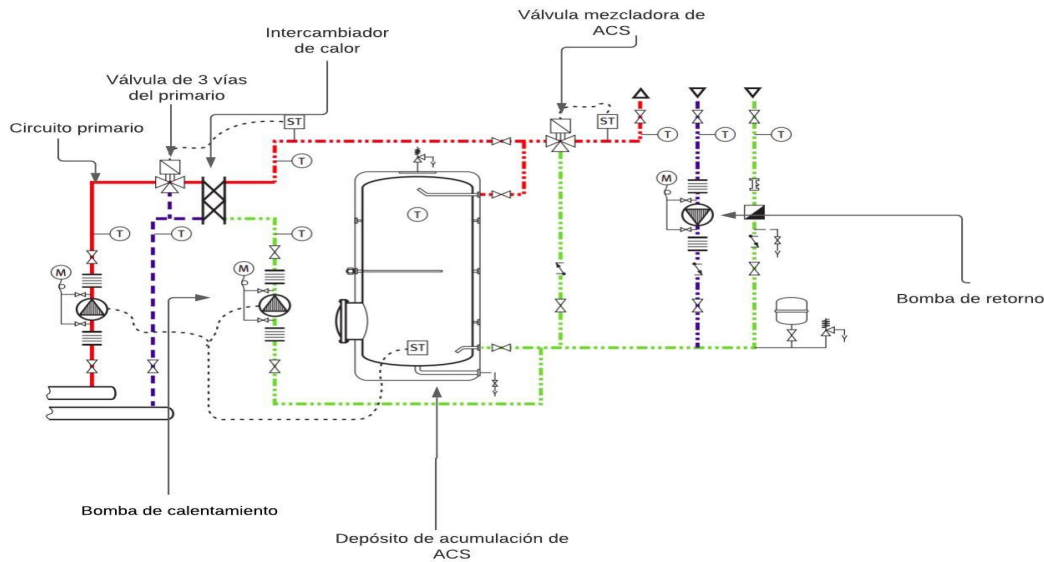


Figura 3.3: Producción con acumulador. Regulación en primario y secundario. Fuente: IDAE/Guía técnica. Agua caliente sanitaria central

Analizado la figura 3.1, se observa que cuenta con un solo depósito de acumulación, sin embargo a veces es necesario disponer de varios depósitos de acumulación por las siguientes razones:

1. Necesidad de gran capacidad de acumulación.
2. Espacios con poca altura, lo que limita el tamaño de los depósitos.
3. Fiabilidad de servicio que permita las operaciones de mantenimiento.

Cuando se disponga de varios depósitos las posibilidades de conexión hidráulica entre ellos son en paralelo o en serie. La conexión en paralelo es más sencilla y provoca menores pérdidas de carga, como contrapartida se tiene una mayor zona de mezcla, ya que la misma se da en todos los depósitos, con un menor aprovechamiento del volumen acumulado y mayor riesgo de desarrollo de la legionella. La conexión en serie reduce la zona de mezcla, aprovechando mejor la estratificación. Las conexiones hidráulicas son más complejas, en caso de avería en alguno de los depósitos hay que prever conexiones que permitan dejarlos fuera de servicio sin afectar al resto de los depósitos, y las pérdidas de carga son mayores, ya que el agua de consumo debe pasar por el conjunto de depósitos. Teniendo en cuenta que la estratificación en los depósitos mejora el aprovechamiento del volumen acumulado y al mismo tiempo reduce el riesgo de desarrollo de la legionelosis, son preferibles los depósitos verticales y lo más esbeltos posible. A continuación las figuras 3.2 y 3.3 muestran un esquema de conexión de depósitos en serie así como una instalación con valvulería preparada para ambos tipos de conexiones, configurada para trabajar en serie. En la figura 3.3 se observan dos tanques, cada uno de ellos con sus conexiones de entrada/salida para favorecer la estratificación del agua. El tanque de la izquierda(1) recibe el agua de retorno mediante una entrada a la mitad del mismo por la parte derecha y el agua fría de reposición proveniente del circuito de agua fría por su parte inferior derecha. El mismo tiene dos salidas, una extracción colocada en la parte inferior izquierda que se realiza mediante la bomba de calentamiento, esta agua circula por el intercambiador de calor y entra por la parte superior izquierda en el depósito (2). La segunda salida de (1) está encima del mismo y va hacia una entrada ubicada en la parte inferior derecha de (2), ya con esto hemos mencionado las entradas y salidas de (1) y las entradas de (2), pero nos falta la salida de este último. El depósito (2) es el que está conectado al circuito de distribución, el mismo tiene una sola salida en su parte superior que va hacia la válvula mezcladora de ACS, la misma regula la temperatura a la que se va a distribuir el agua. El agua a la salida de la válvula circula por todo la red de tuberías y regresa a través de las bombas del circuito de retorno.

Una instalación de agua caliente sanitaria similar a la descrita anteriormente es la que se pretende modelar en este capítulo, con la particularidad que sólo se tendrá un depósito de acumulación. Un dispositivo generador de calor que será en lugar de una caldera una bomba de calor, el intercambiador de calor, el depósito de acumulación, las bombas de calentamiento y retorno. Igualmente, se modelarán las pérdidas de calor sufridas por el fluido a través de la red de tuberías de los consumidores.

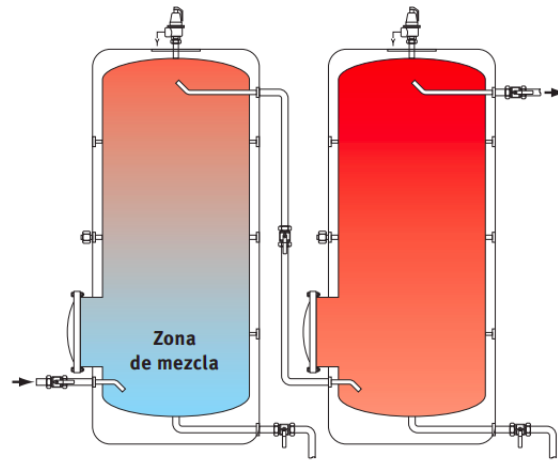


Figura 3.4: Conexión de depósitos verticales esbeltos en serie. Fuente: IDAE/Guía técnica. Agua caliente sanitaria central

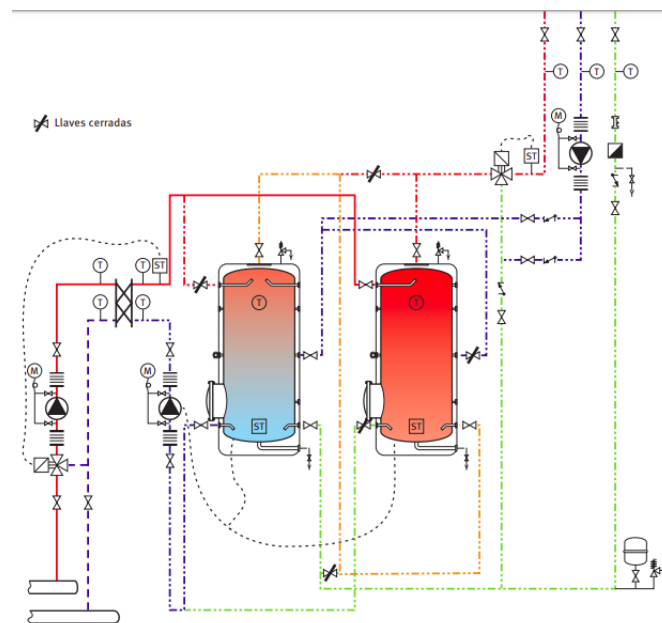


Figura 3.5: Esquema de funcionamiento que permite el funcionamiento en serie. Fuente: IDAE/Guía técnica. Agua caliente sanitaria central

Los elementos fundamentales a considerar dentro de una instalación de agua caliente sanitaria son:

- Bomba de calor.
- Intercambiador de calor.
- Depósito de almacenamiento de ACS.
- Bombas de calentamiento.
- Bombas de retorno.

### 3.2. La bomba de calor

Una bomba de calor es una máquina térmica cuyo funcionamiento está basado en las leyes de la termodinámica[15][17][18][20], el mismo radica en transportar calor desde un foco a baja temperatura que puede ser aire, agua o el suelo, hacia otro foco a una temperatura superior, gracias a un trabajo aportado desde el exterior y todo esto de manera muy eficiente. El elemento a destacar en estos equipos es que es muy respetuosa con el medio ambiente ya que reduce el uso de elementos no renovables(petróleo, gas natural) y emplea energía de fuentes naturales como el aire y el agua. Igualmente es necesario tener en cuenta su coste de operación ya que es muy económico si lo comparamos con los sistemas tradicionales [22].

La bomba de calor está formada por cuatro elementos:

- 1. Compresor.
- 2. Válvula de expansión.
- 3. Evaporador.
- 4. Condensador.

En el evaporador se produce un intercambio entre la energía obtenida del aire exterior, tierra o agua y el refrigerante que se encuentra en su interior, que pasa de estado líquido a estado gaseoso. El refrigerante evaporado pasa al compresor que es accionado por un motor eléctrico, y mediante un proceso de compresión es capaz de elevar la temperatura del gas refrigerante. El gas comprimido llega al condensador, donde pasa nuevamente a estado líquido. Durante este proceso de condensación se produce una cesión energética del refrigerante al circuito hidráulico, con lo que se libera la energía necesaria para cubrir las necesidades de calefacción y ACS. El refrigerante pasa a la válvula de expansión, que reduce su presión y temperatura y lo pasa al evaporador en las condiciones óptimas para que se reinicie el proceso. En la siguiente figura se muestra un esquema de funcionamiento de una bomba de calor.

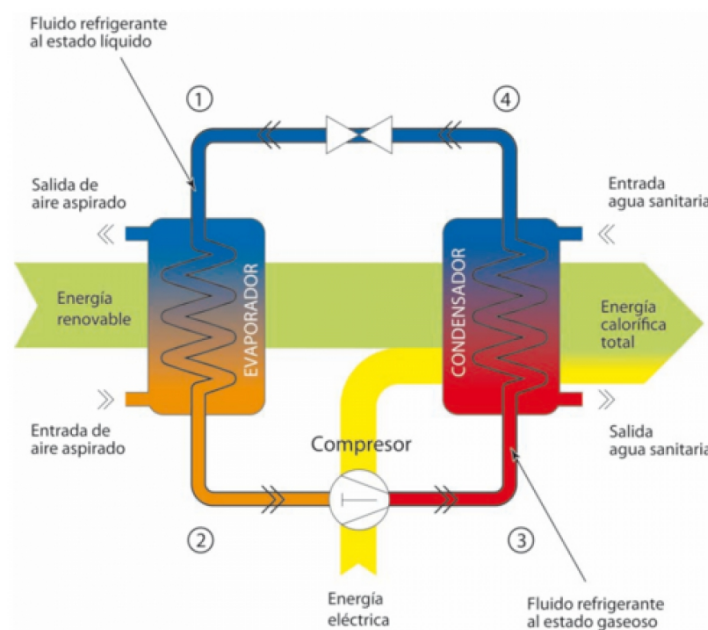


Figura 3.6: Esquema de funcionamiento de una bomba de calor. Fuente: Gasfríoalcalor.com

Existen según su aplicación numerosas clasificaciones de bombas de calor, las que mas se suelen emplear son las siguientes:

- **Aire-aire:** estas bombas de calor son las más habituales y uno de los motivos es su precio. Estos equipos captan o ceden calor del aire externo para obtener aire frío o caliente y así climatizar el interior de la vivienda. Estos equipo son los conocidos habitualmente como aire acondicionado.
- **Aire-agua:** son conocidas también por bombas de calor Aerotérmicas . Estos equipos captan o ceden calor del aire externo y lo distribuyen al interior de la vivienda mediante circuitos cerrados de agua. Se utilizan sobre todo con sistemas de emisión de baja temperaturas como el suelo radiante y los ventilosconvectores. También son capaces de suministrar agua caliente sanitaria.
- **Agua-aire:** se aprovecha el agua generalmente subterránea. Por medio de la bomba de calor intercambia calor para después suminístrala al aire de la estancia para calentar o refrigerar.
- **Agua-agua:** tiene el mismo mecanismo que la anterior, pero en vez de trasladarse al aire de la estancia se lleva al agua de un sistema de calefacción o refrigeración.
- **Tierra-agua:** aquí se enmarcan la más conocidas como Bombas de Calor Geotérmicas. La fuente de calor principal es la tierra. Su funcionamiento es similar a las agua-agua solo que la energía es intercambiada con el subsuelo por un circuito cerrado de captación, ya sea horizontal o vertical para luego ceder la energía.

Como debe ser esperado, estos equipos tienen una enorme aplicación en las instalaciones de nuestros días pues son capaces de proporcionarnos refrigeración, calefacción y agua caliente sanitaria, entre las ventajas que suponen tenemos:

- Con un mismo equipo producimos frío, calor, y agua caliente sanitaria.
- Multiplica su capacidad de generar calor y/o frío. Por cada kW eléctrico consumido genera por término medio entre 3 y 5 kW térmicos.
- Reduce la factura de energía.
- No necesita depósitos de combustible.
- No hay combustión.
- No se necesitan chimeneas.
- Su mantenimiento es sencillo.

### 3.2.1. Modelado de la bomba de calor

La bomba de calor que se utilizará como fuente de calor en las simulaciones vendrá modelada en Simulink. La misma tiene seis variable de entrada y dos variables de salida que vienen recogidas en la siguiente tabla:

Tabla 3.1: Variables de entrada y salida en el modelado de la bomba de calor

Tipo de variable	Nombre	Unidad de medida
Entrada	Consumo eléctrico	Wattios
Entrada	Potencia térmica	Wattios
Entrada	Agua fría entrada	°C
Entrada	Agua caliente entrada	°C
Entrada	Caudal másico agua fría	kg/s
Entrada	Caudal másico agua caliente	kg/s
Salida	Agua fría salida	°C
Salida	Agua caliente salida	°C

El esquema que es presentado recoge de modo general las principales variables que se estima se deben tener en cuenta en la simulación de la misma, una vez fijado el objetivo a simular se parametrizará el sistema para

obtener un desempeño lo mas fiel a la realidad. El propio equipo fisico viene con el control del compresor y la válvula de expansión implícito, entonces no será necesario trabajar en este sentido. En cambio es importante conocer los tiempos de calentamiento del circuito primario bajo distintas circunstancias para estimar la energía que se consume durante estos procesos. La siguiente figura muestra el resultado del modelado de la bomba en Simulink y la tabla 3.2 recoge los resultados obtenidos. Una vez definido el objeto particular de simulación, esto es, el equipo instalado, se parametrizará el modelo para que funcione lo más fiel posible al real. Los datos que se muestran en la tabla siguiente pertenecen a la bomba de calor con la que se realizará el estudio pertinente.

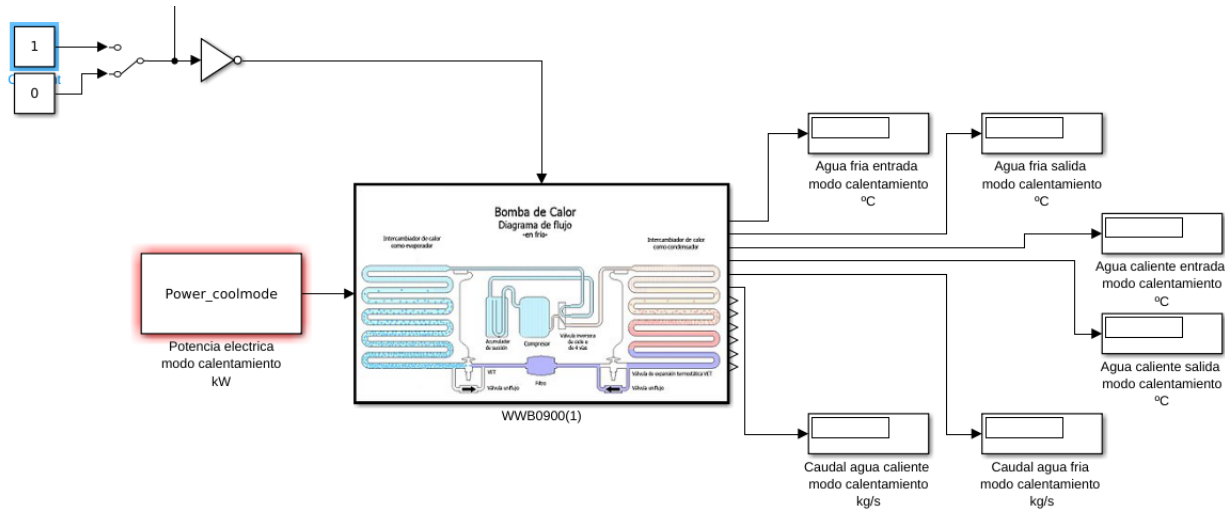


Figura 3.7: Modelado y simulación en Simulink de una bomba de calor. Fuente: Propia

Tabla 3.2: Variables de entrada de la simulación

Variable	Unidad de medida
Consumo eléctrico	58100 Wattios
Potencia térmica	291200 Wattios
Agua fría entrada	40 °C
Agua caliente entrada	60 °C
Caudal másico agua fría	7.2 kg/s
Caudal másico agua caliente	6.5 kg/s

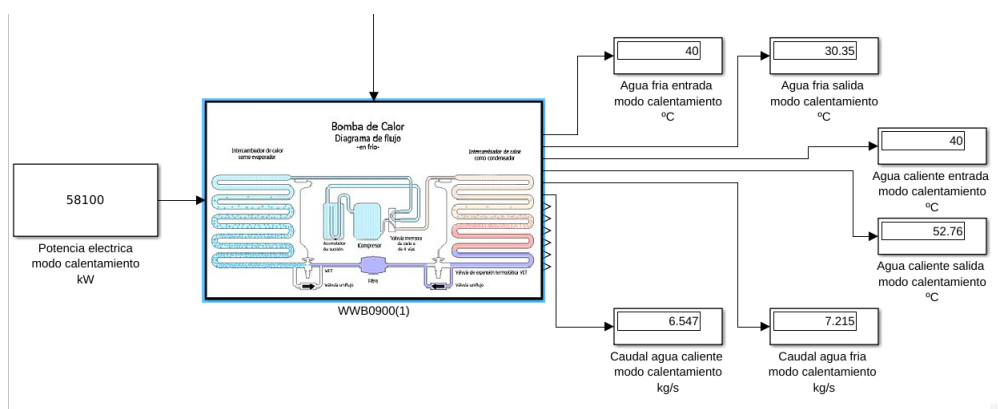


Figura 3.8: Resultados de una simulación en Simulink de una bomba de calor. Fuente: Propia

A continuación las tablas 3.3 y 3.4 recogen las características de dos simulaciones de calentamiento que se realizan de una bomba de calor genérica[20] sobre una determinada masa de agua y la figura 3.4 muestra el comportamiento temporal de ambas.

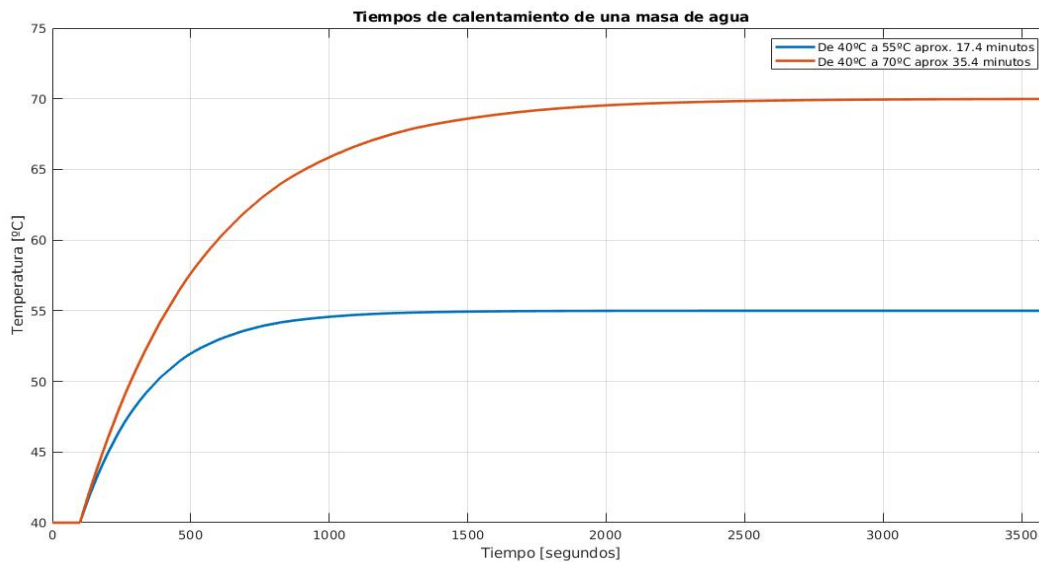


Tabla 3.3: Simulación de calentamiento no. 1

Variable	Valor
Masa de agua	5000 litros
Salto térmico	40°C-55°C
Potencia térmica	250386.93 kcal/h
Tiempo de calentamiento	17.4 minutos

Tabla 3.4: Simulación de calentamiento no. 2

Variable	Valor
Masa de agua	5000 litros
Salto térmico	40°C-70°C
Potencia térmica	250386.93 kcal/h
Tiempo de calentamiento	35.4 minutos

Figura 3.9: Simulación de calentamiento de una masa de agua. *Fuente: Propia*

### 3.3. Intercambiadores de calor

Los intercambiadores de calor son dispositivos cruciales en toda instalación térmica. Su función es sencilla, cumplir la labor de nexo entre dos circuitos por los que circula un fluido térmico (agua, aceite, etc.) y se necesite trasladar la energía en forma de calor desde el fluido de mayor temperatura hacia el de menor temperatura [21][23]. Esta tarea que a simple vista puede parecer muy sencilla encierra una gran complejidad y es objeto de estudio de numerosos profesionales que se encargan de calcular, diseñar y construir estas máquinas de una forma cada vez más eficiente. El objetivo, recuperar la mayor cantidad de calor desde el fluido caliente a un menor costo. La transferencia de calor se produce a través de una placa metálica o tubo que favorezca el intercambio entre fluidos sin que estos se mezclen. Podemos clasificar los intercambiadores de calor de acuerdo a numerosos criterios, los más comúnmente utilizados son: **Dirección del flujo** y **Estructura**. A continuación se listan las clasificaciones mayormente utilizadas en la industria:

#### 1. Dirección del flujo.

- **Flujo paralelo:** Los dos fluidos caliente y frío entran por el mismo extremo del intercambiador y fluyen en la misma dirección intercambiando calor hasta alcanzar una temperatura próxima la una

de la otra, es decir, los fluidos tratan de alcanzar el equilibrio térmico entre ellos.

- **Contraflujo:** Cada uno de los fluidos entran al intercambiador por diferentes extremos y se presenta el contraflujo cuando los dos fluidos fluyen en la misma dirección, pero en sentido opuesto. Este tipo de intercambiador puede presentar una temperatura más alta en el fluido frío y más baja en el fluido caliente una vez realizada la transferencia de calor, por lo que es más eficiente térmicamente si lo comparamos con el flujo paralelo.
- **Flujo cruzado:** En el intercambiador que presenta un flujo cruzado, uno de los fluidos fluye de manera perpendicular al otro fluido. Uno de los fluidos pasa a través de los tubos mientras que el otro pasa alrededor de dichos tubos perpendicularmente.
- **Paso simple:** Sí el fluido sólo intercambia calor una sola vez, se denomina intercambiador de calor de paso simple o de un solo paso, en ocasiones la transferencia de calor no es lo suficientemente para alcanzar la temperatura deseada por lo que se emplea un método que combina dos o más intercambiadores en serie.
- **Múltiples pasos:** Cuando los fluidos del intercambiador intercambian calor más de una vez, se denomina intercambiador de múltiple pasos.

## 2. Estructura.

- **De placas:** La configuración del intercambiador de placas consta de un empaquetamiento de finas placas o láminas de metal corrugadas de alto coeficiente de transferencia que favorece la transferencia de calor. La conformación corrugada permite que se produzcan flujos turbulentos a velocidades relativamente pequeñas (0.25 a 1 m/s).
- **De haz de tubos y carcasa:** La configuración de tubos y carcasa es la construcción más básica y común de los intercambiadores de calor, debido a ser el sistema de tubos más empleado se le denomina intercambiador de tubos sin más. El fluido que circula por el interior de los tubos se denomina flujo interno y el fluido que circula por la carcasa flujo externo.
- **De tubos concéntricos:** Este tipo de intercambiadores consta de dos tubos concéntricos de diámetros diferentes ensamblados uno dentro del otro, llamado intercambiador de calor de tubo doble o tubos concéntricos. En este dispositivo, el fluido caliente circula por el conducto interno cediendo calor al fluido de menor temperatura que circula por su sección anular (camisa o encamisado).

Se considera necesario añadir que de todos estos intercambiadores mencionados, presenta particular interés para nuestro estudio el intercambiador de placas[23], pues el mismo presenta tres características que lo hacen sobresalir por encima de los demás, estas son:

- Placas ultradelgadas(0.5 y 0.9 mm) con un alto coeficiente de transferencia de calor con lo cual mejora la eficiencia.
- Precisan de muy poco espacio para su montaje en comparación con los intercambiadores de tubo y carcasa o los de doble tubo.
- Facilidad en el mantenimiento.

### 3.3.1. Modelado del intercambiador de calor

A diferencia de la bomba de calor, este equipo será modelado a través de un script de Matlab, el mismo se encuentra en el capítulo “Anexos” de este documento. Tomando como base las ecuaciones que rigen el comportamiento físico de un intercambiador de calor. Para nuestra aplicación en concreto, tomaremos como objeto a modelar un intercambiador de calor de placas, por tanto el mismo será a contraflujo, para una mayor transferencia de calor por unidad de área, por consiguiente, más eficiente.

Para comenzar con el modelado de nuestro intercambiador, necesitamos tener en cuenta la transferencia de calor por conducción, la misma viene expresada por la Ley de Fourier a través de la siguiente ecuación:

$$Q = U * A * dT \quad (3.1)$$

Donde:

- U: coeficiente de transferencia de calor ( $W/m^2K$ )
- A: área de transferencia de calor ( $m^2$ ).
- dT: gradiente de temperatura (K)

Además de esto, el calor intercambiado por dos fluidos se determina por la aplicación simultánea de la ecuación 3.1 junto con las siguientes:

$$Q = m_f * C_{pf} * (T_{fs} - T_{fe}) \quad (3.2)$$

$$Q = m_c * C_{pc} * (T_{cs} - T_{ce}) \quad (3.3)$$

Donde:

- $m_f$ : caudal másico del fluido frío (kg/s).
- $m_c$ : caudal másico del fluido caliente (kg/s).
- $C_{pf}$ : calor específico del fluido frío ( $J/kg^\circ C$ )
- $C_{pc}$ : calor específico del fluido caliente ( $J/kg^\circ C$ ).
- $T_{fs}$ : temperatura de salida del fluido frío ( $^\circ C$ ).
- $T_{fe}$ : temperatura de entrada del fluido frío ( $^\circ C$ ).
- $T_{cs}$ : temperatura de salida del fluido caliente ( $^\circ C$ ).
- $T_{ce}$ : temperatura de entrada del fluido caliente ( $^\circ C$ ).

En estas expresiones, aún conociendo U y A, y dos temperaturas, la de entrada del fluido caliente y salida del fluido frío, aún nos quedan dos temperaturas por saber. Para resolver este problema Nusselt[21] desarrolló el método que lleva por nombre *Número de Unidades de Transmisión*(NTU). El método fue perfeccionándose luego por Kays y London[39], consiste en determinar el intercambio de calor por cada grado de diferencia de temperatura. El NTU se define como:

$$NTU = \frac{U * A}{(m * C_p)_{min}} \quad (3.4)$$

Al igual que se definen las siguientes expresiones de capacidad y efectividad como se muestra:

$$C_r = \frac{(m * C_p)_{min}}{(m * C_p)_{max}} \quad (3.5)$$

$$\varepsilon = \frac{T_{fs} - T_{fe}}{T_{ce} - T_{fe}}, \quad m_f * C_{pf} \leq m_c * C_{pc} \quad (3.6)$$

$$\varepsilon = \frac{T_{ce} - T_{cs}}{T_{ce} - T_{fe}}, \quad m_f * C_{pf} \geq m_c * C_{pc} \quad (3.7)$$

La efectividad es el cociente entre el calor realmente intercambiado y el máximo que podría transmitirse en un intercambiador en contracorrientes de área infinita.

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_{max}} \tag{3.8}$$

$$Q_{max} = (m * C_p)_{min} * (T_{ce} - T_{fe}) \tag{3.9}$$

Seguidamente, se muestra una gráfica[39] de efectividad en intercambiadores de calor a contraflujo:

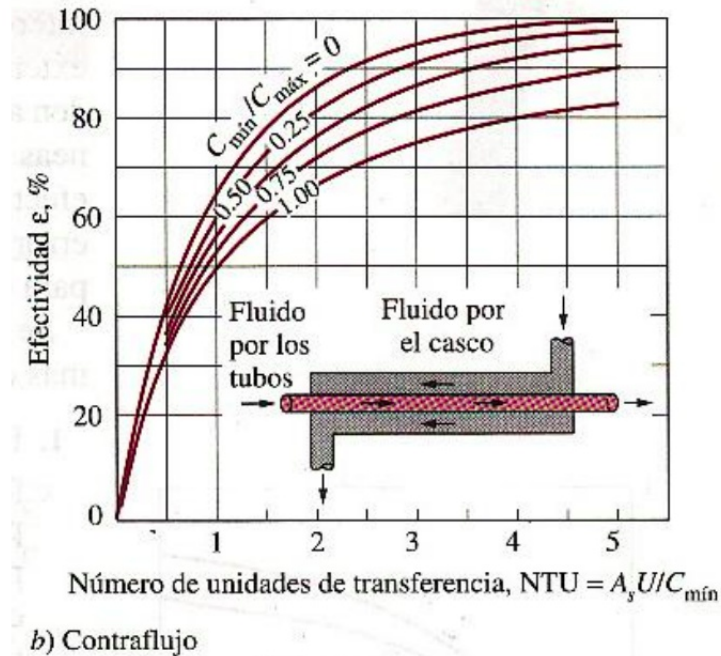


Figura 3.10: Efectividad en intercambiadores de calor. Fuente: [39]

Seguidamente el bloque funcional programado en Matlab para hacer función de intercambiador de calor, en el mismo figuran tanto las variables de entrada como las de salida del mismo, de igual manera ambas se listan a continuación de la imagen.

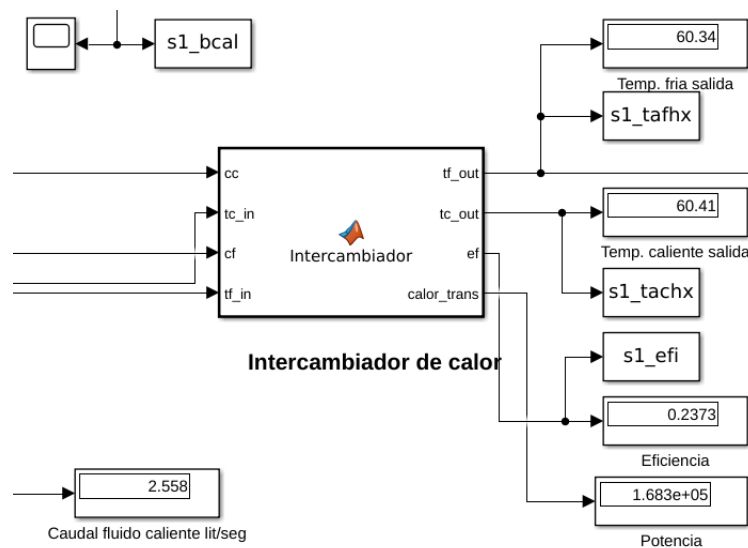


Figura 3.11: Modelado de un intercambiador de calor Matlab. Fuente: Propia

Donde:

- cc: caudal del fluido caliente (lit/s).
- $tc_{in}$ : temperatura de entrada del fluido caliente ( $^{\circ}\text{C}$ ).
- cf: caudal del fluido frío (lit/s)
- $tf_{in}$ : temperatura de entrada del fluido frío ( $^{\circ}\text{C}$ ).
- $tf_{out}$ : temperatura de salida del fluido frío ( $^{\circ}\text{C}$ ).
- $tc_{out}$ : temperatura de salida del fluido caliente ( $^{\circ}\text{C}$ ).
- ef: eficiencia del intercambiador.
- calor-trans: potencia del intercambiador (W).

### 3.4. Depósito de almacenamiento de agua caliente sanitaria

El depósito de almacenamiento de ACS tiene especial atención en nuestro modelado de la instalación. La respuesta que pueda tener el mismo ante las modificaciones en los caudales de entrada y de salida como a sus respectivas temperaturas es sumamente importante para comprender la dinámica de la instalación. Los depósitos de acumulación de ACS pueden ser interacumuladores o acumuladores, según contengan o no en su interior al intercambiador de calor. Los depósitos deben disponer de las siguientes conexiones:

- Entrada de agua de consumo con un deflector que la dirija hacia la parte inferior del depósito, de manera que se reduzca la zona de mezcla favoreciendo la estratificación del agua en su interior.
- Salida del ACS hacia consumo, situada en la parte superior del depósito.
- Vaciado en la parte inferior para la purga de lodos y para la toma de muestras para los análisis de legionella.
- Registro para limpieza.
- Tomas para la conexión de los sistemas de producción, bien con intercambiadores exteriores de placas, o bien con serpentines interiores.
- Se requieren otras conexiones para sondas de regulación, termómetros, válvula de seguridad, recirculación de ACS.
- Asimismo, por tratarse de equipos metálicos con riesgo de corrosión, suelen incorporar la posibilidad de protecciones catódicas.

#### 3.4.1. Modelado del depósito de almacenamiento de ACS

El modelado del depósito se realizará a través de bloques predefinidos de Simscape, una toolbox de Matlab, siguiendo como base para ello la ecuación de balance de energías en un depósito[37].

$$E_{in} - E_{out} = E_{sto}$$

Donde:

- $E_{in}$ : Razón de energía que entra al sistema
- $E_{out}$ : Razón de energía que sale del sistema
- $E_{sto}$ : Razón de energía que se acumula en el sistema

En términos matemáticos viene expresado de la siguiente manera:

$$f * \rho_i * h_i(t) - f * \rho_o * h_o(t) = \frac{d}{dt}[V * \rho * u(t)] \quad (3.10)$$

Donde:

- $f$ : Caudal volumétrico [ $m^3/h$ ]
- $\rho_i, \rho_o$ : Densidad del líquido de entrada y salida respectivamente [ $kg/m^3$ ]
- $h_i(t), h_o(t)$ : Entalpías de entrada y salida respectivamente [ $J/kg$ ]
- $V$ : Volumen de líquido en el tanque [ $m^3$ ]
- $u(t)$ : Energía interna del líquido en el tanque [ $J/kg$ ]

La ecuación 3.10 expresada en términos de temperatura quedaría:

$$f * \rho_i * C_{pi} * T_i(t) - f * \rho_o * C_{po} * T_o(t) = \frac{d}{dt}[V * \rho * C_v * T_o(t)] \quad (3.11)$$

Donde:

- $C_{pi}, C_{po}$ : Calor específico a presión constante del líquido de entrada y salida respectivamente ( $J/[kg^\circ C]$ )
- $C_v$ : Calor específico del líquido a volumen constante ( $J/[kg^\circ C]$ )
- $T_i(t), T_o(t)$ : Temperaturas del líquido de entrada y salida respectivamente [ $^\circ C$ ]

Como se trabajará teniendo en cuenta un sólo depósito de acumulación de ACS. El mismo cuenta con los siguientes caudales de entrada y salida:

- Caudales de entrada.
  1. Agua caliente procedente del intercambiador.
  2. Agua procedente del circuito de retorno.
  3. Agua fría de reposición.
- Caudales de salida.
  1. Extracción de agua hacia el intercambiador de calor.
  2. Agua hacia el consumo.

Para que se cumpla el balance de masas[37] dentro del depósito y siempre haya el mismo volumen de agua(lo deseado), los caudales de entrada deben ser equivalentes a los caudales de salida, si no, o bien se desborda el depósito(poco probable pues son depósito cerrados) o bajará el nivel de líquido dentro del mismo. Teniendo un conocimiento sobre la instalación de ACS, sabemos que la bomba de calentamiento es la encargada de extraer agua del depósito, hacerla circular por el intercambiador y devolverla caliente al mismo, por tanto:

$$\text{Caudal procedente del intercambiador} = \text{Extracción de agua hacia el intercambiador}$$

Por otra parte, el caudal que se extrae hacia el consumo puede terminar de tres formas distintas:

1. No es consumido por los clientes y retorna completamente al depósito.
2. Es consumida una fracción y el resto es retornado al depósito.
3. Es consumido completamente y no se retorna nada al depósito

En la primera de estas opciones el caudal extraído hacia el consumo es totalmente igual al caudal de retorno y la reposición de agua fría es cero. En la segunda de ellas, la fracción que es consumida es repuesta al depósito en forma de agua fría y el resto regresa por el circuito de retorno. Por último, en la tercera opción, todo el caudal que va hacia el consumo es repuesto en forma de agua fría y no retorna nada hacia el depósito. Visto de forma matemática quedaría así:

$$f_{ec} = f_r + f_{raf} \quad (3.12)$$

Donde:

- $f_{ec}$ : Caudal extraído hacia el consumo.
- $f_r$ : Caudal de retorno.
- $f_{raf}$ : Caudal de reposición de agua fría.

La característica singular de cada uno de estos caudales relacionados a través del depósito de acumulación es que los cinco van a encontrarse a temperaturas diferentes, de aquí, que nuestra ecuación de balance de energías en el depósito de acumulación de ACS será la siguiente:

$$f_c * \rho * C_p (T_c - T_{ext}) - f_{raf} * \rho * C_p * (T_{dep} - T_{af}) - f_r * \rho * C_p * (T_{dep} - T_{ret}) = \frac{d}{dt} [V * \rho * C_v * T_{dep}] \quad (3.13)$$

Esta es la ecuación final que será trasladada a bloques de Simscape para crear el modelo del depósito de acumulación y poder simular.

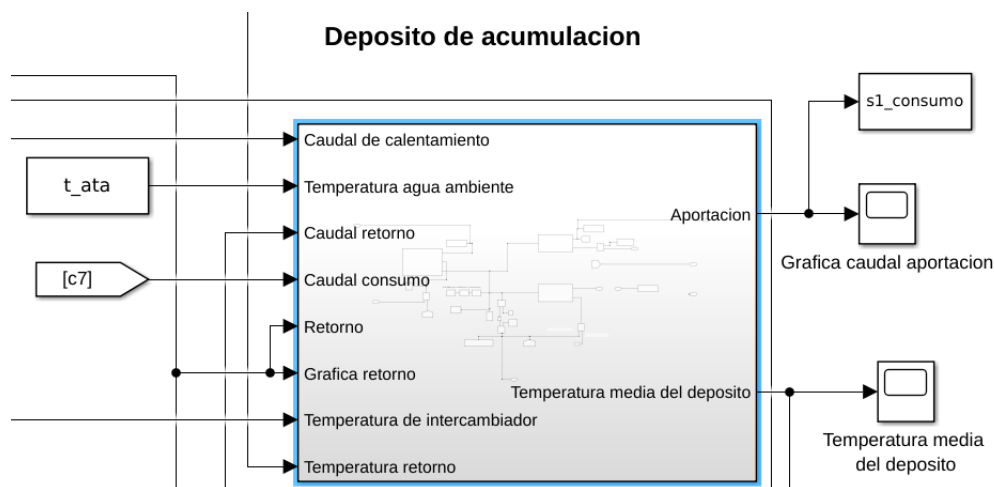


Figura 3.12: Modelo del depósito de acumulación en Simscape. Fuente: Propia

### 3.5. Bombas de circulación

En las instalaciones de ACS se emplean bombas de secundario cuando la producción se realiza por acumulación con intercambiadores externos, y bombas de retorno para la circulación del agua por todo el edificio. El circuito primario es un circuito cerrado en el cual el agua tiene muy poca agresividad, ya que tras las primeras purgas se le elimina el oxígeno disuelto y habitualmente es un circuito que solo recibe agua nueva en las reparaciones o reposiciones de fugas. Sin embargo, los circuitos secundarios y de recirculación son circuitos abiertos, en los que se está recibiendo de manera continua agua de consumo, la cual es mucho más agresiva con los materiales constitutivos de las instalaciones, además los materiales en contacto con esa agua no deben modificar su potabilidad. Las bombas de la instalación serán modeladas a través del bloque de Simscape “Controlled Mass

Flow Rate”. El bloque dispone de tres entradas, la tabla mostrada luego de la imagen explica cada uno de los puertos del bloque.

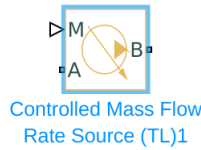


Figura 3.13: Modelo de las bombas de circulación de Simscape. Fuente: Propia

Tabla 3.5: Puertos del bloque de la bomba en Simscape

Puerto	Función
A	Entrada del fluido
B	Salida del fluido
M	Valor de caudal másico asignado a la bomba

Hay que añadir que al bloque internamente se le parametriza el área transversal de la entrada A y la salida B respectivamente según el tipo de instalación al que se aplique.

### 3.6. Tuberías

Las tuberías son un componente fundamental en toda instalación, pues es el medio de transporte por excelencia de los fluidos, en este caso, el agua caliente. Son muchos los metros de tuberías que tiene una instalación centralizada de ACS, y generalmente su sección transversal va cambiando, no siempre es la misma. Uno de los aspectos más importantes de las instalaciones centrales de ACS es el aislamiento térmico, no debe olvidarse que se trata de instalaciones que funcionan durante todo el año, y aunque las temperaturas de distribución puedan ser inferiores a las de las instalaciones de calefacción, en el conjunto de la temporada pueden presentar mayores pérdidas de calor. Asimismo, para la prevención de la legionelosis se utilizan en la actualidad temperaturas más altas, lo que implica mayores necesidades de aislamiento. Además, cuanto mayor sea el mismo menos problemas se tendrán para mantener las temperaturas necesarias en los puntos más alejados. En la IT 1.2.4.2.1.2 del RITE[24] se especifica el aislamiento térmico para las instalaciones de ACS. El bloque que se empleará para modelar las tuberías de la instalación será “Pipe” de Simscape, las tablas 3.6 y 3.7 reúnen la función de cada puerto así como las características para parametrizar el bloque.

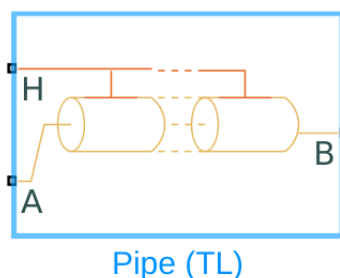


Figura 3.14: Modelo de las tuberías en Simscape. Fuente: Propia



Tabla 3.6: Puertos del bloque que modela las tuberías en Simscape

Puerto	Función
A	Entrada del fluido
B	Salida del fluido
H	Puerto de conservación térmica asociado a la pared de la tubería

Tabla 3.7: Características internas de las tuberías en Simscape

Características	Unidad de medida/Valor
Longitud	metros
Área de la sección transversal	$m^2$
Diámetro hidráulico	metros
Elevación entre el puerto A y el B	metros
Fricción viscosa fluido laminar	64
Número de Reynolds para fluido laminar	2000
Número de Reynolds para fluido turbulento	4000
Número de Nusselt para la transferencia de calor	3.66

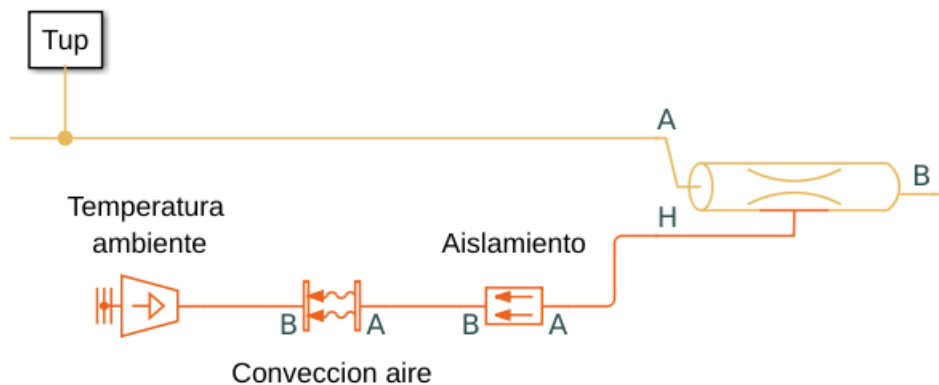


Figura 3.15: Modelo de una tubería con pérdidas de calor en Simscape. Fuente: Propia

La imagen 3.13 muestra el modelado de una tubería con las pérdidas térmicas que puede llegar a tener. El bloque llamado “Aislamiento” modela las pérdidas por conducción que tiene el material de aislamiento térmico que envuelve las tuberías. El bloque llamado “Convección aire” modela la transferencia de calor convectiva debido al aire que la circunda. Todos en su conjunto permiten conocer la cantidad de Wattios que está disipando la tubería en todo momento.

### 3.7. Presión

Además de las temperaturas hay que tener en cuenta la presión de trabajo. En el campo de aplicación del ACS los metales, con la excepción del galvanizado, no presentan problemas de temperatura ni de presión. Los termoplásticos, sin embargo, cuanto mayor es la temperatura de trabajo menor presión soportan, por lo que al seleccionar el material hay que tener en cuenta los dos criterios. La presión en el sistema vendrá modelada por el bloque de Simscape “Controlled Pressure Source”.

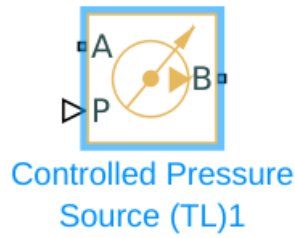


Figura 3.16: Modelo de una tubería con pérdidas de calor en Simscape. *Fuente: Propia*

Tabla 3.8: Puertos del bloque de presión en Simscape

Puerto	Función
A	Entrada del fluido
B	Salida del fluido
P	Valor de presión asignado a la instalación

El modelado de todos los elementos que han sido citados, en su conjunto, permiten simular el funcionamiento de una instalación de agua caliente sanitaria muy similar a la mostrada en la figura 3.15. Una vez conocido el sistema en específico a estudiar, se parametrizan los bloques descritos y se encuentra listo para estudiar las reacciones que puede desarrollar frente a los estímulos provocados.

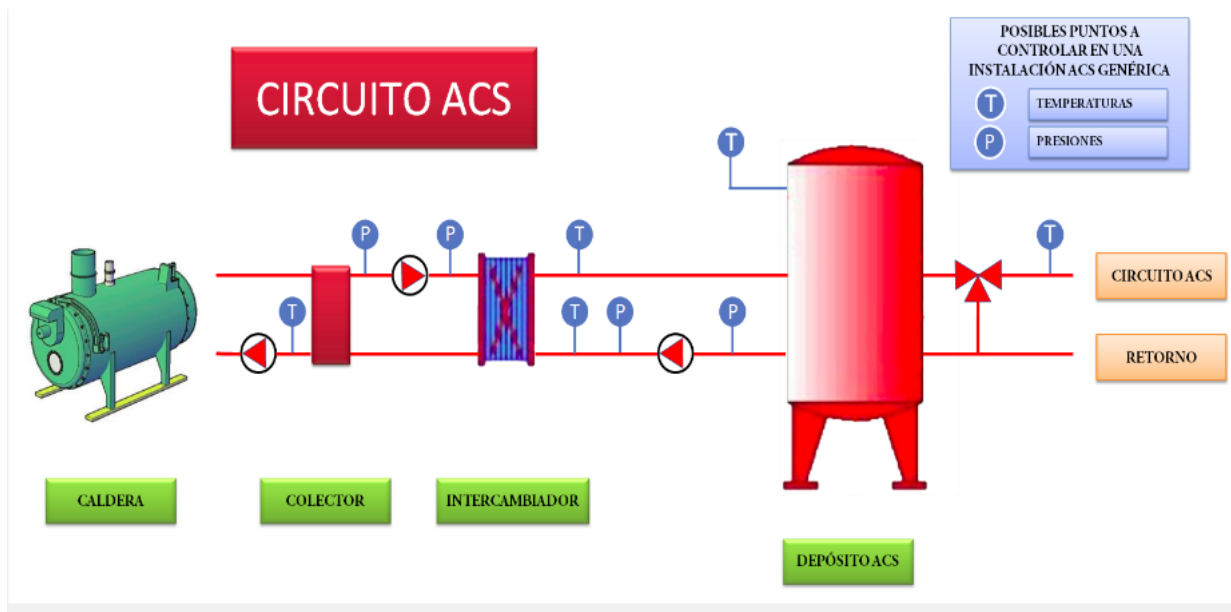


Figura 3.17: Esquema de una instalación de agua caliente sanitaria genérica. *Fuente: Propia*

## Capítulo 4

# Análisis energético de una instalación real

Es el momento de enfocar nuestra simulación hacia una instalación real de producción de agua caliente sanitaria. Se utilizará el modelo creado en el capítulo anterior, el mismo será parametrizado según las características físicas reales que presenta la instalación en funcionamiento. Seguidamente se realizará un análisis energético para estimar cuál es el consumo que presenta la misma bajo las condiciones de funcionamiento actual pues este dato se desconoce. Una vez logrado esto, se identificarán las principales variables que repercuten sobre la eficiencia del proceso y de que forma se podrían modificar para, tomando esa información como base, hacer propuestas de políticas de gestión que mejoren su eficiencia.

## 4.1. Descripción de las instalaciones de producción de agua caliente sanitaria en la zona de villas del Ritz-Carlton Abama

Nuestro estudio estará enfocado hacia las instalaciones de producción de agua caliente sanitaria del Hotel Ritz-Carlton Abama, específicamente sobre la zona que se conoce como “Las Villas”.

El hotel Abama es un Resort de lujo ubicado en el municipio Guía de Isora, provincia Santa Cruz de Tenerife. Cuenta con 461 habitaciones y suites divididas entre la Ciudadela, con 313 habitaciones y 148 exclusivas Villas. Además cuenta con 12 restaurantes y bares, Spa de lujo y siete piscinas, aparte de las dos piscinas para uso exclusivo de las villas. La instalación cuenta con una compleja red para llevar aire acondicionado, calefacción, frío a cocinas y agua caliente sanitaria a cada uno de los consumidores finales. Nuestro estudio se centrará en las instalaciones de agua caliente sanitaria del hotel.

El circuito de ACS de esta edificación, como la mayoría de los sistemas centralizados de este tipo, cuenta con dos redes de agua denominadas “Circuito primario” y “Circuito secundario”. Se encuentran estructurados de esta manera pues el primero de ellos es un circuito cerrado con agua tratada para eliminar la mayor parte de las impurezas y por tanto alargar la vida útil de los equipos que tienen contacto con la misma. En cambio el segundo de estos circuitos es un circuito abierto pues es el encargado de llevar el agua a la temperatura deseada al usuario final. El equipamiento instalado en este último es un poco más robusto que el primero a la hora de tratar con las impurezas del agua. Seguidamente se lista cada uno de los circuitos así como el equipamiento presente en los mismos:

### 1. Circuito primario.

- Bomba de calor.
- Bomba de impulsión.
- Válvula de 3 vías del primario.

### 2. Circuito secundario.

- Intercambiador de calor.
- Bomba de calentamiento.
- Depósito acumulador.
- Válvula mezcladora de ACS.
- Bomba de retorno.

Las figura 4.1 muestra un esquema aproximado del funcionamiento del circuito primario de calentamiento de agua. El circuito primario cuenta con el elemento fundamental y fuente de calor que puede ser tanto una caldera como una bomba de calor, una pequeña bomba para mover el fluido a través del condensador de la bomba de calor y un depósito acumulador de agua caliente, éste depósito cuenta con una gran inercia térmica para conservar el calor transferido al agua el mayor tiempo posible, pues el mismo, a su vez dará servicio a las subestaciones de producción de ACS que cubrirán la demanda final.

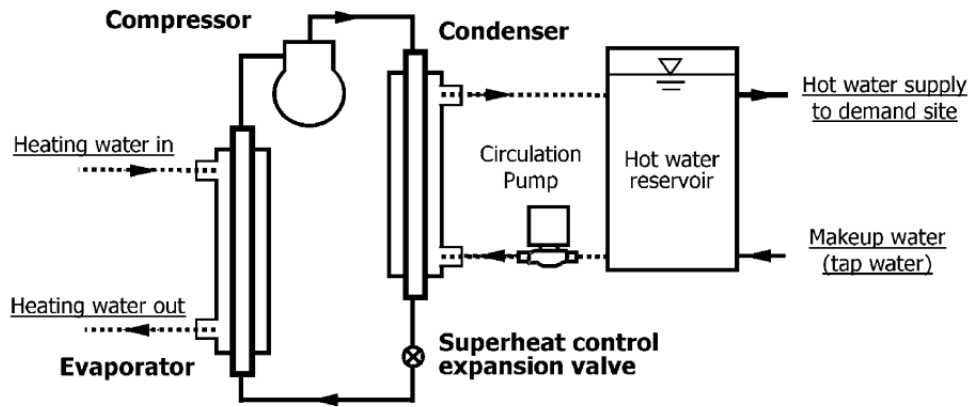


Figura 4.1: Circuito primario de calentamiento de ACS. Fuente: [20]

#### 4.1.1. Bomba de calor WWB0900XHL

Esta instalación cuenta con un circuito primario de  $5.15 \text{ m}^3$  de agua que da servicio a cinco subestaciones de producción, cada una correspondiente a cada villa o calle y al Restaurante “El Mirador”. El agua es calentada por la bomba de calor y enviada hacia las subestaciones en todo momento. La bomba de calor utilizada en el circuito primario se muestra a continuación, junto con las principales características técnicas de la misma.



Figura 4.2: Bomba de calor Booster. Fuente: Hotel Abama

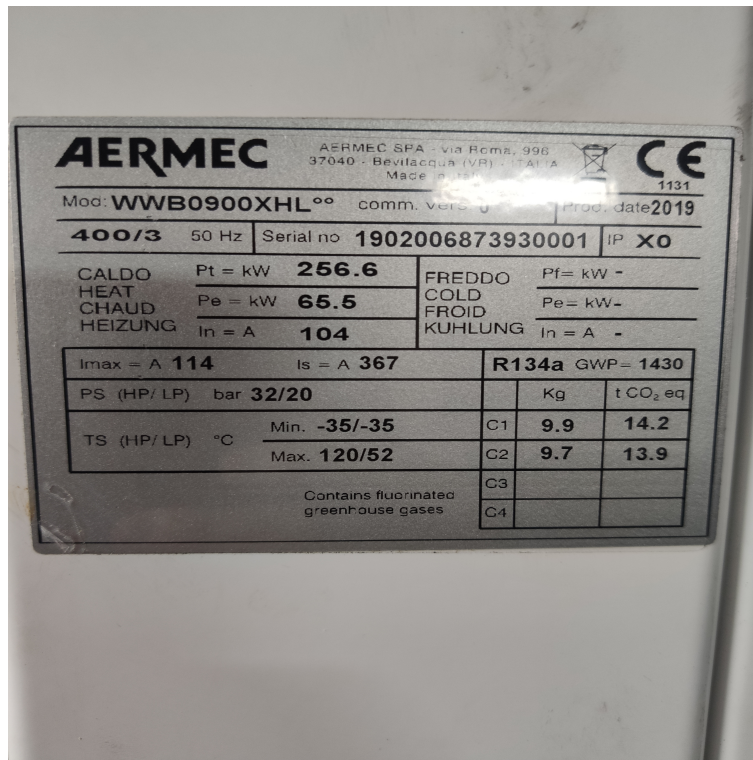


Figura 4.3: Características técnicas de la bomba de calor. Fuente: Hotel Abama

#### 4.1.2. Bombas de impulsión Grundfos

Las bombas de impulsión mueven el agua por el circuito primario hasta las cinco subestaciones de producción, dicha agua circula por el primario de los intercambiadores de calor o no en función de si hace falta calentar el depósito de cada una o no. Esto se logra mediante dos bombas dispuestas en paralelo y con la correspondiente rotación horaria para asegurar el alargamiento de su vida útil. Los motores que accionan las bombas en la instalación se muestran a continuación y la tabla 4.1 recoge sus principales características:



Figura 4.4: Motor de bombas de impulsión del circuito primario. Fuente: Hotel Abama

Las válvulas de tres vías del primario se encuentran instaladas en la entrada del primario de cada uno de los intercambiadores de calor de las subestaciones de producción, su función es dejar pasar más o menos caudal por el intercambiador y su parámetro de operación es la temperatura media del depósito de cada subestación. Si no es necesario calentar el depósito la misma se cierra y con esto evita que se disipe el calor que trae el agua en las placas del intercambiador.

Tabla 4.1: Características del motor de la bomba de impulsión

Características	Valor
Fabricante	Grundfos
Modelo	MG100LB4-28-D1
Potencia	2.2 kW
Tensión nominal	3 x 220-240D/380-415Y V
Intensidad nominal	9.25/5.35 A
Velocidad nominal	1440-1450 rpm

### 4.1.3. Intercambiador de calor Alfa-Laval

Por otro lado el circuito secundario cuenta con otro tipo de equipamiento, justo después de la válvula de tres vías del primario se encuentra el intercambiador de calor. Los intercambiadores instalados en las villas son del fabricante Alfa-Laval y la siguiente tabla muestra sus características.

Tabla 4.2: Intercambiador de calor calle 1-3

Características	Valor
Fabricante	Alfa-Laval
Modelo	M3
Volumen	1.5 litros
Número de placas	9

Tabla 4.3: Intercambiadores de calor calle 4

Características	Valor
Fabricante	Alfa-Laval
Modelo	M3
Volumen	1.5 litros
Número de placas	18

### 4.1.4. Bombas de calentamiento Grundfos

Las bombas de calentamiento son las encargadas de hacer circular el agua desde el acumulador de ACS a través del secundario del intercambiador de calor y luego esta agua caliente de vuelta al depósito acumulador. Se encuentran dispuestas dos bombas en paralelo cuyo funcionamiento se va rotando para prolongar su vida útil y con esto su tiempo de servicio. Las que se encuentran instaladas en el hotel poseen las características que se listan en la tabla 4.4.

Tabla 4.4: Características del motor de la bomba de calentamiento

Características	Valor
Fabricante	Grundfos
Modelo	MG80B2-19FT100-B
Potencia	0.75 kW
Tensión nominal	3 x 220-240D/380-415Y V
Intensidad nominal	4.50/2.60 A
Velocidad nominal	2820-2850 rpm

#### 4.1.5. Depósito acumulador

La acumulación en cada villa está implementada a través de dos depósitos de  $5\text{ m}^3$  cada uno. Los mismos cuentan con unas dimensiones de 1.5 metros de diámetro y 2.8 metros de altura. Actualmente se encuentran dando servicio sólo uno de los dos disponibles, no obstante existe la posibilidad mediante válvulas manuales de conectarlos en paralelo o en serie, este último se considera mejor pues junto con la geometría del depósito (más alto que ancho) favorecen la estratificación del agua dentro del mismo [4][16].

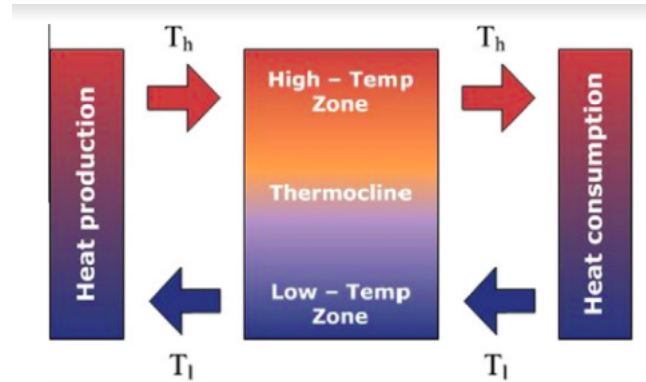


Figura 4.5: Esquemático de estratificación dentro de un depósito de ACS. Fuente: [4]

La válvula mezcladora de ACS se encuentra instalada a la salida del depósito de ACS. Su función es llevar la temperatura del agua que se distribuye hacia el consumo a un valor deseado determinado. Es una válvula de tres vías que tiene conectada en la entrada 1 el agua caliente proveniente del depósito. En la entrada 2 está conectada la línea de agua a temperatura ambiente proveniente de la calle. Tiene una regulación proporcional y la misma se encarga de realizar la mezcla para que la temperatura de salida sea la deseada.

#### 4.1.6. Bombas de retorno Grundfos

Las bombas de retorno tienen una función especial en las instalaciones de ACS centralizadas. Los sistemas centralizados de ACS tienen la particularidad de mantener constante una circulación de agua caliente todo el tiempo a través de la red de tuberías. Esto se hace así para mantener el confort de los clientes, de modo que al abrir el grifo encuentren agua caliente al instante y no tengan que esperar varios segundos o minutos (si la red de tuberías es muy grande) para que les llegue el agua a la temperatura deseada. Las bombas que se encuentran instaladas en las subestaciones de cada villa son dos, dispuestas de igual manera que las anteriores, en paralelo para favorecer su rotación horaria y así prolongar el tiempo de su servicio. Sus características se recogen a continuación en la tabla.

Tabla 4.5: Características del motor de la bomba de retorno

Características	Valor
Fabricante	Grundfos
Modelo	MG71B2-14FT85-C
Potencia	0.75 kW
Tensión nominal	3 x 220-240D/380-415Y V
Intensidad nominal	1.44/0.83 A
Velocidad nominal	2830-2850 rpm

Seguidamente una imagen tomada del software SCADA presente en el hotel donde muestra la disposición de los equipos en el circuito secundario correspondiente a la subestación de producción de la Calle 1.



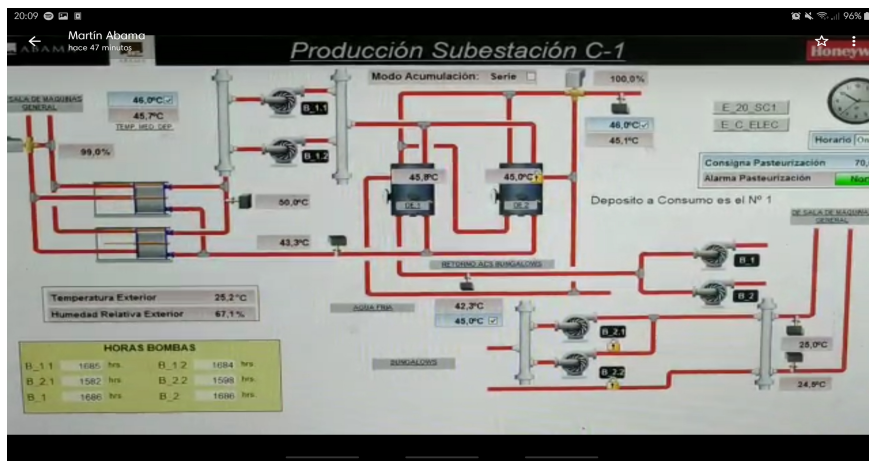


Figura 4.6: Subestación de producción Calle 1. Fuente: SCADA Honeywell-Abama

Hay que añadir que toda la instalación trabaja con un valor de presión constante de 5.5 bar. Este valor lo aseguran las bombas del circuito de agua fría que no son objeto de estudio del presente trabajo.

## 4.2. Análisis energético de la instalación actual

Se realizará un estudio energético sobre la subestación de producción correspondiente a la Calle 1, luego basándonos en el mismo se hará una extrapolación al resto de las villas para estimar el consumo energético de todo el complejo de villas sobre el hecho que son similares las cuatro.

El sistema de agua caliente sanitaria del hotel Abama se encuentra funcionando durante las 24 horas del día sin pausa, salvo una vez al año que se lleva al sistema a un punto de operación de pasteurización. Esto último se realiza para eliminar la posible legionella que pueda residir en los depósitos y en la red de tuberías. Las consignas de los lazos de control se mantienen constantes incluso cuando no existe consumo por parte del usuario final, esto es, en horas de la madrugada y en horas del día en que casi no existe consumo. Esto representa unas pérdidas energéticas grandes para el sistema pues el mismo está transformando grandes cantidades de energía eléctrica en energía térmica la cuál no se está consumiendo, por tanto se desecha. El sistema tiene una configuración fija de los puntos de consigna y se expone en la tabla 4.6. Para tener una idea de la energía diaria que se invierte en calentar el agua de una villa podemos ver la gráfica de la figura 4.8.

Tabla 4.6: Punto de operación actual de la instalación de ACS del hotel Abama

Variable	Magnitud
Temperatura del primario	70 °C
Temperatura del depósito	60 °C
Temperatura de distribución	55 °C
Temperatura de retorno	51.3 °C
Histéresis de la bomba de calentamiento	4 °C
Bomba de retorno sin control	6.6 m <sup>3</sup> /h

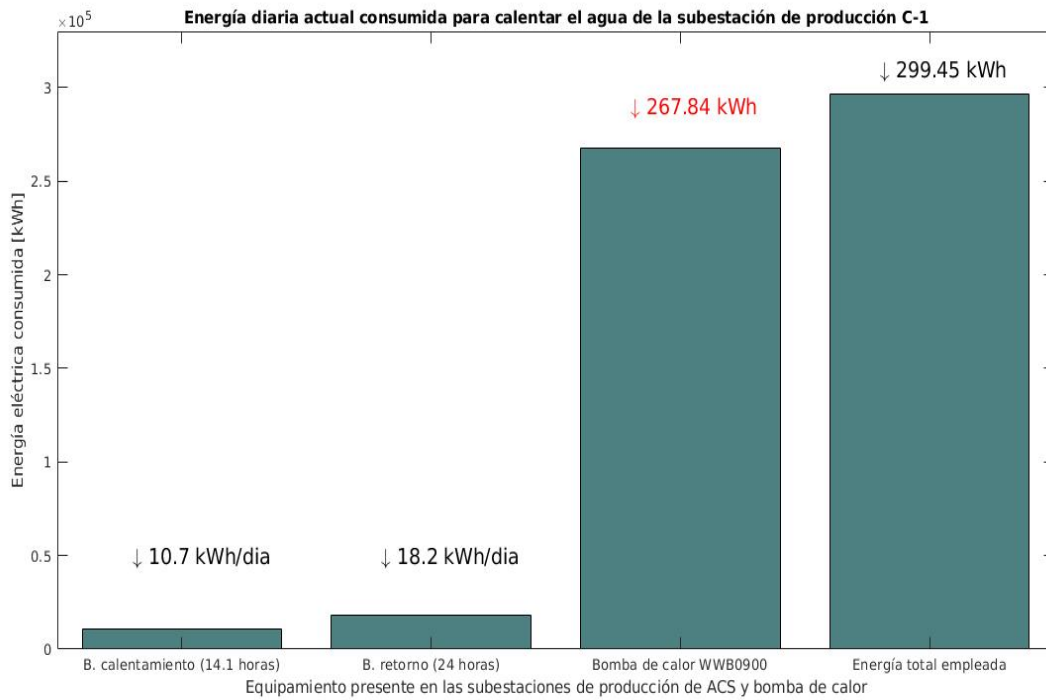


Figura 4.7: Energía diaria consumida por la Subestación de producción Calle 1. Fuente: Propia

Es notable la repercusión que tiene dentro del consumo total de la instalación la bomba de calor, es el mayor elemento consumidor dentro del conjunto llevándose aproximadamente un **90%** del total, mientras que las bombas de calentamiento y retorno tienen una participación mas discreta en la repartición de energía consumida.

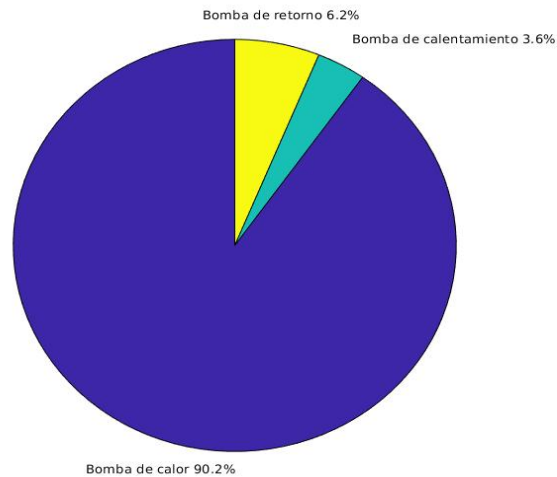


Figura 4.8: Consumo de la subestación de producción por porcentajes. Fuente: Propia

Como se percibe, si se intentaran realizar modificaciones sobre el sistema para ganar en ahorro y así el mismo ser más eficiente es necesario actuar sobre el elemento generador de calor, esto es, la bomba. Aún así, a través de repetidas simulaciones realizadas, se puede afirmar que no se puede actuar sobre la bomba de calor directamente sin antes actuar sobre el resto de variables que se encuentran entre esta y el consumidor final porque nuestra modificación sería en vano.

El elemento que “da la orden” de encendido a la bomba de calor es el depósito de acumulación de ACS, justo antes de la distribución al cliente. Mientras el mismo conserve el mayor tiempo posible la energía almacenada, menor cantidad de horas de funcionamiento será necesario demandar de la bomba de calor, y con esto, más ahorrará la instalación. Lo contrario también es válido, mientras más se derroche la energía almacenada en el depósito de acumulación, mayor será la demanda de calor a la bomba, más horas de funcionamiento acumulado tendrá la misma, menos ahorrará y menos eficiente será el sistema. Veamos en el siguiente epígrafe cómo afectan cada una de las variables al sistema global.

### 4.3. Repercusión del caudal de retorno sobre la instalación

Comenzaremos por el caudal de retorno, como fue comentado, el caudal de retorno no garantiza la presión ni el caudal de distribución de la instalación, su función es mantener el agua circulando por la red de tuberías constantemente para asegurar que en el momento en que se abra un grifo, haya agua caliente. Actualmente se encuentra fijado en  $6.6 \text{ m}^3/\text{h}$  con posibilidad de instalar un variador de velocidad en el mismo para modificar su punto de operación. Seguidamente se muestra cuánto afecta la variación del punto de consigna del caudal retorno a la temperatura del depósito, en la tabla 4.7 se recogen los puntos de operación del sistema. Se realizaron tres simulaciones y en las mismas se fue descendiendo el caudal de retorno para ver su repercusión.

Tabla 4.7: Punto de operación fijo con caudal de retorno variable

Variable	Magnitud
Temperatura del primario	70 °C
Temperatura del depósito	60 °C
Temperatura de distribución	55 °C
Histéresis de la bomba de calentamiento	4 °C
Temperatura inicial del depósito	55 °C
Bomba de retorno	$6.6 \text{ m}^3/\text{h} / 5 \text{ m}^3/\text{h} / 4 \text{ m}^3/\text{h}$

Como se puede observar, la histéresis del depósito está fijada en cuatro grados. En la primera simulación vemos como esto actúa como una perturbación muy grande que no deja al sistema llegar a su punto de consigna y se mantiene fijo alrededor de los 61 °C. En la segunda simulación se observa cómo el depósito alcanza los 62 °C de consigna y la bomba de calentamiento se apaga durante el tiempo establecido hasta que el mismo alcanza los 58 °C que vuelve a arrancar. Ya en la última de las simulaciones se nota como el depósito alcanza su punto de consigna cinco veces durante las ocho horas y la bomba de calentamiento puede parar de trabajar mientras la temperatura va en descenso. Esta última simulación representa un ahorro sustancial con respecto al resto, la siguiente tabla muestra por qué.

Figura 4.9: Repercusión del caudal de retorno sobre el depósito. Fuente: Propia

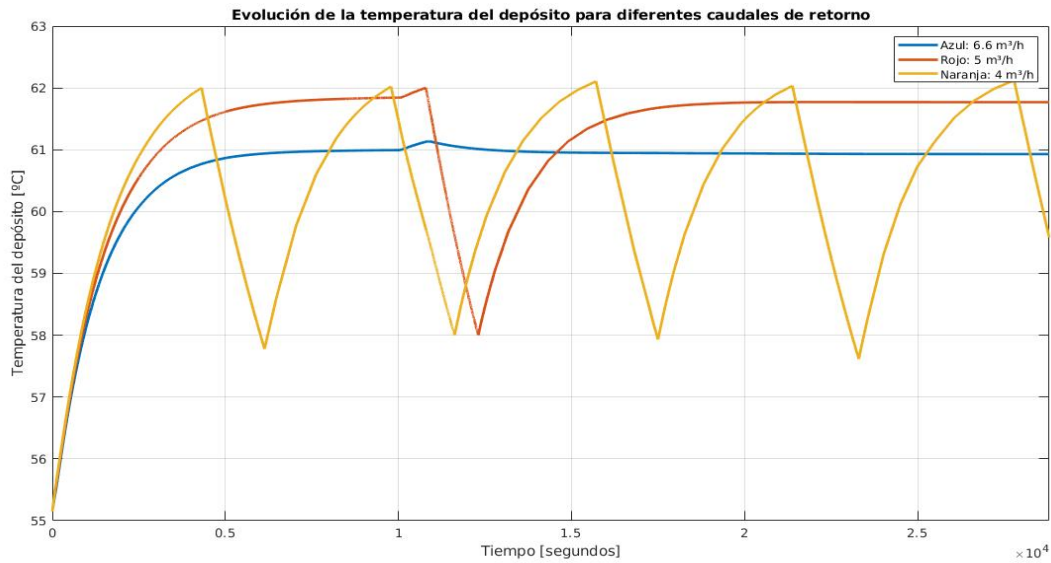


Tabla 4.8: Resultado de ahorro en las simulaciones variando el caudal de retorno

Número de simulación	Bomba de calentamiento (ON)	Energía utilizada
1	8 horas	6.07 kWh
2	7.56 horas	5.74 kWh
3	5.70 horas	<b>4.33 kWh</b>

Se puede notar fácilmente como cambiando la consigna de las bombas de retorno podemos conservar la energía dentro del depósito. Con ello se evitan arranques de las bombas de calentamiento innecesarios cuando no haya consumo de ACS en la instalación.

**Conclusión:** *Un caudal de retorno adecuado, puede contribuir a conservar la energía dentro del depósito de ACS mientras asegura el confort del usuario final.*

#### 4.4. Repercusión de la temperatura de distribución sobre la instalación

La temperatura de distribución es una consigna que se le fija a la válvula de tres vías mezcladora. A dicha temperatura saldrá el agua hacia los consumidores finales. De la misma manera que el caudal de retorno afecta a la temperatura del depósito lo hace también la temperatura de distribución.

Como se conoce, el agua caliente en su recorrido por la red de tuberías hasta el consumidor final y luego de vuelta pierde temperatura y por tanto energía, en el apartado 4.8.1. *Gasto térmico asociado a la distribución de ACS* se verá con mayor profundidad. Cuando el sistema se encuentra sin consumo el salto de temperatura entre la temperatura de distribución y la de retorno ronda los 2-3 °C. Esto significa que mientras mas baja sea nuestra temperatura de distribución, menor será la temperatura del agua de retorno al depósito de ACS. Esto último actuará como una perturbación para la consigna del depósito impidiendo en el peor de los casos, o ralentizando que se alcance. Si nos fijamos en la ecuación de balance de energías de un depósito de agua lo vemos mejor.

$$\rho * V * C_v * \frac{d}{dt}T = \rho * f_c * C_p * T_c + \rho * f_r * C_p * T_r - \rho * f_d * C_p * T_d \quad (4.1)$$

Donde:

- $\rho$ : densidad del agua ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ).
- $V$ : volumen del tanque ( $\text{m}^3$ ).
- $C_v$ : calor específico a volumen constante ( $\text{J}/(\text{mol} * \text{K})$ )
- $T$ : Temperatura media del tanque ( $^{\circ}\text{C}$ ).
- $f_c$ : caudal másico del agua caliente del intercambiador ( $\text{kg}/\text{s}$ ).
- $T_c$ : temperatura del agua caliente del intercambiador ( $^{\circ}\text{C}$ ).
- $f_r$ : caudal másico del agua de retorno ( $\text{kg}/\text{s}$ ).
- $T_r$ : temperatura del agua de retorno ( $^{\circ}\text{C}$ ).
- $T_d$ : temperatura del agua de distribución ( $^{\circ}\text{C}$ ).

La ecuación 4.1 muestra un balance de energías efectuado en un tanque con una entrada de agua caliente proveniente del intercambiador, una entrada proveniente del circuito de retorno y una salida de agua que va hacia el consumo. Asumiendo que la variable manipulada para mantener dentro del depósito una temperatura deseada es la temperatura que viene del intercambiador  $T_c$ , las temperatura de distribución y de retorno,  $T_d$  y  $T_r$  respectivamente actuarán como perturbaciones sobre el sistema. Veamos en la siguiente gráfica como se comporta.

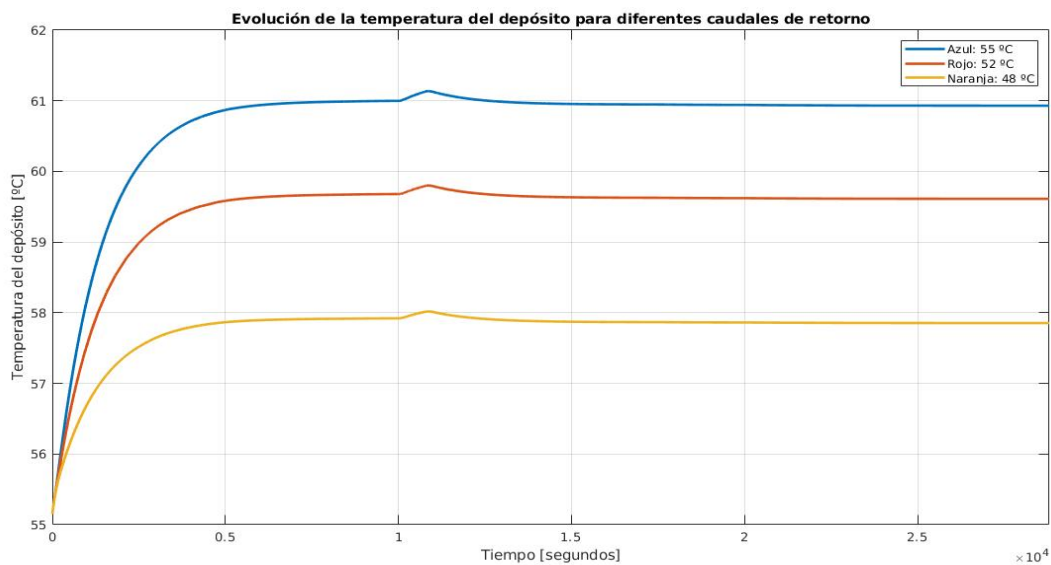


Figura 4.10: Repercusión de la temperatura de distribución sobre el depósito. *Fuente: Propia*

Los diferentes puntos de operación en los cuales se puso a trabajar al sistema se recogen en la tabla 4.9.

Tabla 4.9: Punto de operación fijo con temperatura de distribución variable

Variable	Magnitud
Temperatura del primario	70 °C
Temperatura del depósito	60 °C
Temperatura de distribución	55 °C / 52°C / 48°C
Histéresis de la bomba de calentamiento	4 °C
Temperatura inicial del depósito	55 °C
Bomba de retorno	6.6 m <sup>3</sup> /h

Se puede notar como a medida que la temperatura de distribución va descendiendo, al sistema le cuesta cada vez más trabajo alcanzar la consigna fijada para el depósito, esto se debe como se comentó anteriormente a la caída de la temperatura del agua a través de las tuberías. Esta caída cada vez mayor representa una perturbación cada vez más grande al sistema que no logra alcanzar su consigna. Si volvemos a fijarnos en la ecuación de balance 4.1, vemos como el flujo representa igualmente una perturbación, esto viene a corroborar los resultados de la simulación del apartado anterior, que afirma que el caudal de retorno afecta de manera directa la dinámica de temperaturas del depósito de acumulación.

**Conclusión:** *Un temperatura de distribución adecuada, puede contribuir a conservar la energía dentro del depósito de ACS. Cuando la combinamos con la variación del caudal de retorno se obtienen buenos resultados en la conservación de la temperatura del mismo.*

## 4.5. Repercusión de la temperatura del depósito de ACS sobre la instalación

El objetivo de este trabajo es, primeramente conocer en detalles el funcionamiento y la relación que existe entre las variables de una instalación de agua caliente sanitaria. Una vez logrado esto, se pretende diseñar un conjunto de políticas de gestión que, partiendo de la modificación de los puntos de consigna de la instalación, lleven a la misma hacia un punto de operación más eficiente que el actual. Como fue visto, el 90 % del consumo total de la instalación lo tiene la bomba de calor, y si actuamos sobre los elementos que se encuentran en los circuitos secundarios lograremos reducir el tiempo de funcionamiento y la potencia que brinda la misma. Por ello es tan importante controlar en qué intervalo de temperaturas se encuentra el depósito de acumulación, y saber si este puede disminuir o aumentar en dependencia del consumo instantáneo y de la hora del día que nos encontremos.

Seguidamente se muestran dos conjuntos de tres y dos simulaciones respectivamente, en el primer conjunto de simulaciones el consumo es nulo, mientras que el segundo contempla un consumo de 1.84 lit/seg durante 15 minutos. Esto viene representando el consumo punta de la instalación ya que por sus características y la cantidad de usuarios finales veremos que según la normativa, la instalación debe estar dimensionada para abastecer dicho caudal durante este tiempo. Se verá como una mala elección de la consigna del depósito acumulador puede, bien representar un gasto de energía cuando no es necesario, o bien puede afectar al confort de los usuarios cuando la temperatura del mismo desciende por debajo de la temperatura de distribución elegida.

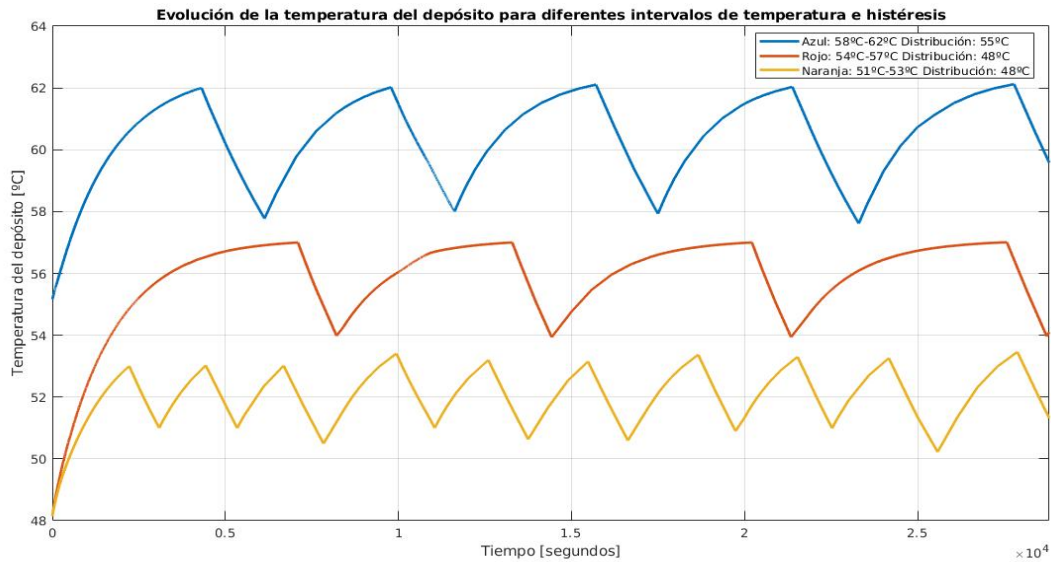


Figura 4.11: Repercusión de la temperatura del depósito sobre la instalación. *Fuente: Propia*

Cada una de las curvas anteriores muestra una situación distinta. El depósito está siendo calentado a diferentes temperaturas de funcionamiento. Esta operación, lejos de un horario donde se prevea un consumo importante de ACS representa un **gasto innecesario** que sufre la instalación. En el apartado 4.9.1. *Discretización de los intervalos de consumo de ACS* se profundizará sobre dichos horarios. A continuación la tabla recoge el consumo energético que representa para la instalación dicha operación innecesaria.

Tabla 4.10: Resultado de ahorro en las simulaciones variando el caudal de retorno

Número de simulación	B. de calent + b. de ret (ON)	B. calor	Total
1	10.9 kWh	89.28 kWh	100.18 kWh
2	10.6 kWh	81.6 kWh	92.2 kWh
3	10.0 kWh	77.47	87.47 kWh

Esta cuantificación de la energía se realizó para las condiciones de simulación que muestran las tablas 4.11-4.13

Tabla 4.11: Variación del punto de consigna del tanque acumulador. Simulación 1

Variable	Magnitud
Temperatura del primario	70 °C
Temperatura del depósito	60 °C
Temperatura de distribución	55 °C
Histéresis de la bomba de calentamiento	4 °C
Temperatura inicial del depósito	55 °C
Bomba de retorno	4.0 m <sup>3</sup> /h

Tabla 4.12: Variación del punto de consigna del tanque acumulador. Simulación 2

Variable	Magnitud
Temperatura del primario	65 °C
Temperatura del depósito	55.5 °C
Temperatura de distribución	48 °C
Histéresis de la bomba de calentamiento	3 °C
Temperatura inicial del depósito	48 °C
Bomba de retorno	4.0 m <sup>3</sup> /h

Tabla 4.13: Variación del punto de consigna del tanque acumulador. Simulación 3

Variable	Magnitud
Temperatura del primario	62 °C
Temperatura del depósito	52 °C
Temperatura de distribución	48 °C
Histéresis de la bomba de calentamiento	2 °C
Temperatura inicial del depósito	48 °C
Bomba de retorno	4.0 m <sup>3</sup> /h

Continuamos con el segundo conjunto de simulaciones, donde existe un consumo de ACS por parte de los usuarios, veamos como se comporta la dinámica del depósito. La figura 4.13 muestra dos curvas, la primera de ellas, una curva azul tiene las mismas características de la tabla 4.11, salvo que ahora añadimos un consumo instantáneo diferente de cero que se muestra en la figura 4.14. Vemos como este consumo instantáneo elevado afecta la respuesta temporal del tanque pues el mismo no llega a alcanzar su consigna, aún así, la temperatura del depósito nunca llega a alcanzar la temperatura de distribución, por tanto no hay complicaciones. En cambio la curva color rojo muestra una simulación cuyas características se encuentran en la tabla 4.14. Se puede notar como debido al caudal de agua fría de aportación, la temperatura del depósito cae por debajo de la temperatura de distribución. Este efecto puede traer consecuencias negativas en el confort del usuario final, pues le llega una temperatura diferente y menor a la que le debería llegar.

**Conclusión:** *Una mala elección de la temperatura del depósito de acumulación de ACS puede traer consigo consumos energéticos innecesarios y falta de confort por parte del usuario final.*



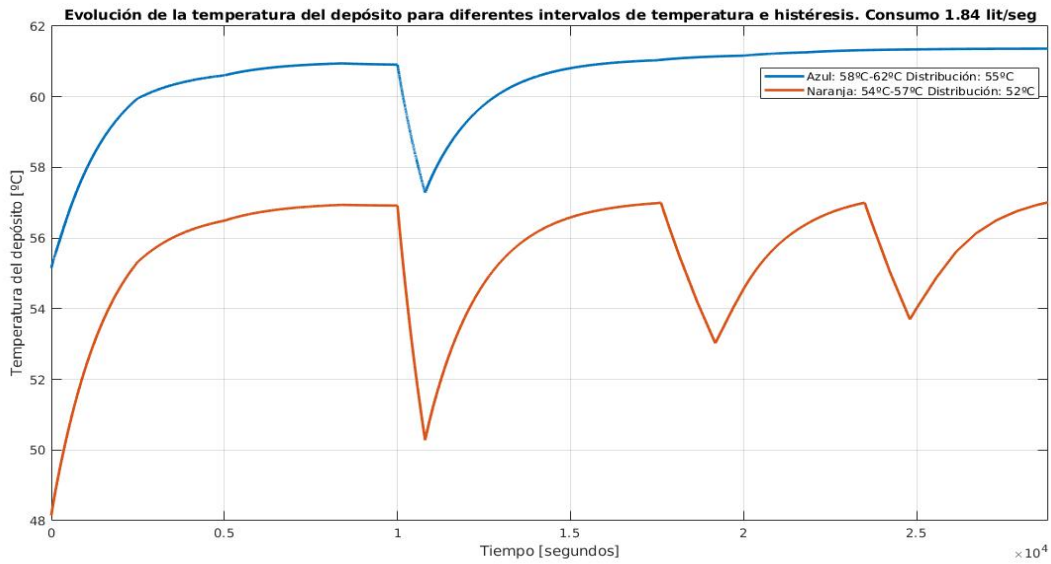


Figura 4.12: Repercusión de la temperatura del depósito sobre la instalación cuando existe consumo final *Fuente: Propia*

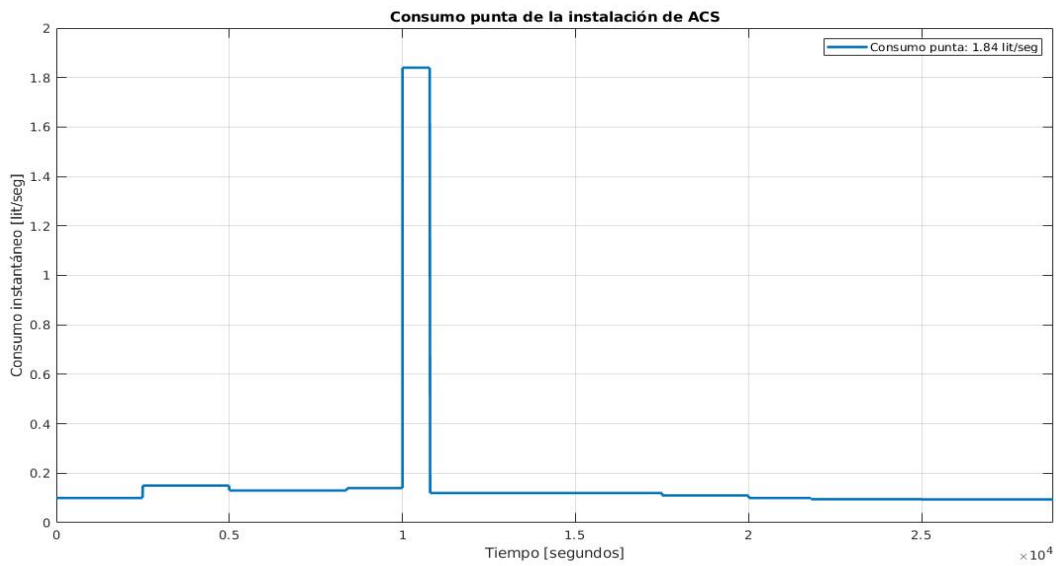


Figura 4.13: Consumo instantáneo de ACS *Fuente: Propia*

Tabla 4.14: Variación del punto de consigna del tanque acumulador. Simulación 2

Variable	Magnitud
Temperatura del primario	65 °C
Temperatura del depósito	55.5 °C
Temperatura de distribución	52 °C
Histéresis de la bomba de calentamiento	3 °C
Temperatura inicial del depósito	48 °C
Bomba de retorno	4.0 m <sup>3</sup> /h

## 4.6. Repercusión del caudal primario del intercambiador sobre la instalación

Este valor de caudal, el cual es controlado actualmente por la válvula de tres vías del primario resulta muy interesante de estudiar. Es interesante dicho caudal pues está relacionado a través del intercambiador de calor con el caudal de calentamiento del depósito de acumulación. Luego el intercambiador de calor viene diseñado para trabajar con una temperatura y caudales nominales para sacarle el mayor provecho al proceso de transferencia de calor, lejos de estos valores el intercambiador desempeña su función, pero no con tanta eficiencia, digamos que no transfiere toda la potencia que podría transferir. Está claro que esto último no es lo que desea el explotador de la instalación de ACS, en cambio, el mismo quisiera que el proceso de transferencia de calor sea lo más rápido posible, con esto disminuimos el tiempo de funcionamiento y la potencia de equipos como la bomba de calor y las bombas de circulación, y de esta manera ganamos en ahorro y eficiencia.

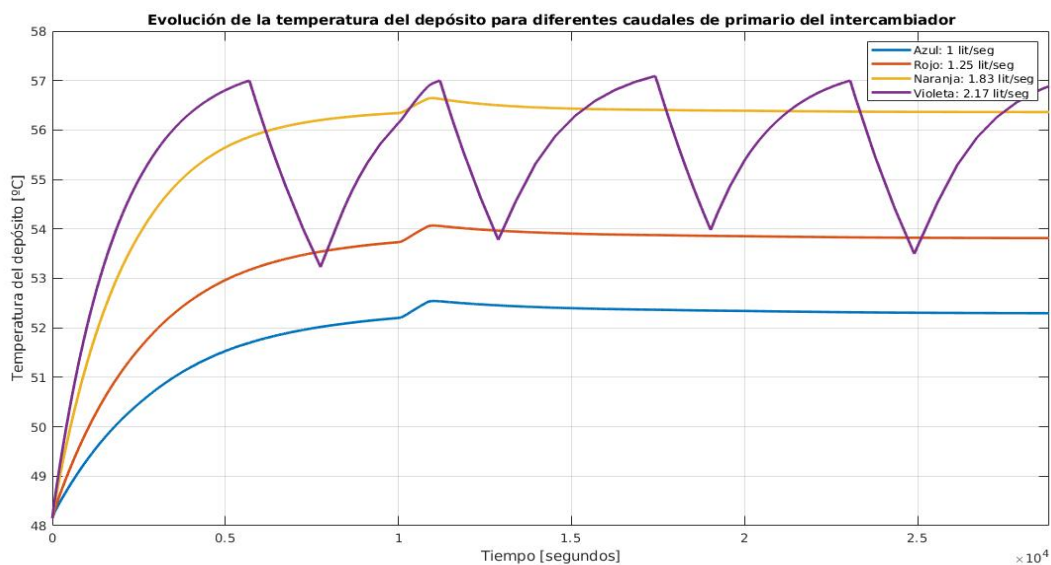


Figura 4.14: Variación en el caudal primario del intercambiador de calor. Simulación 1 Fuente: Propia

Como se observa en la figura 4.15, el caudal primario del intercambiador está estrechamente relacionado con la velocidad de calentamiento del depósito acumulador. En las cuatro simulaciones practicadas hemos ido aumentando el mismo y los resultados son esperados. En las dos primeras correspondientes a los caudales menores el depósito apenas llega a la consigna fijada. La tercera correspondiente a la curva naranja y caudal 1.83 lit/seg, la temperatura llega al intervalo deseado (54°C - 57°C) aunque no llega finalmente a su valor máximo. En cambio en la última correspondiente al caudal 2.17 lit/seg la temperatura llega a comportarse como se espera, variando entre el valor máximo y el mínimo de histéresis. Luego las conclusiones son obvias: *a medida que aumenta el caudal primario aumenta también la velocidad de calentamiento del depósito.*

Veamos la figura 4.16. Aunque el resultado parezca sin sentido no lo es, existe un valor de caudal para el cual el intercambiador va a transferir el calor de manera mucho más eficiente que para el resto, y dicho valor de caudal, como bien se observa en la figura **NO** es el valor máximo que puede circular por el mismo. Como fue comentado en apartados anteriores, el intercambiador de calor que se está simulando es del fabricante Alfa-Laval modelo M3 de nueve placas. Este tipo de intercambiador está diseñado para trabajar con un caudal máximo de 4 lit/seg, que en nuestra gráfica se corresponde con la curva violeta. Para el caso que se está estudiando, dicho valor no es el más eficiente.

¿Es casualidad que el valor que saca el mayor rendimiento del intercambiador sea **2.56 lit/seg**? No lo es,

dicho valor se encuentra estrechamente relacionado con el caudal secundario del intercambiador. Este último viene dictado por la bomba de calentamiento cuyo caudal nominal de trabajo es **2.57 lit/seg.** Este trabajo experimental nos ha permitido descubrir que para la aplicación donde nos encontramos, los caudales primario y secundario del intercambiador deben ser muy similares si queremos transmitir la mayor parte de la energía contenida en el agua en el menor tiempo posible. Seguidamente la figura 4.17 muestra varias simulaciones hechas donde se muestra la variación de los tiempos de subida en la relación con el caudal primario del intercambiador.

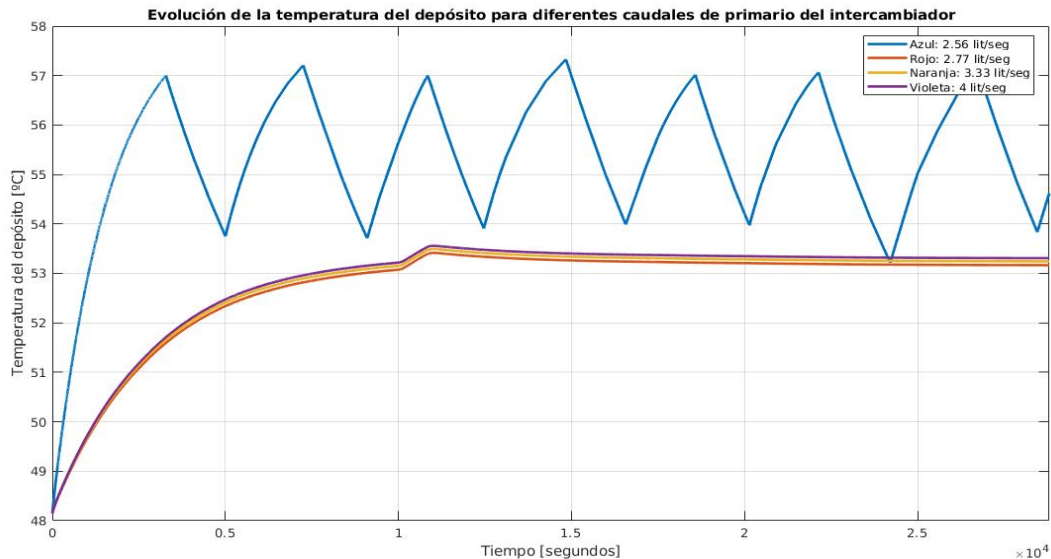


Figura 4.15: Variación en el caudal primario del intercambiador de calor. Simulación 2 *Fuente: Propia*

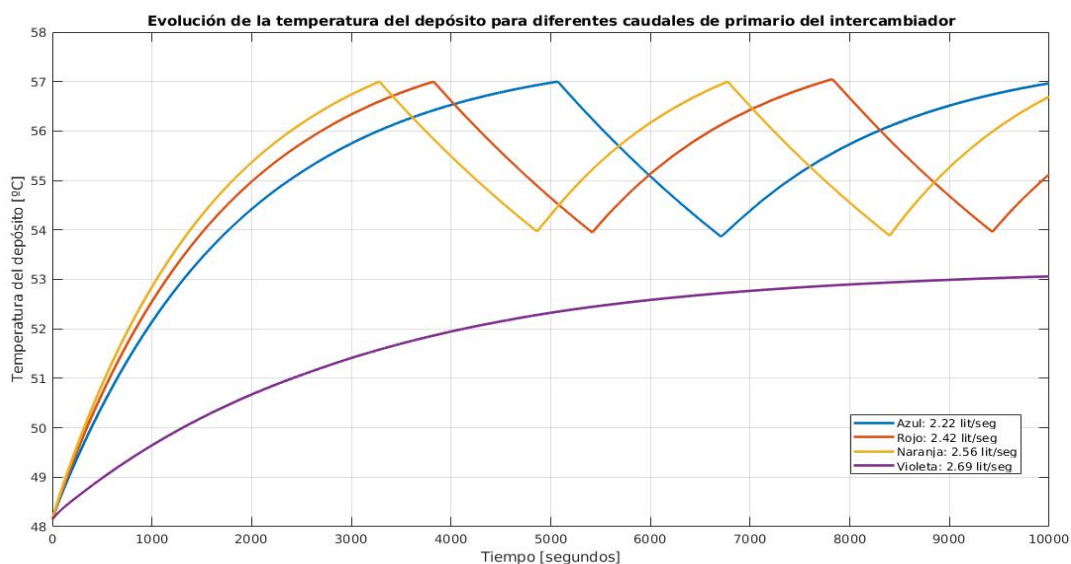


Figura 4.16: Variación en el caudal primario y su repercusión en los tiempos de subida de la señal controlada. *Fuente: Propia*

En la figura anterior se puede notar claramente el efecto que tiene el caudal primario sobre el tiempo de subida de la variable temperatura del depósito de acumulación. La tabla 4.15 muestra para las cuatro curvas descritas el momento en el que la misma alcanza los 57°C de consigna fijada. Hay que añadir que el horizonte de esta última simulación fue modificado a 10000 segundos, que serían alrededor de 2 horas con 46 minutos. Fue previsto de esta manera para hacer más fácil la lectura de la gráfica y evitar confusiones entre las curvas.

Tabla 4.15: Variación del punto de consigna del caudal primario

Simulación	Caudal primario	Tiempo de subida
1. Curva azul	2.22 lit/seg	1 hora y 24 minutos
2. Curva roja	2.42 lit/seg	1 hora y 4 minutos
3. Curva naranja	<b>2.56 lit/seg</b>	<b>54 minutos</b>
4. Curva violeta	2.69 lit/seg	no alcanza

Se nota claramente como al elevar tan solo unos 0.13 lit/seg, una cantidad ínfima, el sistema no llega a alcanzar su consigna.

**Conclusión:** *La elevación al máximo de los caudales de trabajo no siempre trae consigo un mayor rendimiento del sistema.*

## 4.7. Repercusión de la bomba de calor sobre la instalación

La bomba de calor es nuestro principal elemento aportador de energía térmica. La que se encuentra instalada en el centro tiene unos índices de rendimiento(COP) que rondan entre 3,74 y 6,79. Esto quiere decir que por cada kW eléctrico que consume, es capaz de brindar, como mínimo 3,74 kW térmicos. Esto último significa que son muy eficientes en la conversión de energía. Aún así, en la mayoría de las ocasiones este dispositivo se encuentra trabajando a una potencia constante sin necesidad, pues con la energía almacenada en el depósito de acumulación es suficiente para cubrir la poca demanda instantánea que se registre. El año anterior, este centro tuvo un coste de 0.09383 €/kWh sin impuestos. La tabla 4.16 muestra los costes asociados al funcionamiento a potencia constante durante varios intervalos temporales de dicho dispositivo.

Tabla 4.16: Gasto asociado a la bomba de calor WWB0900XHL

Intervalo de tiempo	Energía eléctrica consumida	Coste asociado
1 día	1339.2 kWh	125.657 €
1 mes	40176 kWh	3769.71 €
1 año	482112 kWh	45236.57 €

A continuación una gráfica que muestra cómo se comporta la temperatura del depósito de acumulación antes diferentes temperaturas en el agua del primario. En este caso, cuanto más aumentemos esta última, más rápidamente alcanzará el depósito la consigna fijada y menos tiempo estarán trabajando las bombas de calentamiento, al contrario también se cumple, cuanto más baja sea la temperatura del primario, más ligera trabaja la bomba de calor pero más tiempo estarán trabajando las bombas de calentamiento. Las dos tablas 4.17 y 4.18 que siguen a continuación de la imagen muestran los resultados de lo comentado anteriormente. Existe una proporcionalidad inversa entre la potencia eléctrica consumida por la bomba de calor y el tiempo que se encuentra en funcionamiento las bombas de calentamiento. La figura 4.19 así lo demuestra.

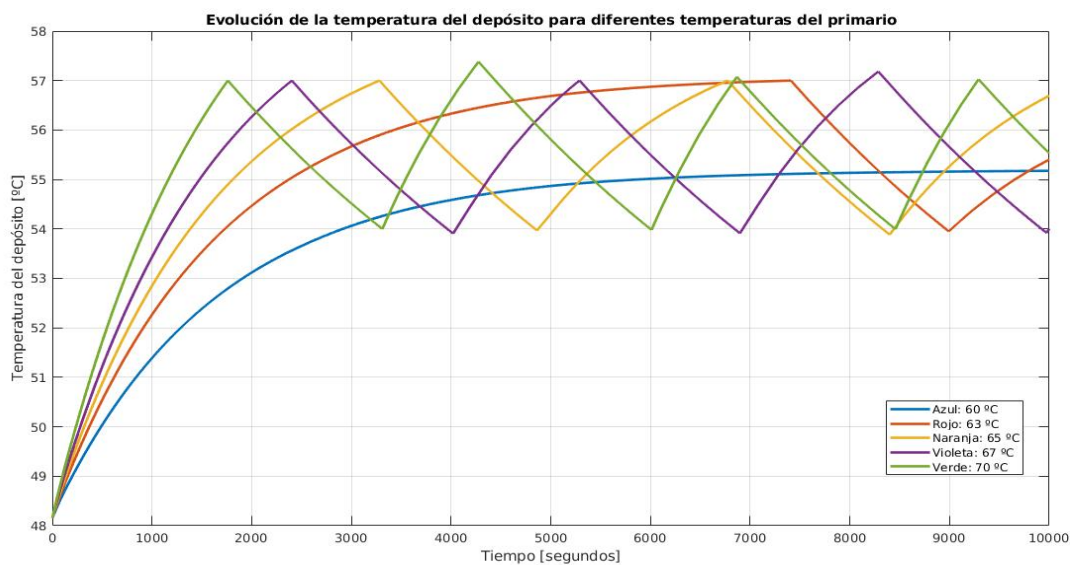


Figura 4.17: Variación en la temperatura del primario y su repercusión *Fuente: Propia*

Tabla 4.17: Relación entre temperatura del primario y tiempo de funcionamiento de la bomba de calentamiento

Temperatura del primario	B. calentamiento (ON)
60 °C	2 horas y 46 minutos
63 °C	2 horas y 19 minutos
65 °C	1 hora y 53 minutos
67 °C	1 hora y 24 minutos
70 °C	1 hora y 15 minutos

Tabla 4.18: Relación entre temperatura del primario y la potencia eléctrica consumida por la bomba de calor

Temperatura del primario	Potencia eléctrica [kW]
60 °C	46.7
63 °C	49.28
65 °C	51
67 °C	52.92
70 °C	55.8

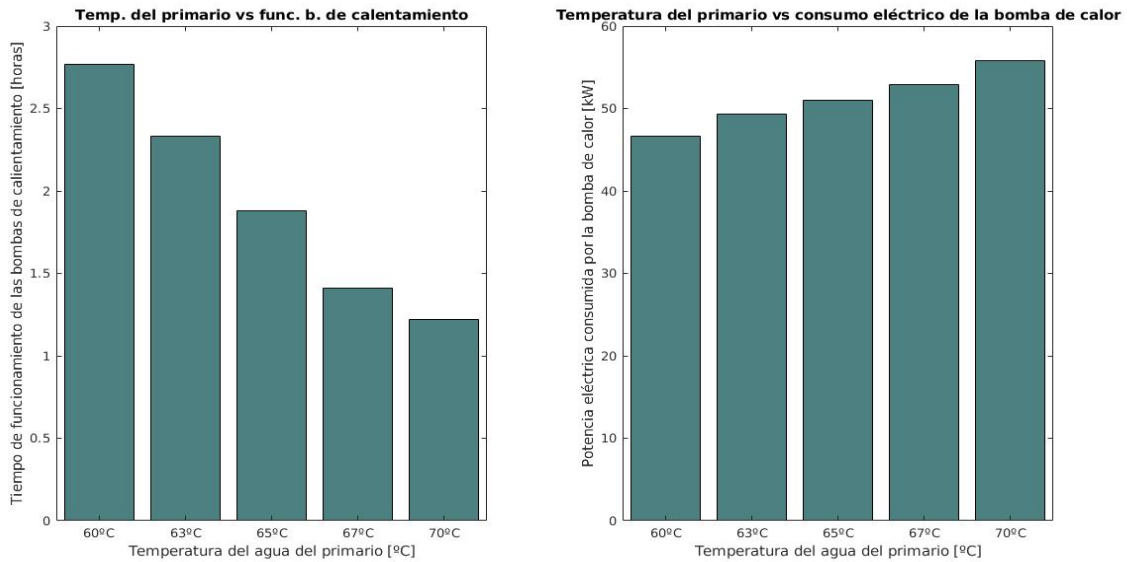


Figura 4.18: Comparación entre las bombas de calentamiento y la bomba de calor *Fuente: Propia*

**Conclusión:** *En el compromiso que se ha de llegar entre el funcionamiento de las bombas de calentamiento y la potencia eléctrica exigida por la bomba de calor, debemos darle mayor peso a esta última pues representa el 90 % del consumo total de la instalación.*

#### 4.8. Gasto térmico asociado a la distribución de ACS

Toda instalación de agua caliente sanitaria tiene un gasto térmico asociado. Ya no estamos hablando de kW eléctricos que se consumen si no de potencia térmica que se disipa en los elementos que forman parte del mismo. Esto significa pérdida de potencia térmica en el circuito y lo encontramos principalmente en la red de tuberías que componen la instalación. Las mismas actúan, como un radiador, disipando el calor en mayor o menor medida del fluido que se encuentra circulando por su interior.

Las instalaciones de ACS se definen reglamentariamente en el documento HS4 del Código Técnico de la Edificación (CTE)[38], en el apartado 3.2.2.1. se indica que las tuberías de ACS se aislarán conforme a lo especificado en el RITE[24]. Las instalaciones de ACS funcionan durante todo el año, por ello aunque en general su temperatura pueda ser inferior a la de calefacción, a lo largo de la temporada presentan mayores pérdidas de calor; por este motivo el RITE incrementa en 5 mm el espesor mínimo de su aislamiento térmico.

ESPESOR (mm) AISLAMIENTO TERMICO		
DIAMETRO EXTERIOR TUBERIA (mm)	ACS	
	INTERIOR	EXTERIOR
D ≤ 35	30	40
35 < D ≤ 60	35	45
60 < D ≤ 90	35	45
90 < D ≤ 140	35	45
140 < D	40	50
$\lambda_{ref} = 0,040 \text{ (W/m K) a } 10^{\circ}\text{C}$		

Figura 4.19: Aislamiento térmico en tuberías de ACS *Fuente: [24]*

Nuestra instalación de producción de ACS secundaria correspondiente a la Villa 1 tiene un total de 95 metros

de tuberías aisladas térmicamente. Aún así, existe disipación de calor entre la tubería y el asilante, y luego entre el aislante y el ambiente. La disipación viene dada en función del caudal circulante y de la temperatura que lleva el agua en la sección de tubería analizada. La temperatura que lleva el fluido lo marca la temperatura de distribución hacia el cliente, en cambio el caudal que circula por las tuberías lo dictan las bombas de retorno, cuya función principal es **mantener** el fluido en movimiento. Mediante simulaciones se conocerá la energía térmica que se disipa para diferentes regímenes de trabajo. La figura 4.20 muestra la relación que existe entre la variación de la temperatura de distribución y las pérdidas térmicas, mientras que la figura 4.21 en cambio muestra la relación que existe entre la variación del caudal de retorno y las pérdidas térmicas. Las tablas 4.19 y 4.20 recogen las lecturas de cada una de las gráficas respectivamente.

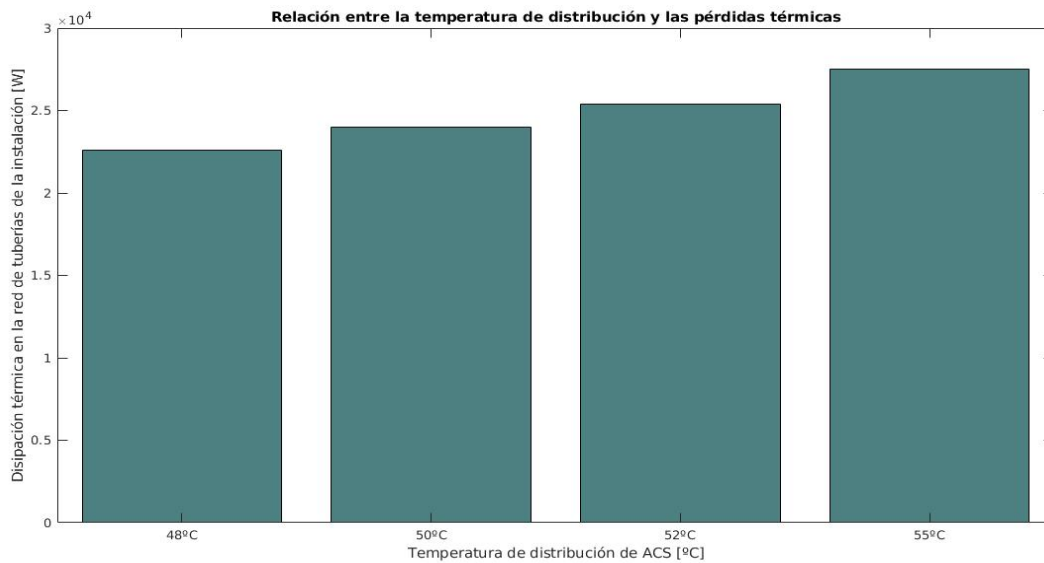


Figura 4.20: Pérdidas térmicas asociadas a la variación de la temperatura de distribución. *Fuente: Propia*

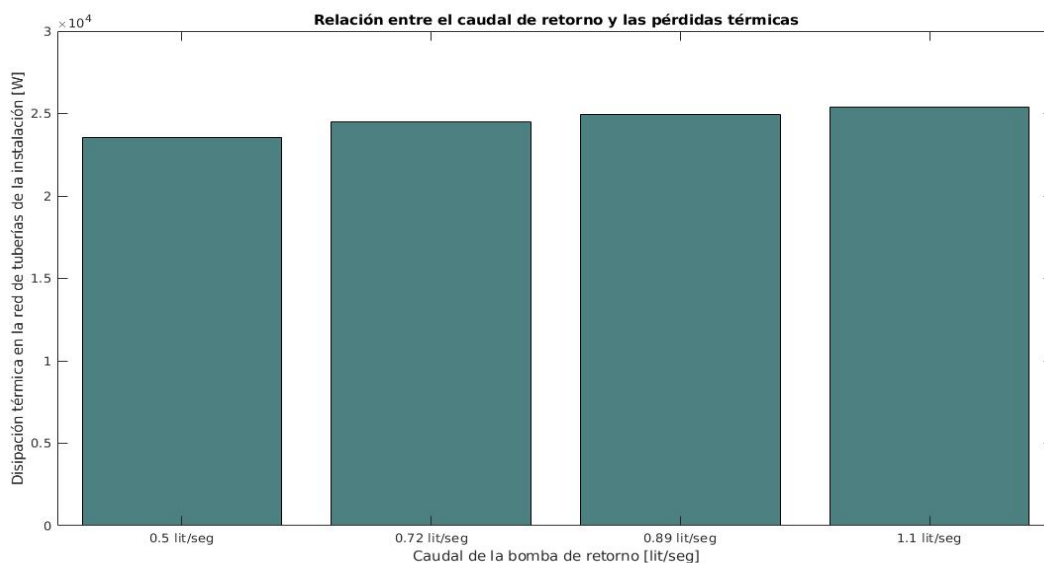


Figura 4.21: Pérdidas térmicas asociadas a la variación del caudal de retorno. *Fuente: Propia*

Tabla 4.19: Pérdidas térmicas asociadas a la variación de la temperatura de distribución. Caudal de retorno fijo en 1.1 lit/seg

Temperatura de distribución [°C]	Pérdidas térmicas [W]
55	27512
52	25396
50	23985
48	22576

Tabla 4.20: Pérdidas térmicas asociadas a la variación del caudal de retorno. Temperatura de distribución fija en 52 °C

Caudal de retorno [lit/seg]	Pérdidas térmicas [W]
1.1	25396
0.89	24969
0.72	24510
0.5	23570

Podemos notar bien por las gráficas o por las tablas, como la variación en la temperatura de distribución tiene mayor impacto sobre las pérdidas térmicas del sistema que la variación del caudal de retorno. Hay otros factores como la temperatura ambiente que de igual manera pueden propiciar una mayor disipación de los elementos que transportan fluidos por la instalación. Al ser estas últimas muy pequeñas no se tuvieron en cuenta durante el estudio realizado.



## Capítulo 5

# Propuesta de una política de gestión energética eficiente en instalaciones de ACS

El motivo principal que dió origen a la elaboración de este trabajo fue la creación de un sistema de gestión, que modificara las consignas de las principales variables de un proceso de producción de agua caliente sanitaria, con el fin de llevar al sistema hacia determinados puntos de operación que hagan que el sistema se comporte de forma más eficiente que como actualmente lo hace. Para ello se ha realizado un análisis del mismo en cuanto a caudales instantáneos de consumo, temperaturas e intervalos horarios donde se concentra la demanda por parte de los usuarios. El presente capítulo, basado en la relación de las variables descritas en el capítulo anterior, pretende proponer una serie de políticas de gestión enfocadas hacia el incremento del ahorro energético en cualquier instalación de ACS centralizada. La misma será puesta a prueba en la simulación de la instalación real y se compararán los resultados con los consumos actuales. Es necesario añadir que no es una solución exclusiva para dicha instalación, puede ser aplicada a cualquier sistema que tenga características similares a las descritas en capítulos anteriores.

## 5.1. Discretización de los intervalos de consumo de ACS

Como hemos venido comentando, el consumo de ACS en las instalaciones no se realiza durante todo el día a toda hora. No existen dos recintos que tengan el mismo perfil de demanda durante las horas de servicio. El consumo en las instalaciones de ACS viene clasificado según el tipo de edificación y el servicio que prestan[5][24][38] por:

- Viviendas.
- Oficinas, estaciones y aeropuertos.
- Hoteles, discotecas, museos.
- Centros comerciales.
- Escuelas, polideportivos.

Nuestro caso de estudio es una Villa que pertenece a una instalación hotelera mucho mayor. En el hotel se presentan principalmente dos grandes intervalos de consumo:

- Intervalo 1: 7:00 horas a 9:00 horas
- Intervalo 2: 18:00 horas a 20:00 horas

Durante estos intervalos se registran los mayores picos de consumo de la instalación, aunque el consumo punta propiamente dicho dura entre 15 y 20 minutos.

Es muy importante discretizar los intervalos horarios por los que transcurre la instalación pues esto nos permitirá gestionar mejor los recursos que tenemos disponibles, y no despilfarrar energía cuando en la práctica no es necesario pues no se consume. Para ello se han creado los siguientes grupos horarios:

1. Sin servicio madrugada.
  - Este horario se extenderá de las 0:00 hasta alrededor de las 6:00. Con la característica que tendrá un consumo nulo o prácticamente nulo.
2. Preparación del servicio matutino
  - Esta será la hora que transcurre entre las 6:00 y las 7:00. Dicho horario aún sigue teniendo un consumo prácticamente nulo y comenzarán las operaciones para poner a punto el sistema con el objetivo de estar preparado para el servicio que se avecina.
3. Máxima demanda matutina
  - Corresponderá al intervalo entre 7:00 y 9:00. El sistema deberá estar listo para brindar un servicio continuo durante este tiempo.
4. Consumo bajo vespertino
  - Este horario tiene la particularidad que pueden existir eventos no programados de alto consumo aunque la media general será baja. Su intervalo horario será entre 9:00 y 18:00.
5. Máxima demanda vespertina
  - El servicio vespertino transcurre entre las 18:00 y 20:00. Será cuando se registre mayor consumo instantáneo del día, incluso mayor que el horario matutino.

## 6. Consumo bajo nocturno

- Durante este intervalo de tiempo que transcurre entre 20:00 y 22:00 el consumo irá descendiendo poco a poco hasta ser prácticamente nulo.

Tomando como base de partida estos horarios, que nos brindan organización a la hora de crear las políticas de gestión, se irán proponiendo una serie de técnicas para mejorar el consumo de la instalación a la vez que se vayan comparando con el funcionamiento actual. La siguiente tabla muestra un resumen de las propuestas realizadas y como se diferencian unas de otras.

Tabla 5.1: Políticas de gestión aplicadas con una breve descripción

Políticas	Horario en que se aplica	Breve descripción
Política No.1	22:00 a 6:00 horas	Se centra en las últimas horas de la noche y durante la madrugada. Reduce las consignas de la temperatura del circuito primario, la temperatura del depósito de acumulación, la temperatura de distribución y del caudal de retorno.
Política No.2	6:00 a 22:00 horas	Ocupa la mayor parte del día. La misma modifica las consignas de temperatura del primario, el caudal de la válvula de 3 vías del primario, temperatura del depósito de acumulación, temperatura de distribución y el caudal de retorno en dependencia de la cantidad de consumo instantáneo de ACS que se registre
Política No.3	0:00 a 23:59 horas	Se unifican las dos políticas de gestión mencionadas anteriormente en una sola durante las 24 horas del día

La figura que sigue a continuación muestra un esquema de la instalación en donde se marcan los puntos sobre los cuales se modifican las consignas, esto es, las variables que son modificadas por la política de gestión.

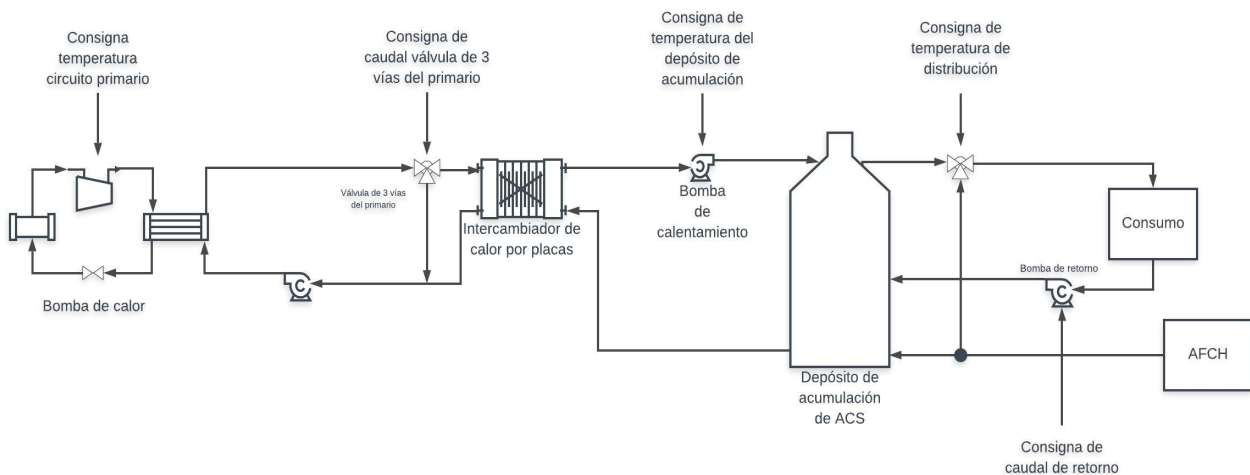


Figura 5.1: Temperatura del depósito durante el horario nocturno. Fuente: Propia

## 5.2. Política de gestión No. 1

Como es evidente durante la noche el consumo de ACS en las villas es casi nulo. Es por ello que se plantea una reducción en la producción de ACS durante las horas finales de la noche y durante la madrugada. Para reducir la potencia de la producción de agua caliente sanitaria se modifican manualmente las consignas de las siguientes variables del proceso:

Tabla 5.2: Variables de proceso modificadas

Consigna modificada	Variable de proceso afectada
Consigna de la bomba de calor	Temperatura del circuito primario
Consigna válvula de 3 vías del primario	Caudal de agua por el primario del intercambiador
Consigna de la bomba de calentamiento	Temperatura e histéresis del depósito de acumulación
Consigna de la válvula mezcladora de ACS	Temperatura de distribución
Caudal de retorno	Temperatura de retorno

Realizando estos cambios de forma manual, se traslada el punto de operación del proceso mostrado en la tabla 4.6 hacia el que figura en la tabla a continuación:

Tabla 5.3: Punto de operación para el horario 22:00 a 6:00

Variable	Magnitud
Temperatura del primario	65 °C
Temperatura del depósito	45°C - 55°C
Temperatura de distribución	45 °C
Temperatura de retorno	36.83°C / 42.25°C
Histéresis de la bomba de calentamiento	10 °C
Bomba de retorno	1.83 m <sup>3</sup> /h / 2.37 m <sup>3</sup> /h

En estado sin consumo el sistema tendrá un caudal de retorno de 1.83 m<sup>3</sup>/h, que a 45 °C de distribución corresponde con una temperatura de retorno de 36.83 °C, en caso de registrarse un consumo instantáneo diferente de cero, a la bomba de retorno se le cambiaría la consigna a 6.6 m<sup>3</sup>/h elevando con esto la temperatura que llega al consumidor, dicha temperatura será más elevada que los 42.25 °C que da la lectura en el circuito de retorno, pero se toma este valor como referencia. Las figuras 5.1 y 5.2 muestran el comportamiento del depósito de acumulación y la cantidad de arranques de la bomba de calentamiento durante el período analizado respectivamente. El depósito parte de 58 °C pues es la temperatura mínima que puede tener durante el intervalo horario que precede al que estamos estudiando.

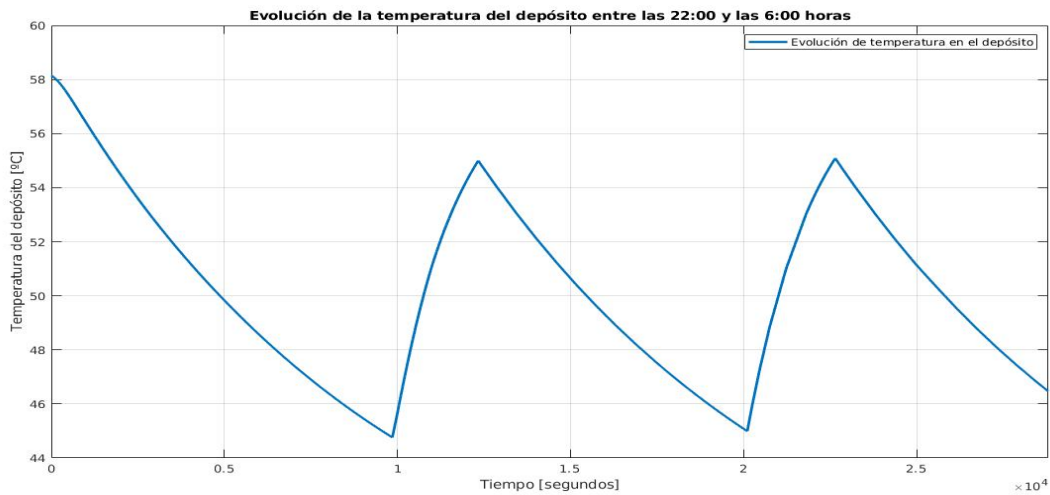


Figura 5.2: Temperatura del depósito durante el horario nocturno. *Fuente: Propia*

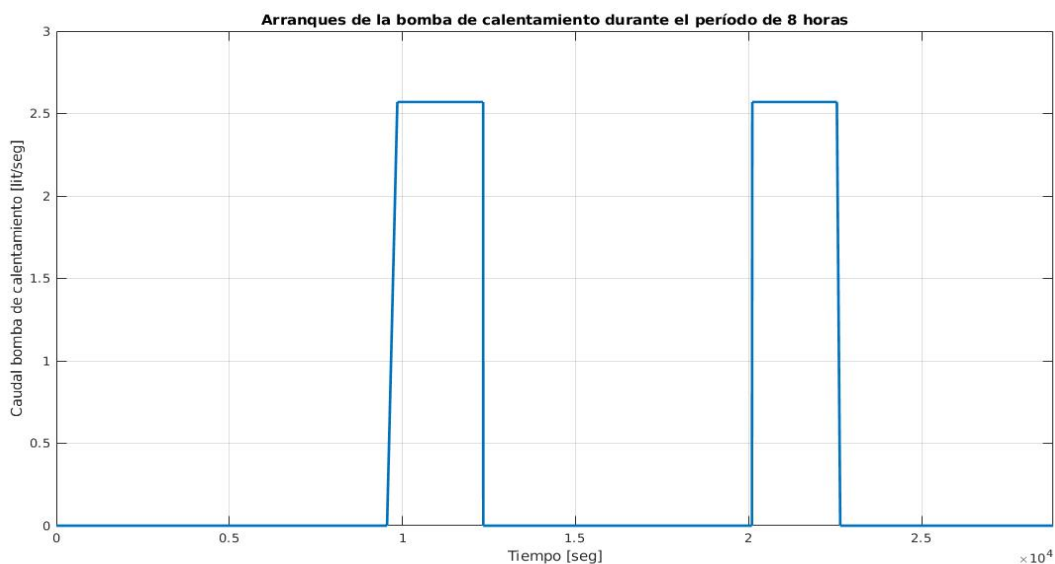


Figura 5.3: Arranques de la bomba de calentamiento durante el horario nocturno. *Fuente: Propia*

Veremos ahora cada uno de los elementos consumidores que componen en conjunto la instalación y su respectivo consumo. Primeramente tenemos las bombas de retorno, trabajando las ocho horas seguidas con un caudal de  $1.83 \text{ m}^3/\text{h}$  salvo casos muy puntuales, luego las bombas de calentamiento, encendidas un total de 1.39 horas partido en dos ciclos de calentamiento. Por último la bomba de calor que debe encender un poco antes para elevar la temperatura a los 5000 litros de agua del circuito primario de  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  a  $65 \text{ }^\circ\text{C}$ . El tiempo que se toma la bomba de calor en elevar la temperatura de dicho volumen de agua son alrededor de 37 minutos. En las simulaciones se ha tomado el peor caso posible de todos, donde el volumen de agua del primario disipa toda la energía transferida por la bomba de calor durante el tiempo que se encuentra en reposo, normalmente no es así pues el circuito primario dispone de un depósito con una inercia térmica muy elevada para conservar la energía transferida al agua, aún así se ha intentado ser lo más conservador posible.

Tabla 5.4: Consumo energético en el horario 22:00 a 6:00 con política de gestión

Equipo	Tiempo ON [horas]	Potencia [W]	Energía [kWh]
Bomba de retorno	8	635.18	5.08
Bomba de calentamiento	1.39	759.2	1.05
Bomba de calor	2.63	10200	26.8
Total			32.93

Tabla 5.5: Consumo energético en el horario 22:00 a 6:00 con política de gestión

Equipo	Tiempo ON [horas]	Potencia [W]	Energía [kWh]
Bomba de retorno	8	635.18	5.08
Bomba de calentamiento	1.39	759.2	1.05
Bomba de calor	2.63	10200	26.8
Total			32.93

Seguidamente la tabla 5.3 recoge la energía consumida por el sistema como actualmente se encuentra, sin políticas de gestión.

Tabla 5.6: Consumo energético en el horario 22:00 a 6:00 sin política de gestión

Equipo	Tiempo ON [horas]	Potencia [W]	Energía [kWh]
Bomba de retorno	8	759.2	6.07
Bomba de calentamiento	5.88	759.2	4.46
Bomba de calor	8.98	11160	100.21
Total			110.74

La tabla 5.6 muestra el coste asociado sólo a la ocho horas correspondientes al intervalo analizado. La que sigue a continuación analiza el coste de una villa correspondiente a las 24 horas del día y hace la comparación entre las dos políticas de gestión. Se puede notar que el cambio es más notable cuando se analiza el intervalo de tiempo de ocho horas con respecto a un día completo. Esto nos dice que el ahorro durante el período nocturno es eficaz, pero sólo dicho intervalo sólo representa un tercio de la jornada completa. Es por ello que se decidió trabajar minuciosamente sobre el período diurno que es el más complejo debido a sus dos períodos punta de consumo.

Tabla 5.7: Comparación de gastos entre la política actual y la política de gestión durante las 8 horas de estudio (de 22:00 a 6:00 horas)

Gestión del sistema	Energía consumida[kWh]	Costes €
Sin política de gestión	110.74	10
Política de gestión No. 1	32.93	3.08

Tabla 5.8: Comparación de gastos entre la política actual y la política de gestión No.1 durante un día completo (24 horas)

Gestión del sistema	Energía consumida[kWh]	Costes €
Sin política de gestión	299.45	28
Política de gestión No. 1	232.62	21.8

### 5.3. Política de gestión No. 2

Esta política de gestión está enfocada a reducir el consumo energético global de la instalación durante el horario que no corresponde a la madrugada, desde las 6:00 horas hasta las 22:00 horas. El mismo representa las dos terceras partes del día y es por ello que nos enfocamos sobre él. Este horario tiene ciertas particularidades que habrá que tratar, una de ellas es que tiene mayormente dos horarios punta de consumo y la subestación de producción deberá estar lista para poder hacer frente a ello. La segunda particularidad es que se puede dar un evento no programado de consumo entre los dos horarios comentados anteriormente, frente a esto la subestación debe estar igualmente preparada para dar el servicio demandado.

#### 5.3.1. Preparación del servicio matutino

Nuestro horario de consumo elevado comienza a partir de las 7:00 horas, a dicha hora la temperatura del depósito debe estar a 56 °C como mínimo para estar listo para el servicio. Para poder calentar el depósito la temperatura del primario ya debería estar lo suficientemente alta y esto de igual manera conlleva tiempo, a continuación la tabla 5.7 muestra el tiempo de calentamiento del circuito primario. La figura 5.3 muestra el tiempo que se toma el depósito de acumulación en llegar a los 56 °C, esto son 2256 segundos que equivalen a 37.6 minutos. El tiempo total, con las condiciones más desfavorables posibles, que toma para tener la instalación lista para brindar servicio son 78.9 minutos, esto es aproximadamente 1 hora y 20 minutos. Es por ello que se debe comenzar a preparar la misma desde las 5:00 horas con 40 minutos. La energía que demanda el sistema para llevarlo al punto de operación listo para el servicio se muestra en la tabla que se muestra a continuación.

Tabla 5.9: Consumo energético en el horario 5:40 a 7:00 horas

Variable	Tiempo ON [horas]	Potencia [W]	Energía [kWh]
Bomba de retorno	1.31	635.18	0.83
Bomba de calentamiento	0.62	759.2	0.47
Bomba de calor	0.68	10680	7.26
Total			8.56

Tabla 5.10: Tiempo de calentamiento del circuito primario

Temperatura inicial [°C]	Temperatura final [C]	Tiempo [minutos]
40	67.5	41.3

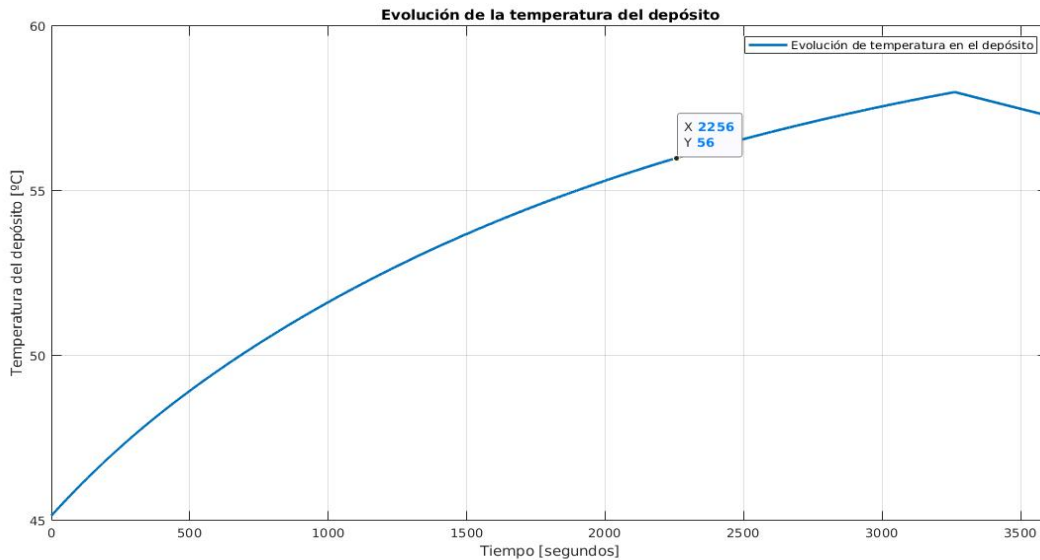


Figura 5.4: Temperatura del depósito entre las 5:40 y las 7:00 horas. Fuente: Propia

### 5.3.2. Máxima demanda matutina

Una vez que hemos llegado al punto de operación escogido ya el sistema se encuentra listo para cubrir la demanda. A partir de este momento, brindará servicio durante aproximadamente dos horas de un consumo constante, salvo cuando se registre el consumo punta de 1.5 lit/seg durante 14 minutos. El punto de operación al que llevaremos al sistema se muestra en la siguiente tabla. Una vez elevada la temperatura del depósito, la misma se mantendrá dentro del intervalo 56 °C - 58 °C, la temperatura de distribución se mantendrá fija a 52°C. Las bombas de retorno operarán a 1.83 lit/seg asegurando una temperatura de retorno de 44.2°C, cuando el sistema detecte que el consumo aumenta, las bombas incrementarán el caudal a 2.37 lit/seg, elevando así la temperatura de retorno a 47.3 °C. Seguidamente las gráficas que muestran el comportamiento de la temperatura del depósito frente al caudal entrante de agua fría de reposición, el caudal de consumo instantáneo durante las dos horas y los cambios ocurridos en la temperatura de retorno frente a un incremento del caudal del mismo nombre.

Tabla 5.11: Punto de operación para el horario 7:00 a 9:00

Variable	Magnitud
Temperatura del primario	67.5 °C
Temperatura del depósito	56°C - 58°C
Temperatura de distribución	52 °C
Temperatura de retorno	Media: 44.2 °C / Máx: 47.3°C
Histéresis de la bomba de calentamiento	2 °C
Bomba de retorno	1.83 m <sup>3</sup> /h / 2.37 m <sup>3</sup> /h

Es notable la repercusión que tiene sobre la temperatura del depósito el caudal de agua fría de reposición. Se puede observar en la gráfica cómo a partir de que comienza el consumo instantáneo punta, la temperatura del mismo baja velozmente.



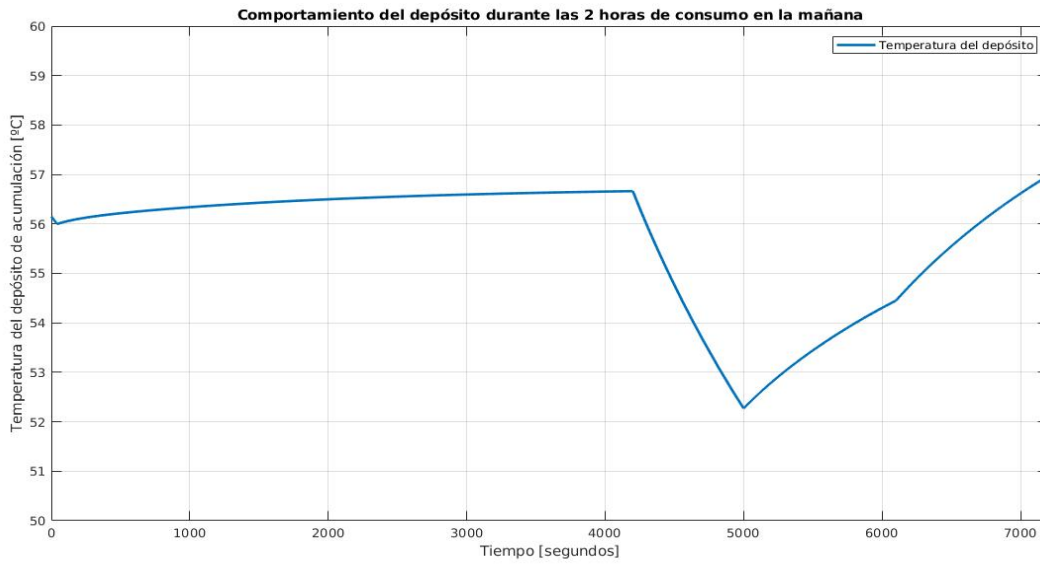


Figura 5.5: Temperatura del depósito durante el servicio matutino. Fuente: Propia

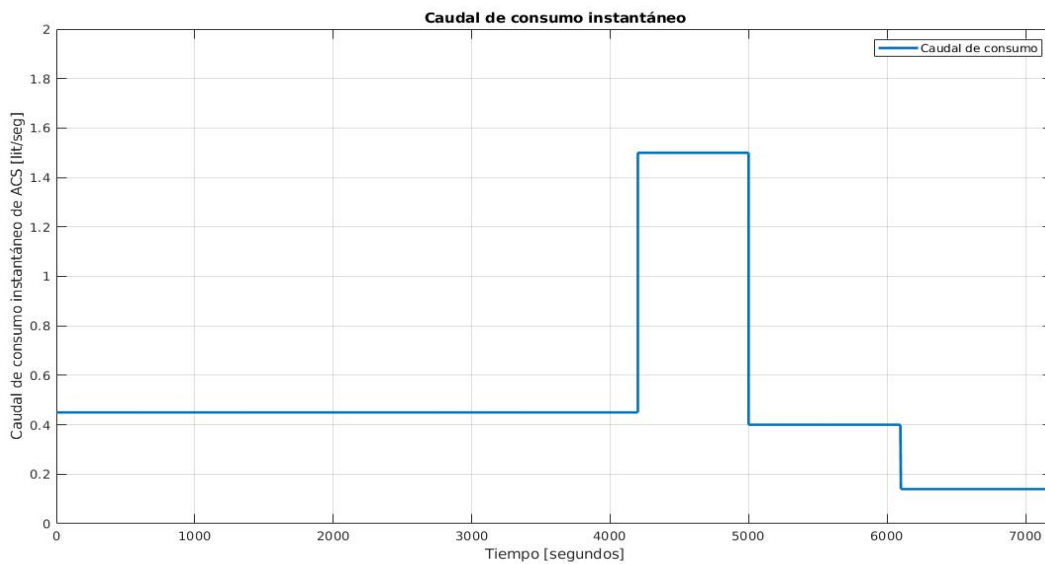


Figura 5.6: Consumo instantáneo de ACS. Fuente: Propia

Seguidamente mostramos la energía consumida por el sistema durante este tiempo de servicio. La notación de la bomba de retorno significa que durante las dos horas de servicio la misma trabaja 1.76 horas a 635.18 Wattios y luego durante el consumo punta que dura 0.23 horas aumenta su potencia a 652.4 Wattios.

Tabla 5.12: Consumo energético en el horario 7:00 a 9:00 horas

Equipo	Tiempo ON [horas]	Potencia [W]	Energía [kWh]
Bomba de retorno	1.76/0.23	635.18/652.4	1.3
Bomba de calentamiento	2	759.2	1.5
Bomba de calor	2	10680	21.3
Total			24.1

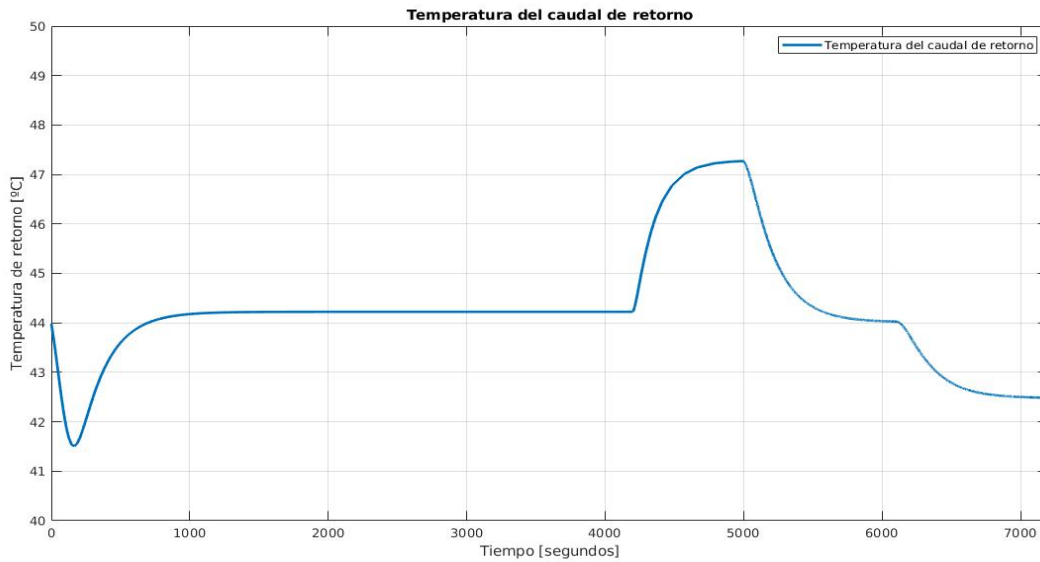


Figura 5.7: Temperatura del agua de retorno. Fuente: Propia

### 5.3.3. Consumo bajo vespertino

Este horario que se analiza transcurre entre las 9:00 y las 18:00 horas. Durante este horario el consumo instantáneo de la instalación se reduce enormemente salvo en algún caso puntual donde ocurra un evento no programado y aumente el consumo, aún así el mismo ocurrirá en instantes muy cortos. Este intervalo horario ahora es nuestro objeto pues el mismo consta de una gran cantidad de horas en los que el sistema se encuentra ocioso, esto puede significar una oportunidad grande de ahorro y se debe explotar en toda su capacidad. Veremos de que forma movemos los puntos de consigna de la instalación para mover al sistema hacia un estado más eficiente que el actual. En este intervalo de tiempo que el sistema se encuentra en reposo se elevará la temperatura del depósito hasta los 63 °C. Estos choques térmicos se realizarán para mantener controlada la legionella que pueda existir dentro del circuito. Más adelante en el apartado “Legionella y su tratamiento” se tratará este tema con más detalle. Es necesario señalar que aunque la temperatura del depósito se eleva esto se realiza para aprovechar la inercia térmica del agua, aún así la temperatura de distribución se sigue manteniendo a 52 °C constante. De esta forma se evitan fluctuaciones en la temperatura final que llega a los usuarios y con ello se evitan molestias. A continuación se muestran las imágenes con el comportamiento de la temperatura del depósito, el caudal de consumo instantáneo registrado, la cantidad de arranques con el caudal que entrega las bombas de calentamiento y por último la temperatura de retorno. También se muestra en la tabla 5.10 el punto de operación donde llevamos al sistema a operar en este horario.

Tabla 5.13: Punto de operación para el horario entre las 9:00 y las 18:00 horas

Variable	Magnitud
Temperatura del primario	73 °C
Temperatura del depósito	53°C - 63°C
Temperatura de distribución	52 °C
Temperatura de retorno	Media: 44.2 °C / Máx: 47.3°C
Histéresis de la bomba de calentamiento	2 °C
Bomba de retorno	1.83 m <sup>3</sup> /h / 2.37 m <sup>3</sup> /h

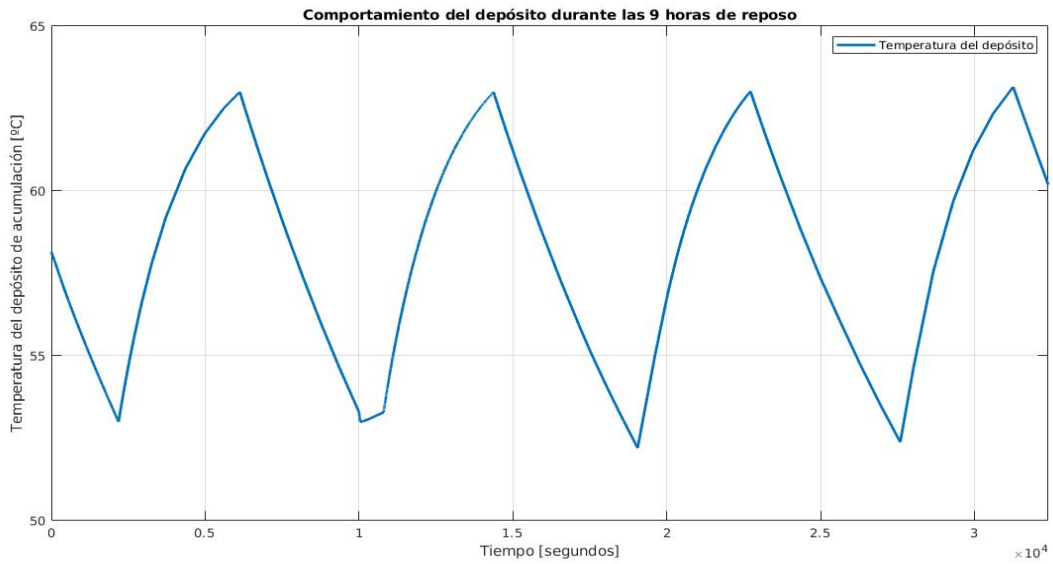


Figura 5.8: Temperatura del depósito durante el reposo entre las 9:00 y las 18:00 horas. Fuente: Propia

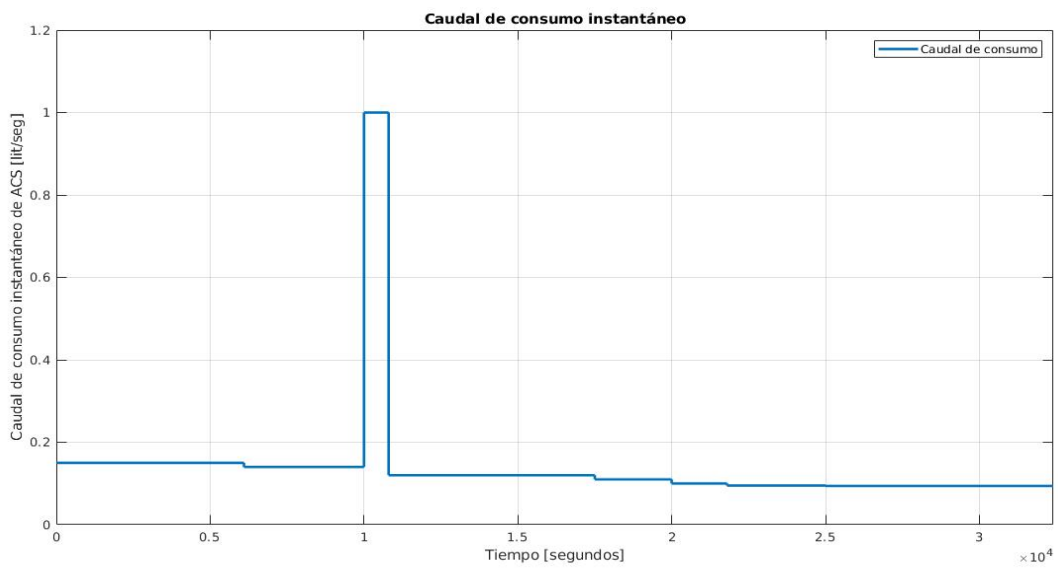


Figura 5.9: Caudal de consumo instantáneo entre las 9:00 y las 18:00 horas. Fuente: Propia

La siguiente tabla muestra el consumo energético que conlleva esta política de administración de los recursos.

Tabla 5.14: Consumo energético en el horario 9:00 a 18:00 horas

Equipo	Tiempo ON [horas]	Potencia [W]	Energía [kWh]
Bomba de retorno	8.77/0.23	635.18/652.4	5.7
Bomba de calentamiento	5.53	759.2	4.2
Bomba de calor	6.09	11820	71.9
Total			81.8

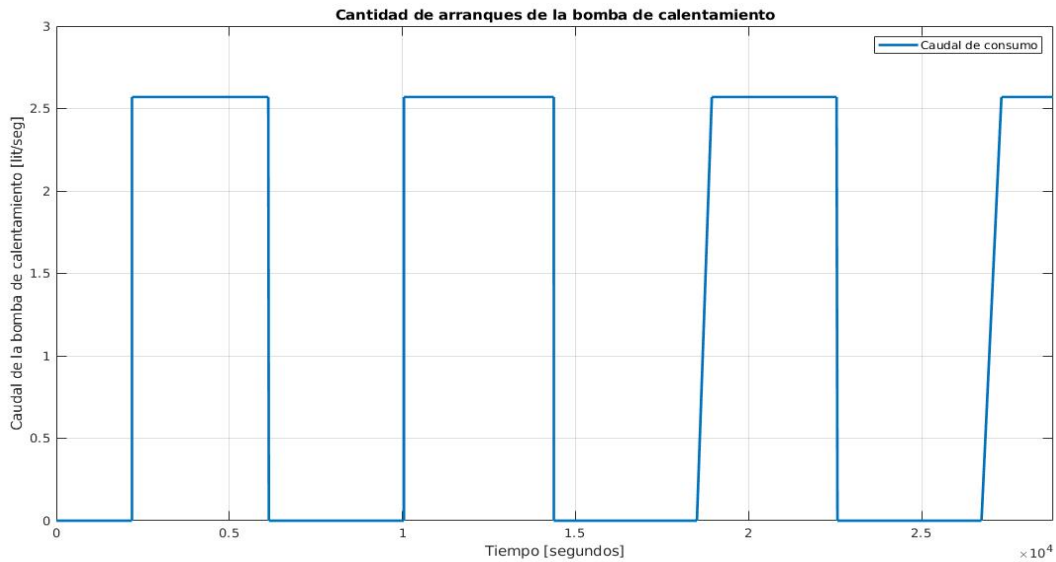


Figura 5.10: Arranques de las bombas de calentamiento entre las 9:00 y las 18:00 horas. Fuente: Propia

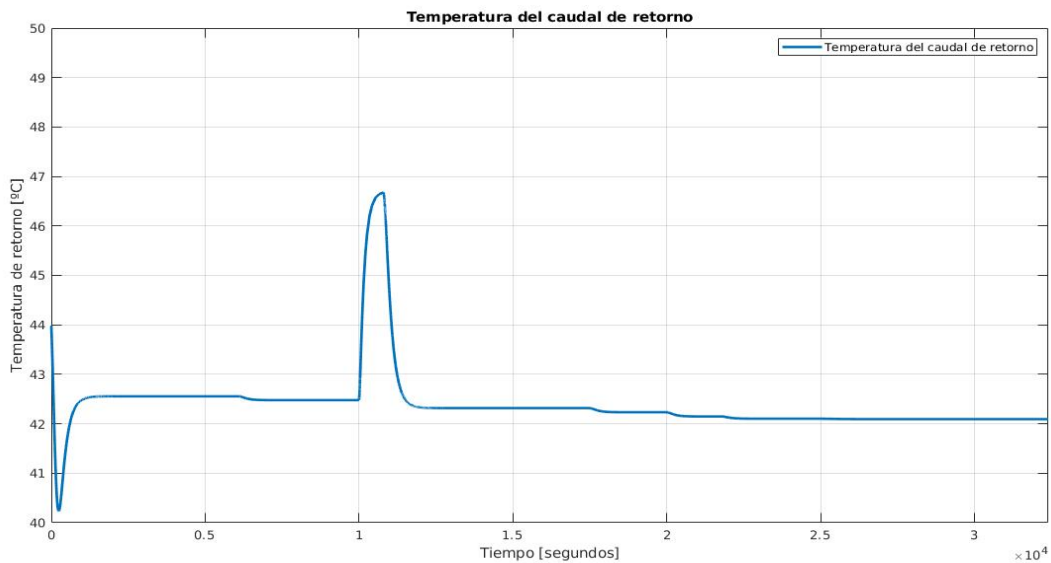


Figura 5.11: Temperatura del caudal de retorno durante el reposo entre las 9:00 y las 18:00 horas. Fuente: Propia

### 5.3.4. Máxima demanda vespertina

El horario que analizamos a continuación es similar al horario anterior de servicio (7:00 a 9:00 horas). Tiene una particularidad y es que durante este horario de servicio vespertino la instalación de ACS registrará el mayor consumo punta, esto equivale como se comentó en apartados anteriores a 1.84 lit/seg. Mantendremos la misma filosofía que en el anterior período de servicio, el depósito operando con una histéresis de 2 °C lo que en este caso desplazaremos la misma hacia el rango 58 °C - 60 °C. Esto se hará para poder hacer frente al servicio sin tener que reducir la temperatura de distribución por debajo de los 52 °C. Seguidamente la tabla que muestra el punto de operación del sistema.

Tabla 5.15: Punto de operación para el horario entre las 18:00 y las 20:00 horas

Variable	Magnitud
Temperatura del primario	69.5 °C
Temperatura del depósito	58°C - 60°C
Temperatura de distribución	52 °C
Temperatura de retorno	Media: 44.2 °C / Máx: 47.3°C
Histéresis de la bomba de calentamiento	2 °C
Bomba de retorno	1.83 m <sup>3</sup> /h / 2.37 m <sup>3</sup> /h

Este punto de operación asegura que se brinde un servicio de agua caliente sanitaria continuo durante las dos horas que dura el mismo. Las siguientes imágenes muestran el comportamiento del sistema visto desde los diferentes equipos que forman parte del mismo.

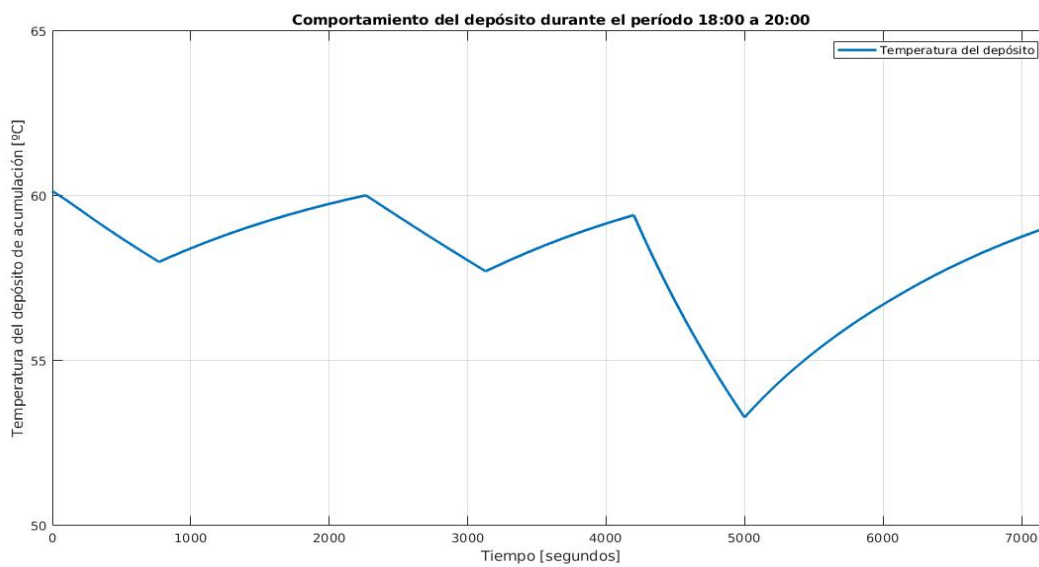


Figura 5.12: Temperatura del depósito de acumulación entre las 18:00 y las 20:00 horas. Fuente: Propia

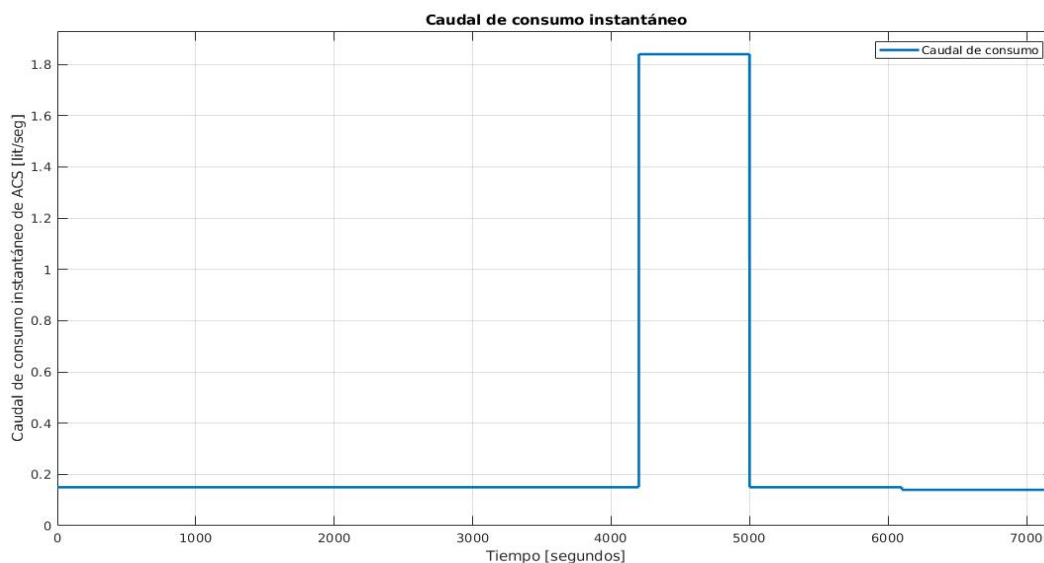


Figura 5.13: Consumo instantáneo de ACS entre las 18:00 y las 20:00 horas. Fuente: Propia

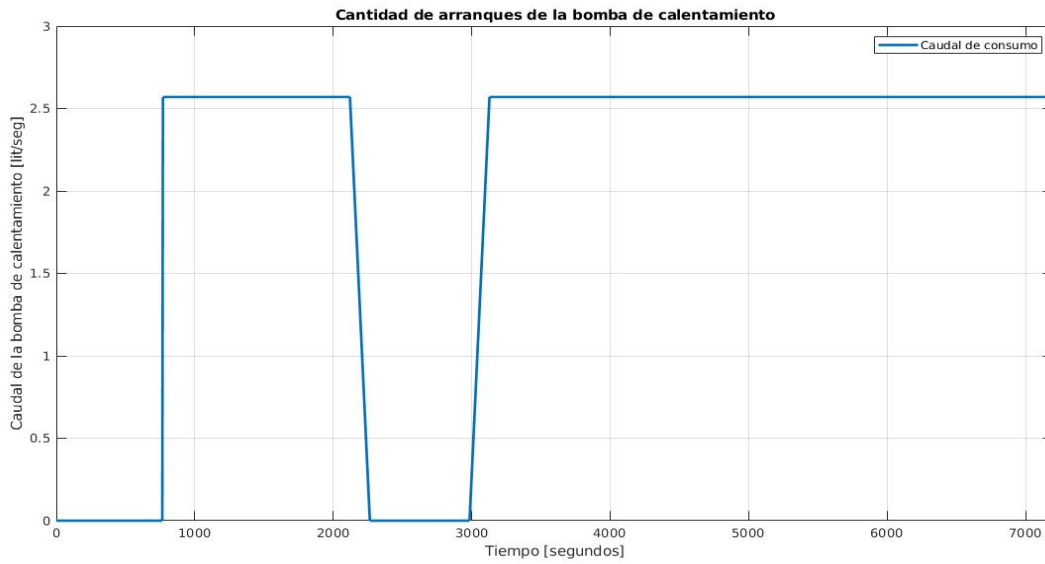


Figura 5.14: Arranque de las bombas de calentamiento entre las 18:00 y las 20:00 horas. Fuente: Propia

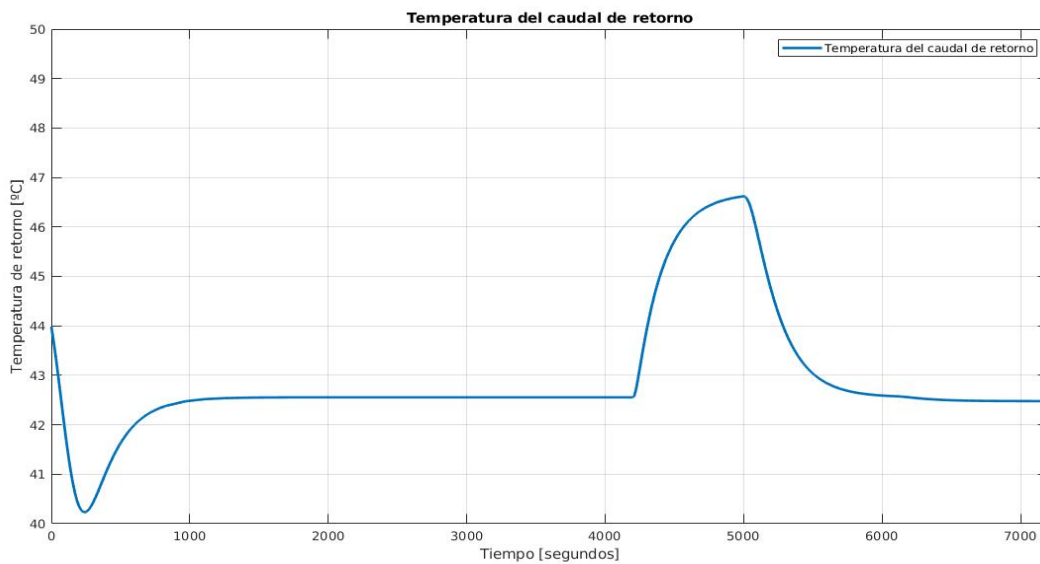


Figura 5.15: Temperatura del caudal de retorno entre las 18:00 y las 20:00 horas. Fuente: Propia

Se nota en la figura 5.13 como las bombas de calentamiento tienen que trabajar durante un período bastante largo una vez que comienza el consumo instantáneo a elevarse. Seguidamente una tabla mostrando el consumo energético que representa brindar el servicio de ACS bajo esta política de gestión.

Tabla 5.16: Consumo energético en el horario 18:00 a 20:00 horas

Equipo	Tiempo ON [horas]	Potencia [W]	Energía [kWh]
Bomba de retorno	1.76/0.23	635.18/652.4	1.3
Bomba de calentamiento	1.54	759.2	1.1
Bomba de calor	2	11060	22.1
Total			24.5

### 5.3.5. Consumo bajo nocturno

Durante este intervalo temporal casi no se registra consumo o el mismo será cada vez menor, aún se puede dar algún caso puntual de consumo pero no es lo común. Esta situación se aprovechará disminuyendo la capacidad de calentamiento del sistema y aprovechando que el mismo salía de un régimen de trabajo donde el primario se encontraba a 69.5 °C y el depósito a 60 °C, dicha temperatura se aprovechará para mantener al sistema en reposo el mayor tiempo posible. A continuación el punto de operación al que se mueve la instalación de ACS.

Tabla 5.17: Punto de operación para el horario entre las 20:00 y las 22:00 horas

Variable	Magnitud
Temperatura del primario	63 °C
Temperatura del depósito	52°C - 54°C
Temperatura de distribución	52 °C
Temperatura de retorno	Media: 44.2 °C
Histéresis de la bomba de calentamiento	2 °C
Bomba de retorno	1.83 m <sup>3</sup> /h

Las siguientes figuras muestran el comportamiento de las temperaturas y caudales de la instalación durante este período.

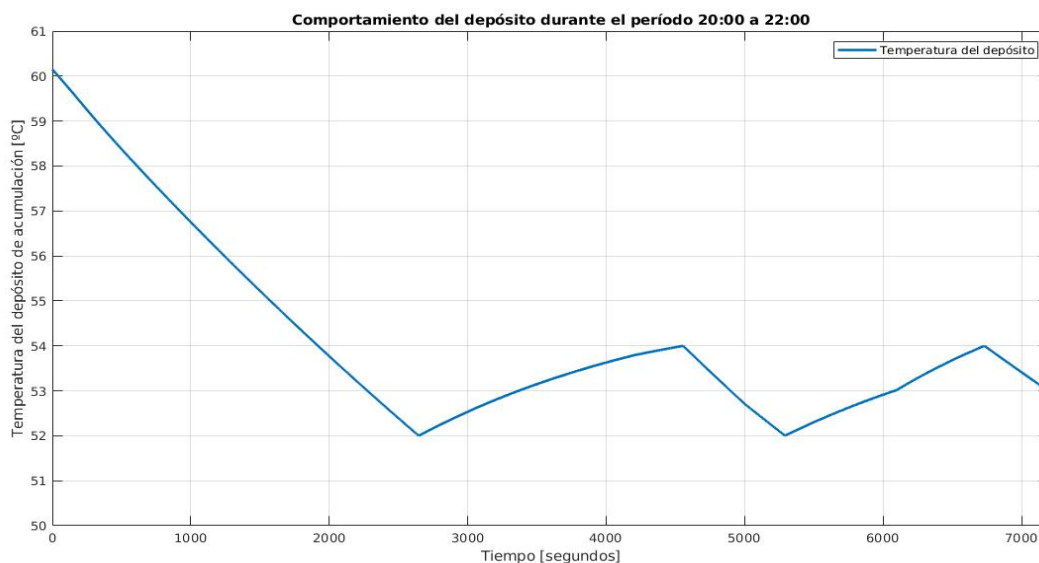


Figura 5.16: Temperatura del depósito entre las 20:00 y las 22:00 horas. Fuente: Propia

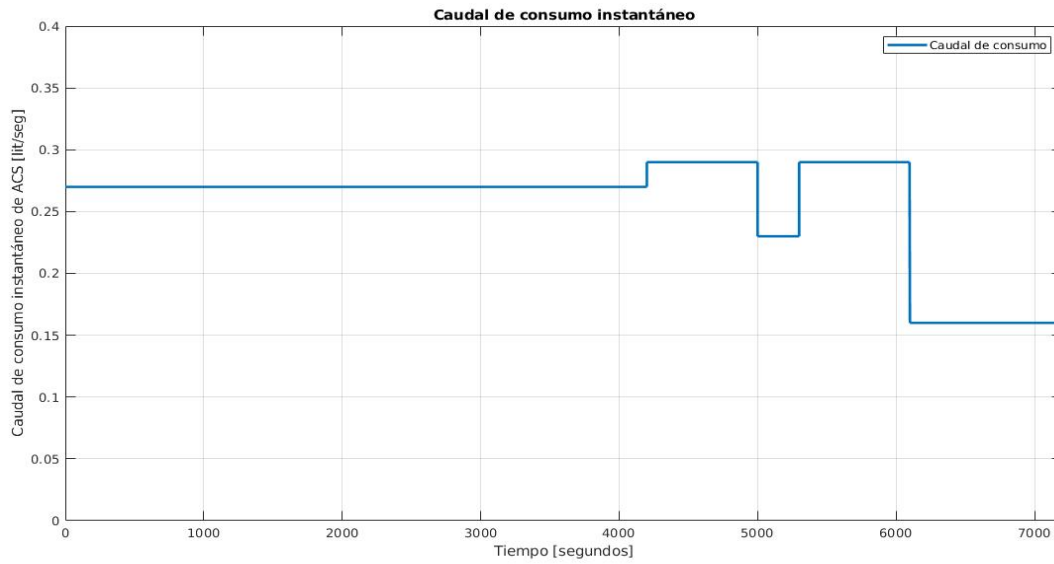


Figura 5.17: Caudal instantáneo de consumo entre las 20:00 y las 22:00 horas. Fuente: Propia

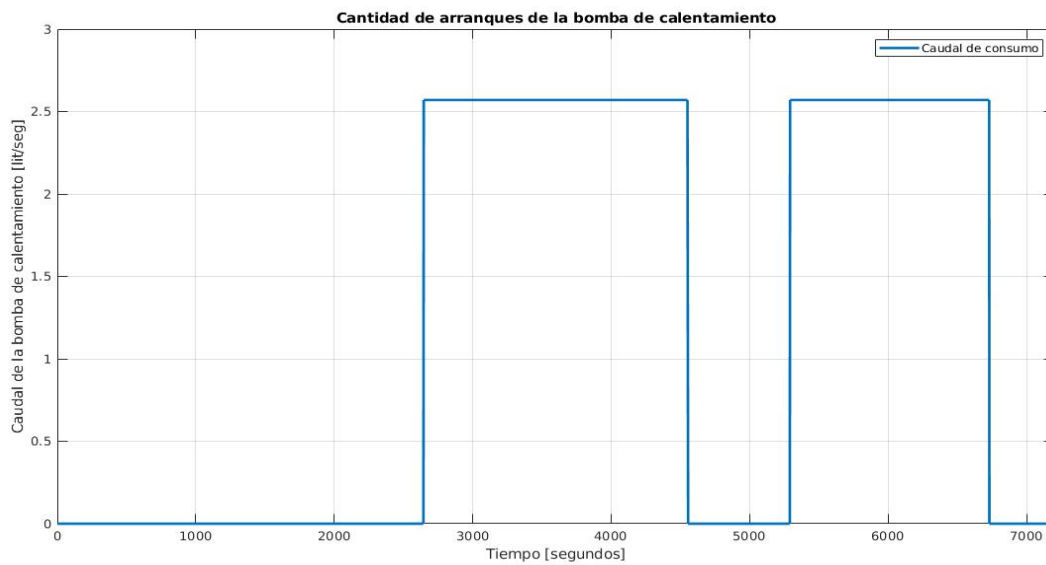


Figura 5.18: Arranques de la bomba de calentamiento entre las 20:00 y las 22:00 horas. Fuente: Propia

Seguidamente, en la tabla 5.15 se recoge la energía consumida por este último período en que dividimos el día para mayor organización y control de los recursos.

Tabla 5.18: Consumo energético en el horario 20:00 a 22:00 horas

Variable	Tiempo ON [horas]	Potencia [W]	Energía [kWh]
Bomba de retorno	2	635.18	1.27
Bomba de calentamiento	0.92	759.2	0.7
Bomba de calor	1.26	9856	12.42
Total			14.39

Para resumir los períodos anteriores de trabajo y reposo, se muestran en las siguientes tablas la energía consumida en cada período individualmente, así como una comparativa de costes entre el sistema operando



como lo hace actualmente y bajo una política de gestión.

Tabla 5.19: Consumo energético de la Política de gestión No. 2(desde las 6:00 horas hasta las 22:00 horas)

Horario	Energía [kWh]
Preparación matutina	8.56
Servicio matutino	24.1
Sin Servicio vespertino	81.8
Servicio vespertino	24.5
Sin Servicio nocturno	14.39
Total	153.45

Tabla 5.20: Consumo energético en el horario 6:00 a 22:00 sin política de gestión

Variable	Tiempo ON [horas]	Potencia [W]	Energía [kWh]
Bomba de retorno	16	759.2	12.1
Bomba de calentamiento	10.95	759.2	8.3
Bomba de calor	16	11160	178.56
Total			198.96

Tabla 5.21: Comparación de gastos entre la política actual y la política de gestión No. 2 durante las 16 horas de estudio

Gestión del sistema	Energía consumida[kWh]	Costes €
Sin política de gestión	198.96	18.66
Política de gestión No. 2	153.45	14.4

## 5.4. Política de gestión No. 3

La última política de gestión no es más que la unificación de las dos anteriores. Si combinamos la primera política de gestión que se enfoca sobre el horario nocturno-madrugada con esta última tratada en el apartado anterior, los resultados son los siguientes.

Tabla 5.22: Comparación de gastos diarios entre la gestión actual y la política de ahorro No. 3

Gestión del sistema	Energía consumida[kWh]	Costes €
Sin política de gestión	299.45	28
PG. No.3	186.38	17.48

Tabla 5.23: Comparación de gastos mensuales entre la gestión actual y la política de ahorro No. 3

Gestión del sistema	Energía consumida[kWh]	Costes €
Sin política de gestión	8983.5	842.65
PG. No.3	5591.4	524.64

Tabla 5.24: Comparación de gastos anuales entre la gestión actual y la política de ahorro No. 3

Gestión del sistema	Energía consumida[kWh]	Costes €
Sin política de gestión	107802	10115.06
PG. No.3	67097	6295.7

Gráficamente se ilustra a continuación. El ahorro que se puede lograr será aproximadamente del 40 % de la energía total consumida cuando el sistema no es planificado, unos 113.07 kWh diarios en solo una villa. Es lógico que mientras menos se utilice el sistema más puede llegar a ahorrar, esto es un valor aproximado y está sujeto a modificaciones en función de cómo se vaya a explotar la instalación finalmente.

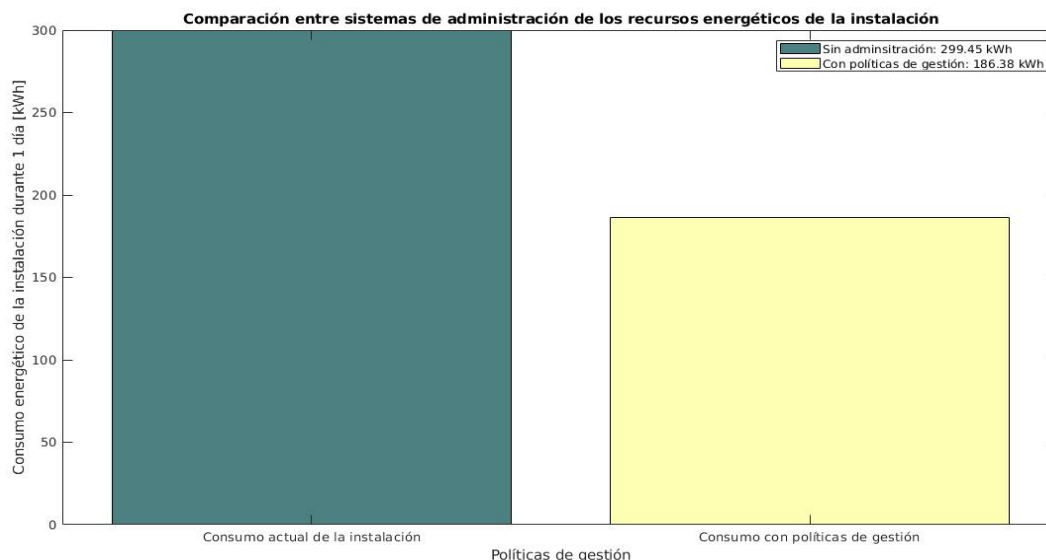


Figura 5.19: Comparativa energética. Fuente: Propia

## 5.5. Legionella, su tratamiento y repercusión económica sobre la instalación

La Legionella es un tipo de bacteria que se halla naturalmente en los ambientes de agua fresca, como los lagos y los arroyos. Se puede convertir en una preocupación de salud cuando se multiplica y propaga en los sistemas de agua artificiales de los edificios, por ejemplo:

- El cabezal de la ducha y el grifo de los lavamanos.
- Las torres de enfriamiento (estructuras que contienen agua y un ventilador como parte del sistema centralizado de enfriamiento de aire de un edificio o proceso industrial).
- Las bañeras de hidromasaje que no se vacían después de cada uso.
- Las fuentes y accesorios decorativos con agua.
- Los tanques de agua caliente y calentadores de agua.
- Los sistemas grandes de cañerías.

Después de que la Legionella crece y se multiplica en el sistema de agua de un edificio, el agua que la contiene debe dispersarse en forma de gotitas lo suficientemente pequeñas para que las personas las inhalen. Las personas

pueden contraer la enfermedad del legionario o la fiebre de Pontiac cuando inhalan gotitas de agua en el aire que contengan las bacterias.

Otra forma menos común en que se pueden enfermar las personas es al aspirar agua potable que contenga *Legionella*. Esto sucede cuando les entra agua a los pulmones accidentalmente al beber agua. Las personas en mayor riesgo de aspirar agua incluyen aquellas con dificultades para tragar.

Las instalaciones de agua de hospitales y hoteles son la mayor fuente de infección por legionelosis[1][7] Los casos asociados a infecciones que viajan están relacionadas en su mayoría a infecciones adquiridas en hoteles[8], y los sistemas de agua caliente son más probables de colonizar en cambio que los sistemas de agua fría[25]. Fueron reportados casos de enfermedad del legionario asociados a viajes en más de 20 países de la Unión Europea y la mayoría de los casos (alrededor del 66%) fueron de Reino Unido, Italia, Francia y Países Bajos[34]. Entre 2000 y 2010 fueron reportados 7974 casos de infección por legionelosis, de todos estos, un total de 7869 fueron asociados a infecciones adquiridas en hoteles, lo cual representa el 99% de los casos[19].

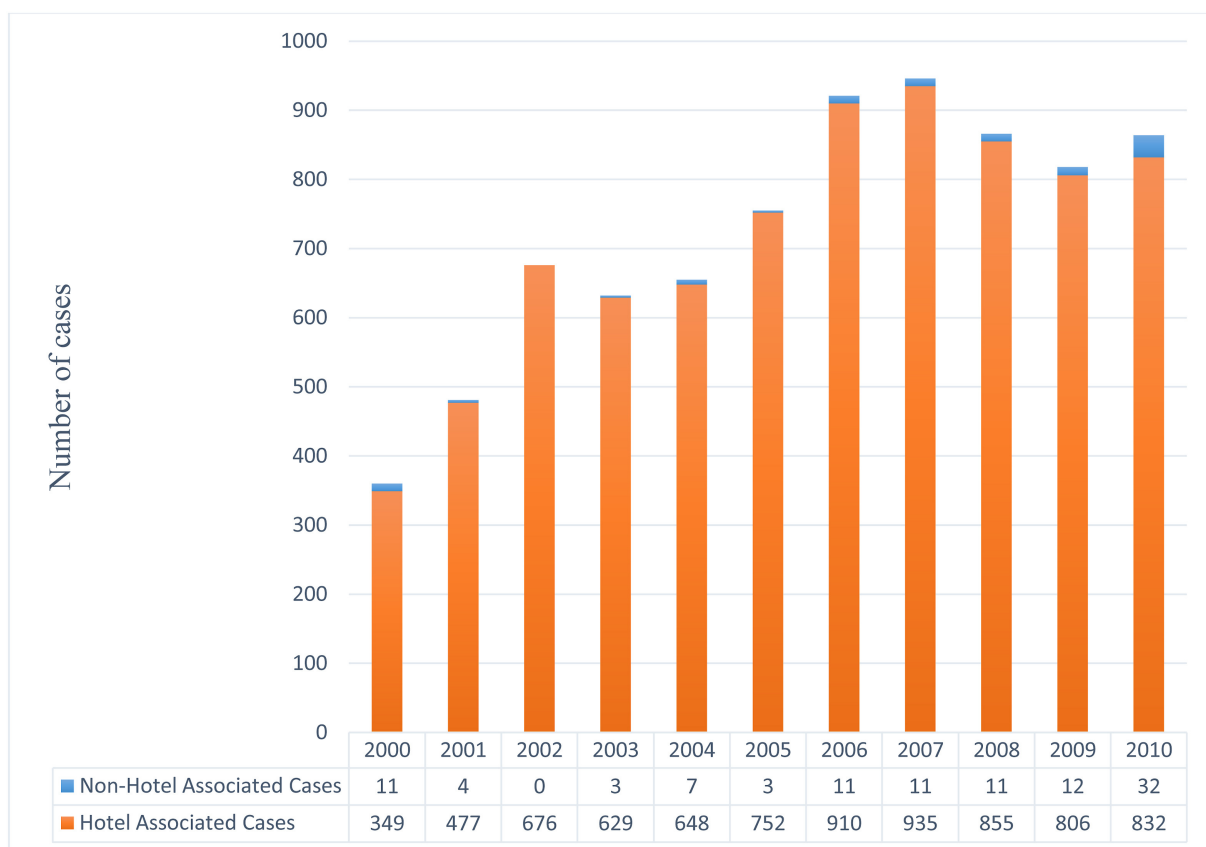


Figura 5.20: Infección por legionelosis asociadas a hoteles y no-hoteles. Fuente: [34]

Análisis cuantitativos realizados[34] identificaron una necesidad de mantener la temperatura del agua caliente entre 55 ° y 59 °C. En la mayoría de estudios se afirma que al menos el sistema debe llegar a una temperatura de 50 °C para protegerse contra la colonización por legionella.

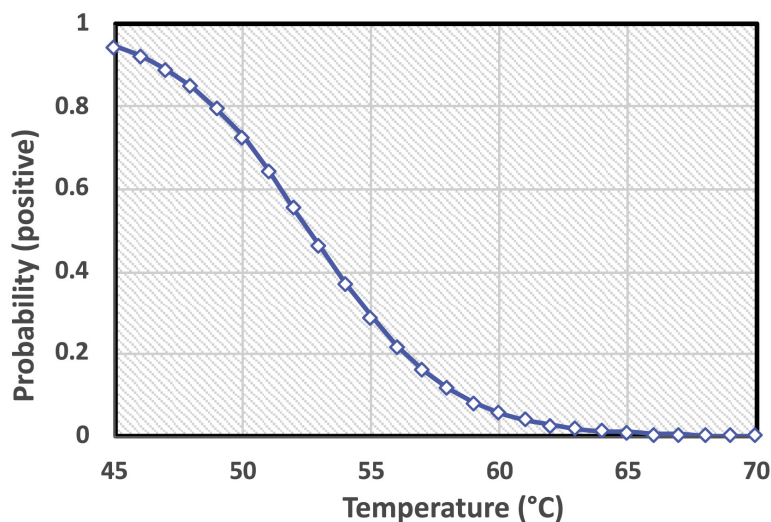


Figura 5.21: Infección por legionelosis asociadas a hoteles y no-hoteles. Fuente: [34]

Según el Real Decreto 853/2003[35] por el que se rigen los procedimientos de limpieza y mantenimiento contra la legionella, la instalación deberá ser capaz de alcanzar los 70 °C de temperatura en todo el circuito, y 60 °C en los puntos terminales más alejados del depósito de acumulación. Dichos parámetros deben cumplirse para realizar la desinfección térmica de la red de tuberías y depósitos de acumulación durante un período de dos horas, luego el depósito de acumulación es vaciado, llenado nuevamente y calentado. Este procedimiento de choques térmicos debe realizarse al menos una vez al año en las instalaciones.

Seguidamente se irá detallando por puntos los pasos a seguir para el procedimiento de desinfección.

- Elevación de la temperatura del primario a 80 °C.
- Elevación de la temperatura del depósito de ACS a 70 °C.
- Elevación de la temperatura de distribución y recirculación durante 2 horas.
- Vaciado del depósito de acumulación.
- Llenado y calentamiento del depósito de acumulación.

La bomba de calor de la instalación se toma 49.8 minutos en elevar la temperatura del circuito primario a 80 °C, esta es la temperatura necesaria para que la instalación secundaria alcance los 70 °C fijados en el RD 853/2003[35]. Una vez alcanzado dicho valor, se comienza a calentar el circuito secundario de agua hasta alcanzar el mismo la temperatura de consigna. Se puede percibir en la figura 5.21 como el mismo alcanza los 70 °C a los 56 minutos de comenzar el proceso de calentamiento. De igual manera se observa en la figura 5.22 la temperatura del caudal de retorno en la instalación una vez comenzada la recirculación del agua a la temperatura fijada. Una vez alcanzado dicho valor comienza la circulación de agua por la red de tuberías del circuito durante un lapso de dos horas. Al finalizar este tiempo, el depósito es vaciado, rellenado y llevado a la temperatura de consigna deseada. La siguiente tabla muestra el punto de operación al que es trasladado el sistema durante esta operación.

Tabla 5.25: Punto de operación del sistema para la operación de pasteurización

Variable	Magnitud
Temperatura del primario	80 °C
Temperatura del depósito	70°C - 72°C
Temperatura de distribución	66 °C
Temperatura de retorno	Media: 60 °C
Histéresis de la bomba de calentamiento	2 °C
Bomba de retorno	4.5 m <sup>3</sup> /h

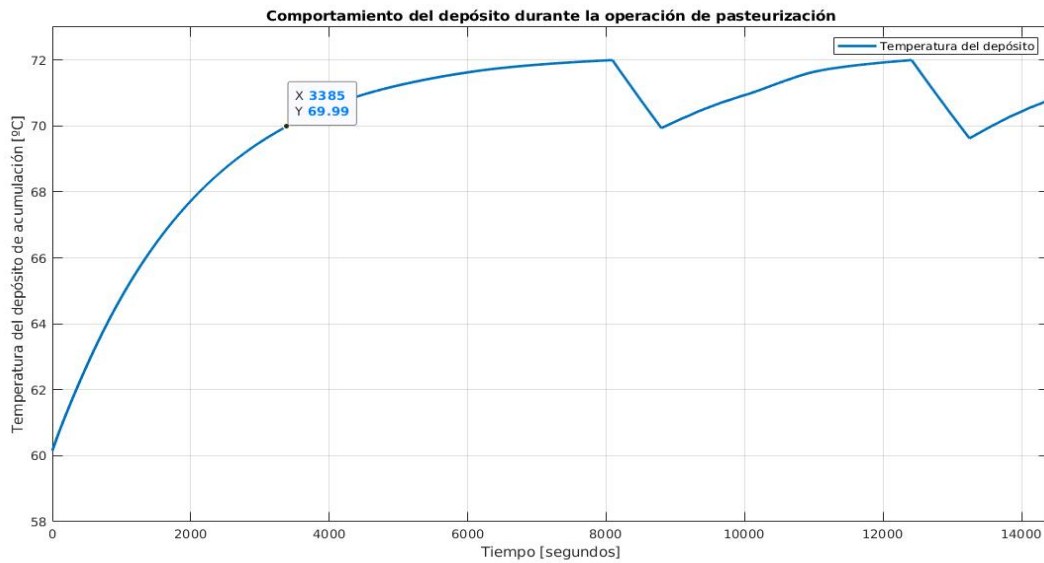


Figura 5.22: Tiempo de calentamiento del circuito secundario durante operación de pasteurización. Fuente: Propia

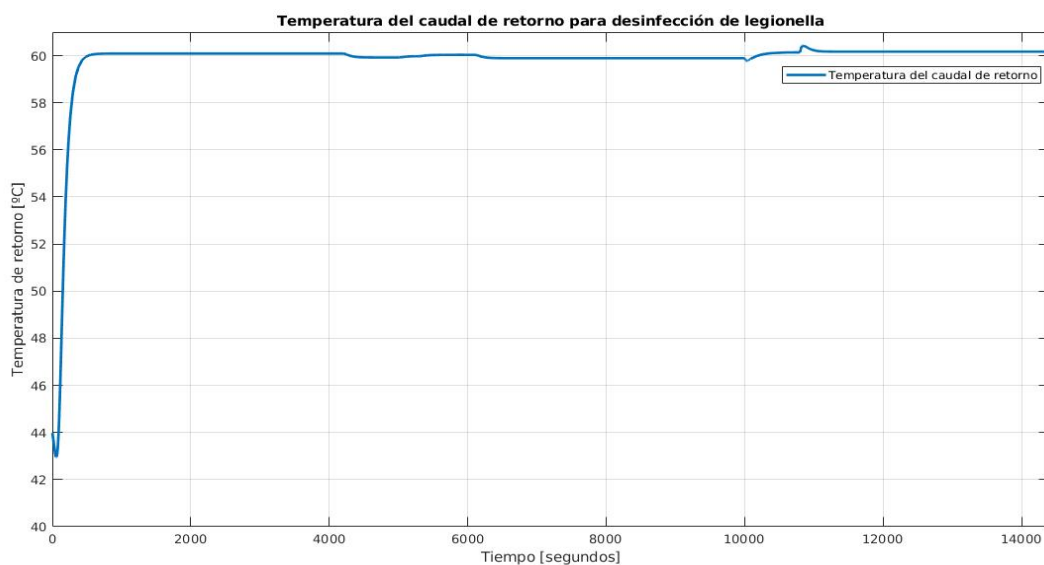


Figura 5.23: Temperatura de retorno durante la operación de pasteurización. Fuente: Propia

La tabla 5.23 muestra los tiempos que toma la operación de pasteurización, y así tener una idea de la energía

que consume el proceso. Como se ve el proceso desde que comienza hasta que finaliza tarda un total de 295.9 minutos, aproximadamente 4 horas con 56 minutos. Se tomará la cifra de 5 horas como referencia para ser conservadores. Como en casos anteriores, la notación en las secciones de la bomba de calor y de retorno significa que se encuentran trabajando 3.77 horas a 13500 Wattios de potencia y 1.23 horas a 10200 Wattios, para la bomba de retorno se aplica lo mismo.

Esta operación de pasteurización como debe ser esperado, es donde más energía térmica se disipa de todos, un total de 35938 Wattios disipados en la red de tuberías del circuito secundario.

Tabla 5.26: Tiempos consumidos por la operación de pasteurización

Proceso	Tiempo [minutos]
Calentamiento del circuito primario	49.8
Calentamiento del circuito secundario	56.4
Recirculación de agua caliente	120
Calentar el depósito de acumulación nuevamente	69.6
Total	295.9

Tabla 5.27: Energía consumida durante la operación de pasteurización

Equipo	Tiempo [horas]	Potencia [W]	Energía [kWh]
Bomba de calor	3.77/1.23	13500/10200	62.7
Bomba de calentamiento	4.64	759.2	3.52
Bomba de retorno	1.99/3.01	635.18/715.28	3.42
Total			69.64

Tabla 5.28: Coste asociado a la operación de pasteurización

Energía [kWh]	Precio kWh	Coste de la operación
69.64	0.09383 €/kWh	6.53 €

La tabla anterior resumen el coste en equipos que toma realizar la operación de pasteurización durante 5 horas en una Villa. Las políticas de gestión propuestas en apartados anteriores modifican la temperatura del depósito según el horario del día y el consumo instantáneo que esté registrando la instalación. El período que pudiera resultar más peligroso es el intervalo horario de madrugada, donde la consigna mínima del depósito son unos 45 °C. Esta decisión fue tomada pues durante dicho horario no existe reposición de agua fría porque no existe consumo por parte de los usuarios. Aún así, una vez que comienza el consumo instantáneo a elevarse, la temperatura de consigna del depósito no disminuye de 55 °C, asegurando[34] unas probabilidades de menos de 30% de existencia de la bacteria legionella en el circuito. Durante el horario de bajo consumo vespertino, la consigna se eleva hasta 4 veces a una temperatura de 63 °C, disminuyendo con ello el riesgo por debajo del 5%.

Habiendo realizado el estudio anterior, y dadas las modificaciones en puntos de consigna realizadas sobre el sistema, se ha tomado la decisión de proponerle a la instalación 4 operaciones de pasteurización anuales, frente a una sola que existe dictada por el reglamento. Las mismas tendrán una separación de 3 meses una de la otra. El efecto que tienen estas modificaciones sobre la energía y los costes de la instalación se muestran a continuación.

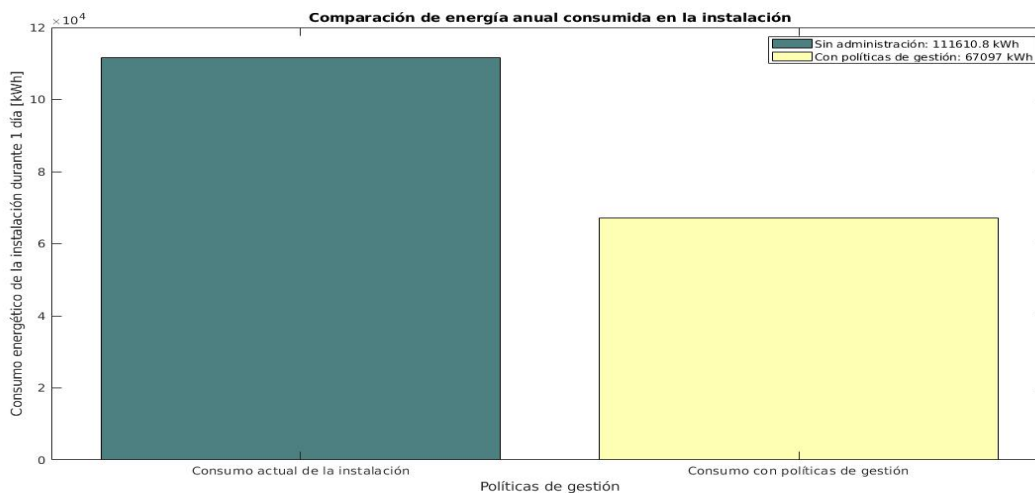


Figura 5.24: Comparativa energética anual. Fuente: Propia

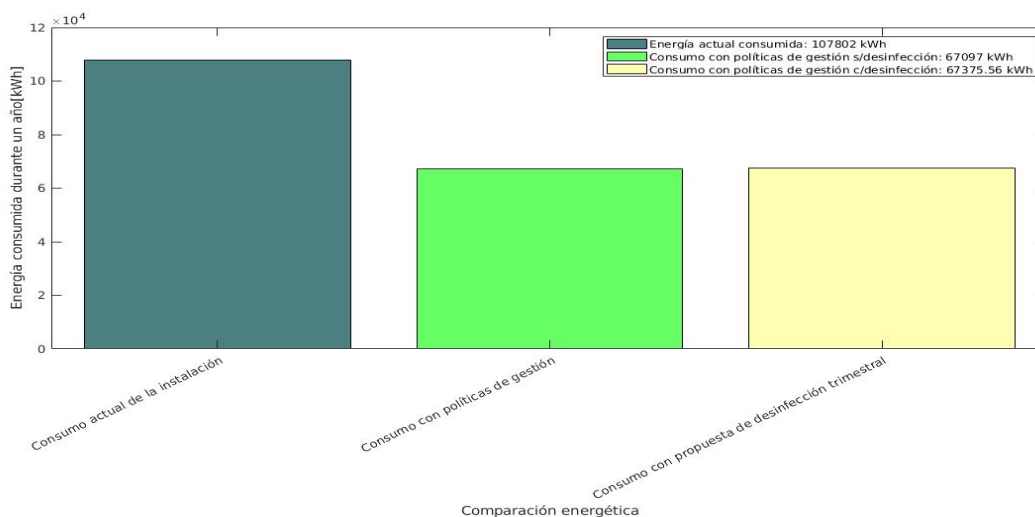


Figura 5.25: Comparativa energética anual incluyendo la propuesta de desinfección. Fuente: Propia

Tabla 5.29: Comparativa de costes anuales incluyendo el propuesta de desinfección

Políticas de administración	Energía consumida [kWh]	Coste de la operación €
Sin administración	107802	10115.06 €
Política de gestión s/ desinfección	67097	6295.7 €
Política de gestión c/ desinfección	67375.56	6321.8 €

Como se nota, el cambio no es significativo pues la energía consumida por el sistema gestionado y con la propuesta de desinfección trimestral sigue siendo del alrededor del 60% de la energía consumida actualmente por la instalación. Finalmente, la propuesta realizada al Hotel Abama para gestionar su instalación de agua caliente sanitaria puede reportarle al mismo unos ahorros anuales de alrededor de 3793.26 € solamente en una de las Villas.

## Capítulo 6

# Diseño de un sistema inteligente para la gestión energética en instalaciones de ACS

La propuesta de gestión realizada en el capítulo anterior debemos llevarla a cabo a través de un sistema que sea capaz de tomar las decisiones correctas en dependencia del estado que se encuentre la instalación. El mismo será capaz de identificar la situación de la instalación, y mover los puntos de consigna como fue descrito en el capítulo anterior para llevar al sistema a un punto de mayor eficiencia. Para ello se encontrará recibiendo constantemente lecturas de las variables de interés y actuando sobre las variables de manipulación correctas para mover los puntos de consigna.

El sistema que se implementará para automatizar la tarea de toma de decisiones será uno basado en lógica difusa. Esta decisión fue tomada pues los mismos son fáciles y rápidos de implementar. Una de las mayores ventajas es que no necesitan disponer de un modelo matemático de la instalación a controlar, acelerando con ello el proceso de implementación del mismo.

Se pretende en este capítulo dar una breve descripción del impacto que ha tenido la lógica difusa y sus aplicaciones sobre distintas ramas de la ciencia. Seguidamente se comentarán las variables a tener en consideración a la hora de diseñar el procedimiento, aunque se puede tener una idea a partir de los capítulos anteriores de aquellas que tienen mayor repercusión sobre el funcionamiento de la instalación. Luego se realizará el diseño del método de gestión y se aplicará a nuestro caso particular para ver su desempeño.



## 6.1. La lógica difusa como herramienta para el control de sistemas

La lógica difusa se utiliza cuando la complejidad del proceso en cuestión es muy alta y no existen modelos matemáticos precisos, para procesos altamente no lineales y cuando se envuelven definiciones y conocimiento no estrictamente definido. En cambio, no es una buena idea usarla cuando algún modelo matemático ya soluciona eficientemente el problema, cuando los problemas son lineales o cuando no tienen solución.

El ingeniero eléctrico de origen iraní Lofti A. Zadeh introduce la teoría de conjuntos difusos o lógica difusa en 1965. Desde ese momento la técnica ha sido empleada con bastante éxito en la industria, principalmente en Japón, extendiéndose sus aplicaciones a multitud de campos. La primera vez que se usó de forma importante fue en el metro japonés, con excelentes resultados. Posteriormente y con la demostración de los excelentes resultados obtenidos, sus aplicaciones se extendieron:

- Sistemas de control de aires acondicionados
- Sistemas de foco automático en cámaras fotográficas.
- Electrodomésticos familiares (frigoríficos, lavadoras).
- Optimización de sistemas de control industriales.
- Sistemas de escritura.
- Mejora en la eficiencia del uso de combustible en motores.
- Sistemas expertos del conocimiento (simular el comportamiento de un experto humano).
- Tecnología informática.
- Bases de datos difusas: Almacenar y consultar información imprecisa.

Consiste en la aplicación de la lógica difusa con la intención de imitar el razonamiento humano en la programación de computadoras. Con la lógica convencional, las computadoras pueden manipular valores estrictamente duales, como verdadero/falso, sí/no o ligado/desligado. En la lógica difusa, se usan modelos matemáticos para representar nociones subjetivas, como caliente/tibio/frío, para valores concretos que puedan ser manipuladas por los ordenadores.

En el campo de la gestión energética de edificios igualmente tenemos presente esta tecnología con increíbles resultados[12][14][26][41][42], y el elemento en común que las une es que se encuentran enfocadas hacia el acondicionamiento de aire, por representar éste la mayor partida en el coste energético de los edificios, cerca del 68 %[12]. La necesidad de obtener ahorros energéticos y garantizar condiciones de confort, teniendo en cuenta las preferencias de los usuarios, llevó a los investigadores a desarrollar sistemas inteligentes para la gestión energética en edificios (Building Intelligent Energy Management Systems — BIEMS), principalmente para grandes edificios como edificios de oficinas, hoteles, edificios públicos y comerciales, etc. Estos sistemas están diseñados para monitorear y controlar los parámetros ambientales del microclima del edificio y minimizar el consumo de energía y los costos operativos.

El requisito de un modelo matemático del funcionamiento de un edificio ha sido un obstáculo para la aplicación de los métodos de control tradicionales en los edificios. En sistemas inteligentes, es decir, en controladores sin modelo, este modelo no es necesario. Este hecho es una innovación general en el desarrollo de sistemas de control automático. Al incorporar variables de nivel superior de nuevo tipo que definen el confort en los controladores inteligentes, fue posible controlar el confort sin entrar en la regulación de variables de nivel inferior como temperatura, humedad y velocidad del aire. En tales sistemas, los usuarios comienzan a participar en la especificación del confort deseado.

Se utilizan algoritmos genéticos que provienen de la teoría del control adaptativo para optimizar los controladores difusos. El control por lógica difusa se ha utilizado en una nueva generación de controladores de hornos que aplican control de calefacción adaptativo para maximizar tanto la eficiencia energética como el confort en un sistema de calefacción doméstico privado[2].

El control óptimo tiene como objetivo preservar las condiciones ambientales interiores con un gasto de energía mínimo en condiciones dinámicas exteriores e interiores. Se puede lograr mediante el uso de controladores locales de los subsistemas y un control de supervisión óptimo del edificio. Para los sistemas de control avanzado en edificios, el control de supervisión es un tema interesante. El controlador de supervisión restablece los puntos de consigna debido a los cambios de las cargas exteriores / interiores, las preferencias de los usuarios y el consumo de energía. Kolokotsa[9] desarrolló técnicas de optimización basadas en algoritmos genéticos dirigidos a entornos óptimos de confort en interiores. Estas nuevas configuraciones se aplican directamente a los controladores. Wang[40] desarrolló una estrategia de control en línea para un sistema de aire acondicionado que utiliza control digital para VAV (volumen de aire variable) AHU (unidades de tratamiento de aire). Se utiliza un algoritmo genético para detectar la configuración óptima de los controladores. Esta estrategia predice la respuesta del sistema a los cambios de los puntos de consigna de control utilizando la identificación de parámetros en línea y el autoajuste.

No es objetivo de este estudio implementar un control óptimo sobre la instalación. Pero sí crear un mecanismo de supervisión que dirija el estado de funcionamiento de la instalación de agua caliente sanitaria hacia un punto de mayor eficiencia global.

## 6.2. Diseño del sistema de gestión

Hace algunos años, los sistemas de agua caliente sanitaria centralizados se asumían como un gasto fijo de la instalación, más recientemente, se ha comenzado a investigar sobre la posibilidad de gestionarlo, y así mejorar la eficiencia del mismo sobre todo durante los períodos que no existe o es casi nulo el consumo. Tomando este motivo como idea inicial, se pretende diseñar un Sistema de Decisión Inteligente para la gestión de las instalaciones de ACS. El mismo será el responsable de evaluar el estado actual del sistema, y decidir donde colocar los puntos de consignas de las principales variables que intervienen en el proceso con el fin de disminuir los costes de operación de la instalación en general, cumplir con la normativa de higiene (legionella) y mantener el confort de los clientes.

El sistema de decisión que se pretende diseñar estará basado en lógica difusa. Estos sistemas tienen la particularidad de adaptarse mejor que los analíticos al mundo en que vivimos, pues fueron concebidos para “comprender” más fácilmente expresiones como “más caliente”, “más frío”, “un poco más alto” o “casi nada”. Además de lo mencionado, los sistemas de lógica difusa no necesitan del modelo matemático de funcionamiento del proceso ya sean funciones de transferencia o modelos en espacio de estado. Son capaces de funcionar con conocimiento experto del mismo pues están basados en reglas heurísticas SI(ANTECEDENTE), ENTONCES(CONSECUENTE) donde el antecedente y el consecuente son conjuntos difusos. La siguiente figura muestra un diagrama del sistema de inferencia que se propone en este capítulo.



Figura 6.1: Diagrama del sistema de inferencia con las variables de entrada y salida. *Fuente: Propia*

### 6.2.1. Variables de salida del sistema

Como fue mencionado, el antecedente y el consecuente son conjuntos difusos que son necesarios definir para cada proceso en particular. Nuestro objetivo es crear un sistema de gestión base, el mismo contará con conjuntos difusos de entrada/salida que representan variables que se encuentran en cualquier instalación centralizada de agua caliente sanitaria. Sería algo así como una función primitiva que recoge los aspectos funcionales básicos para la toma de decisiones y es aplicable en cualquier instalación de generación de ACS. La elección de las variables que intervendrán en nuestro sistema constó de dos fases, la elección de las variables de entrada y la elección de las variables de salida. Estas últimas fueron sencillas de elegir pues había que escoger aquellas que al modificarlas afectarían directamente al proceso. En el capítulo 4 se trataron con detenimiento todas aquellas variables cuya modificación tenían una repercusión directa sobre la instalación. Estas son las variables que escogeremos para construir nuestro conjunto de variables de salida:

#### 1. Circuito secundario:

- Consigna del depósito de acumulación
- Consigna de la válvula mezcladora.
- Consigna de la bomba de retorno.

#### 2. Circuito primario

- Consigna de la bomba de calor
- Consigna de la válvula de 3 vías del primario

### Consigna del depósito de acumulación

El punto de consigna de la temperatura del depósito lo administraremos, al igual que el resto de variables, de forma tal que maximice el almacenamiento de la energía térmica transmitida al sistema. Dicho punto de consigna vendrá dado por la franja horaria del día en que nos encontremos así como el consumo instantáneo que está registrando la instalación. Esta variable será controlada con cierta histéresis, esto es, tendrá un valor máximo y un valor mínimo que variará en función de si se está brindando servicio o si no. Durante el período con menor consumo o nulo esta histéresis será mayor, del orden de los 10 °C. En cambio durante los períodos de servicio la misma será menor, alrededor de 2°C. El valor específico de la misma no es fijo, y vendrá dado por el tipo y las características individuales de cada instalación. Los valores anteriormente mencionados fueron los elegidos para el sistema que se está estudiando

El ajuste de estos límites de temperatura serán individualizados para cada estructura. La tabla mostrada a continuación muestra el universo de discurso de la variable creada así como la regla semántica asignada.

Tabla 6.1: Punto de consigna del depósito de acumulación

Característica	Valor
Nombre de la variable	SPDEP
Universo de discurso	[40 75]
Valores lingüísticos	TDMIN,TD46,...,TD69,TDPAS

Debido al gran número de valores lingüísticos que posee la variable no se pueden plasmar todos en la tabla 6.1, pero la siguiente tabla muestra todos en su conjunto y la regla semántica asignada. Como se puede ver en la tabla 6.2 y se corrobora luego en la figura 6.1, la regla semántica asignada a cada valor lingüístico es de tipo triangular.

Tabla 6.2: Variable: SPDEP. Valor lingüístico/Regla semántica

Valor lingüístico	Regla semántica
TDMIN	$\text{trimf}(x, [43 \ 45 \ 47])$
TD46	$\text{trimf}(x, [44 \ 46 \ 48])$
TD47	$\text{trimf}(x, [45 \ 47 \ 49])$
TD48	$\text{trimf}(x, [46 \ 48 \ 50])$
TD49	$\text{trimf}(x, [47 \ 49 \ 51])$
TD50	$\text{trimf}(x, [48 \ 50 \ 52])$
TD51	$\text{trimf}(x, [49 \ 51 \ 53])$
TD52	$\text{trimf}(x, [50 \ 52 \ 54])$
TD53	$\text{trimf}(x, [51 \ 53 \ 55])$
TD54	$\text{trimf}(x, [52 \ 54 \ 56])$
TD55	$\text{trimf}(x, [53 \ 55 \ 57])$
TD56	$\text{trimf}(x, [54 \ 56 \ 58])$
TD57	$\text{trimf}(x, [55 \ 57 \ 59])$
TD58	$\text{trimf}(x, [56 \ 58 \ 60])$
TD59	$\text{trimf}(x, [57 \ 59 \ 61])$
TD60	$\text{trimf}(x, [58 \ 60 \ 62])$
TD61	$\text{trimf}(x, [59 \ 61 \ 63])$
TD62	$\text{trimf}(x, [60 \ 62 \ 64])$
TD63	$\text{trimf}(x, [61 \ 63 \ 65])$
TD64	$\text{trimf}(x, [62 \ 64 \ 66])$
TD65	$\text{trimf}(x, [63 \ 65 \ 67])$
TD66	$\text{trimf}(x, [64 \ 66 \ 68])$
TD67	$\text{trimf}(x, [65 \ 67 \ 69])$
TD68	$\text{trimf}(x, [66 \ 68 \ 70])$
TD69	$\text{trimf}(x, [67 \ 69 \ 71])$
TDPAS	$\text{trimf}(x, [68 \ 70 \ 72])$

$\text{trimf}$ : función de pertenencia de tipo triangular

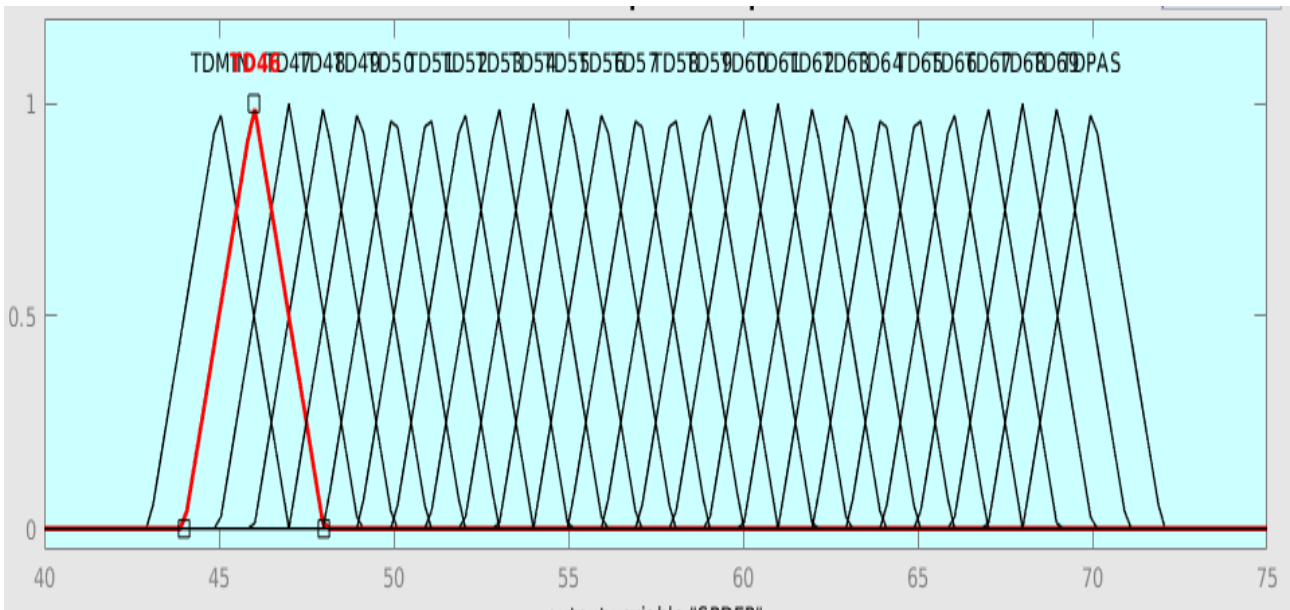


Figura 6.2: Variable difusa SPDEP. Fuente: Propia

### Consigna de la válvula mezcladora

La válvula mezcladora se encarga de fijar la temperatura a la cual se distribuye hacia los consumidores el agua caliente sanitaria. Es una válvula de 3 vías cuyas respectivas entradas son el agua procedente del depósito de acumulación, y el agua a temperatura ambiente, la salida de la misma va hacia el consumo a la temperatura elegida. Con este variable se debe tener especial cuidado pues afecta mucho la temperatura media del depósito, y por consiguiente le resta energía térmica al sistema. Una forma de que el sistema gane en eficiencia es mantener la temperatura de distribución en tanto se pueda cercana a la temperatura de consigna del depósito, de esta forma la temperatura en el agua de retorno no estará tan baja como para restarle calor a la acumulación. El universo de discurso de la misma es similar a la variable previa(temperatura del depósito de acumulación).

Tabla 6.3: Punto de consigna de la válvula mezcladora

Característica	Valor
Nombre de la variable	SPDIST
Universo de discurso	[40 75]
Valores lingüísticos	DISMIN,DIS46,...,DIS69,DISPAS

Tabla 6.4: Variable: SPDIST. Valor lingüístico/Regla semántica

Valor lingüístico	Regla semántica
DISMIN	trimf(x,[43 45 47])
DIS46	trimf(x,[44 46 48])
DIS47	trimf(x,[45 47 49])
DIS48	trimf(x,[46 48 50])
DIS49	trimf(x,[47 49 51])
DIS50	trimf(x,[48 50 52])
DIS51	trimf(x,[49 51 53])
DIS52	trimf(x,[50 52 54])
DIS53	trimf(x,[51 53 55])
DIS54	trimf(x,[52 54 56])
DIS55	trimf(x,[53 55 57])
DIS56	trimf(x,[54 56 58])
DIS57	trimf(x,[55 57 59])
DIS58	trimf(x,[56 58 60])
DIS59	trimf(x,[57 59 61])
DIS60	trimf(x,[58 60 62])
DIS61	trimf(x,[59 61 63])
DIS62	trimf(x,[60 62 64])
DIS63	trimf(x,[61 63 65])
DIS64	trimf(x,[62 64 66])
DIS65	trimf(x,[63 65 67])
DIS66	trimf(x,[64 66 68])
DIS67	trimf(x,[65 67 69])
DIS68	trimf(x,[66 68 70])
DIS69	trimf(x,[67 69 71])
DISPAS	trimf(x,[68 70 72])

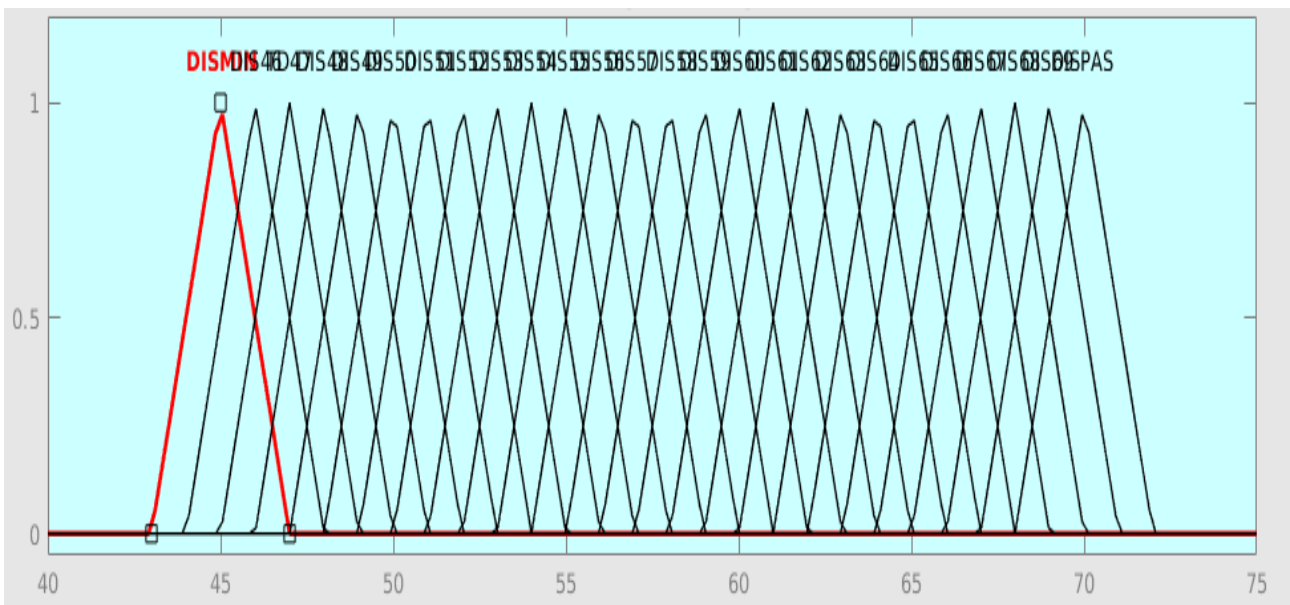


Figura 6.3: Variable difusa SPDIST. Fuente: Propia

### Consigna de la bomba de retorno

La bomba de retorno juega un papel primordial en todo sistema de agua caliente sanitaria centralizado. A diferencia de los sistemas de ACS que disponen las viviendas con un calentador eléctrico o a gas, los sistemas centralizados deben mantener constantemente la recirculación del agua para mantener el confort de la instalación, disponer de agua caliente en el momento que se abra el grifo. Al igual que la variable anterior, el caudal de retorno afecta a la temperatura del depósito, el retorno que fijemos en nuestro sistema será directamente proporcional a la razón de enfriamiento del tanque de acumulación.

Como se ha mencionado anteriormente, las variables dependen de los elementos físicos presentes en la instalación tales como bombas, válvulas y tuberías. En la instalación que nos encontramos simulando, las bombas de retorno presentan un caudal máximo de  $6.6 \text{ m}^3/h$ . Con esta información y conociendo la repercusión que tiene la modificación del caudal de retorno sobre la instalación, las tablas 6.5 y 6.6 muestran las características de la variable difusa.

Tabla 6.5: Punto de consigna del caudal de retorno

Característica	Valor
Nombre de la variable	SPRET
Universo de discurso	[0 6.6]
Valores lingüísticos	SPRETNULO,SPRETB,SPRETMB,SPRETM,SPRETMA,SPRETA,SPRETMAX

Donde los valores lingüísticos son:

- SPRETNULO: Caudal de retorno nulo.
- SPRETB: Caudal de retorno bajo.
- SPRETMB: Caudal de retorno medio bajo.
- SPRETM: Caudal de retorno medio.
- SPRETMA: Caudal de retorno medio alto.
- SPRETA: Caudal de retorno alto.
- SPRETMAX: Caudal de retorno máximo.

Tabla 6.6: Variable: SPDIST. Valor lingüístico/Regla semántica

Valor lingüístico	Regla semántica
SPRETNULO	trapmf(x,[-1.47 -0.0471 1.56 1.66])
SPRETB	trimf(x,[1.624 1.844 2.084])
SPRETMB	trapmf(x,[1.891 2.07 2.63 2.88])
SPRETM	trimf(x,[2.68 3.3 3.94])
SPRETMA	trapmf(x,[3.80 3.98 4.63 4.81])
SPRETA	trapmf(x,[4.725 4.94 5.61 5.82])
SPRETMAX	trimf(x,[5.729 5.929 6.93 9.174])

trapmf: función de pertenencia de tipo trapezoidal

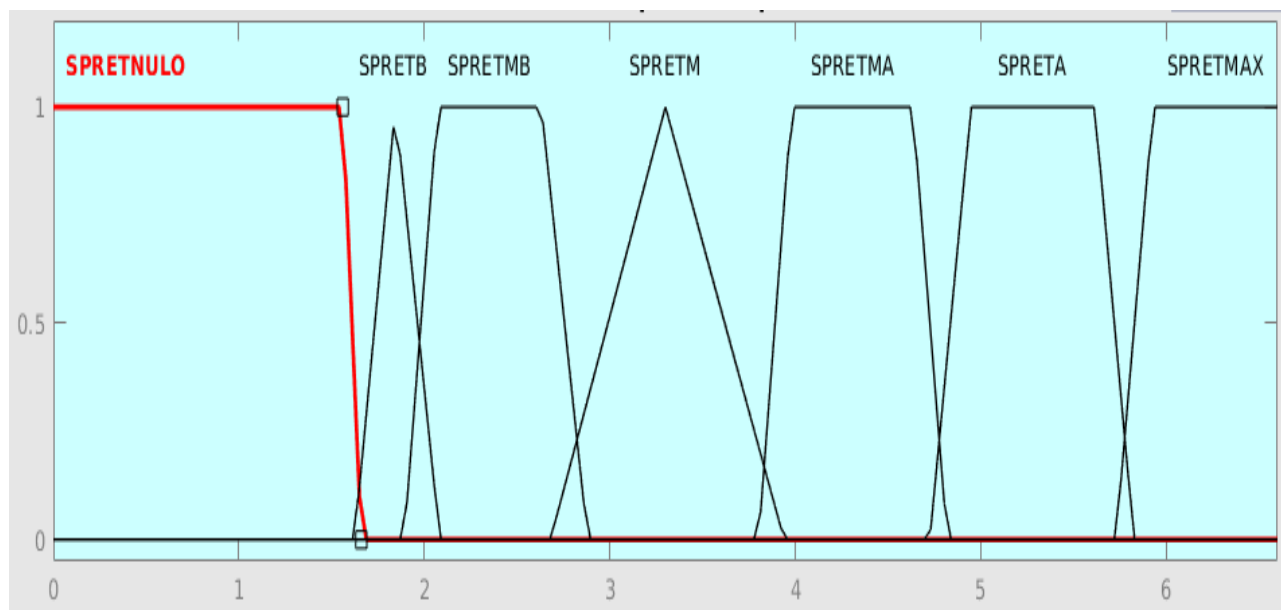


Figura 6.4: Variable difusa SPDIST. Fuente: Propia

### Consigna de la bomba de calor

La bomba de calor será nuestro dispositivo generador de energía térmica, bien podría ser una caldera. Toda la gestión de los puntos de consigna de la instalación de ACS será con el fin de evitar, en la medida de lo posible, generar energía térmica que no vaya a ser utilizada, y por tanto desperdiciada, ahí es donde reside nuestro principal objetivo, en reducir las horas/año de trabajo del dispositivo generador de calor, pues como se ha visto, la energía que consume el mismo representa el 90% de la total consumida.

Tabla 6.7: Punto de consigna de la bomba de calor

Característica	Valor
Nombre de la variable	SPBC
Universo de discurso	[52 82]
Valores lingüísticos	BCMIN, BC60, ..., BC76, BCMAX



Tabla 6.8: Variable: SPBC. Valor lingüístico/Regla semántica

Valor lingüístico	Regla semántica
BCMIN	trapmf(x,[42.8 50.6 54.9 55.25])
BC60	trimf(x,[58 60 62])
BC61	trimf(x,[59 61 63])
BC62	trimf(x,[60 62 64])
BC63	trimf(x,[61 63 65])
BC64	trimf(x,[62 64 66])
BC65	trimf(x,[63 65 67])
BC66	trimf(x,[64 66 68])
BC67	trimf(x,[65 67 69])
BC68	trimf(x,[66 68 70])
BC69	trimf(x,[67 69 70])
BC70	trimf(x,[68 70 71])
BC71	trimf(x,[69 71 72])
BC72	trimf(x,[70 72 73])
BC73	trimf(x,[71 73 74])
BC74	trimf(x,[72 74 75])
BC75	trimf(x,[73 75 76])
BC76	trimf(x,[74 76 77])
BCMAX	trapmf(x,[78.72 79.56 83.22 93.34])

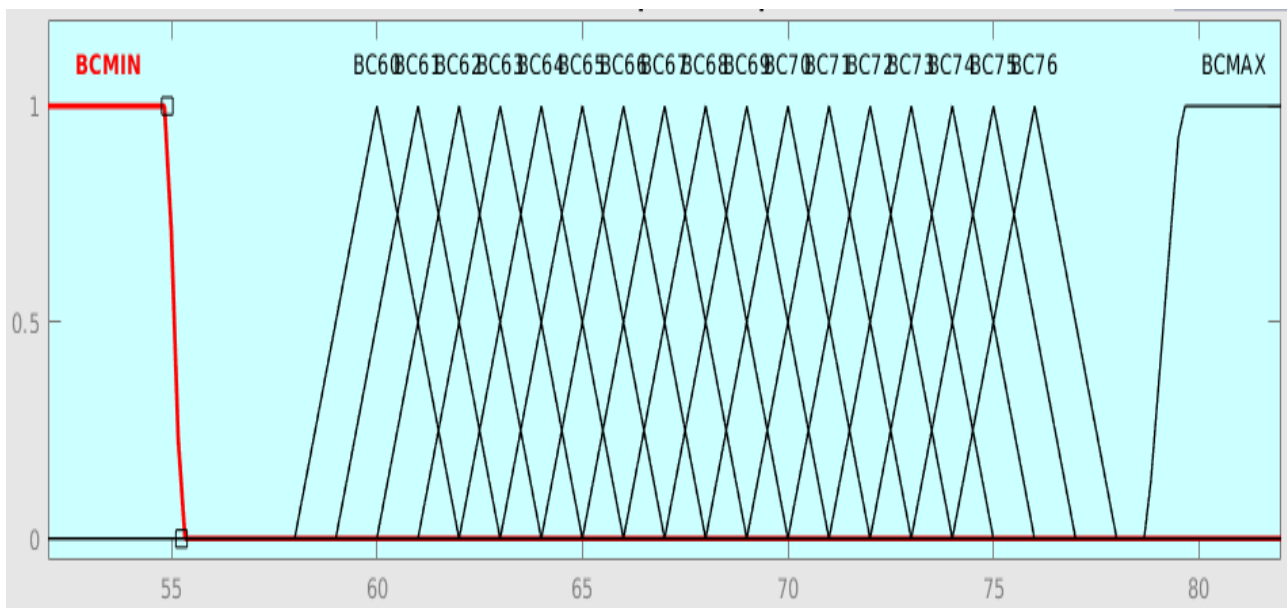


Figura 6.5: Variable difusa SPBC. Fuente: Propia

### Consigna de la válvula de 3 vías del primario

La válvula de 3 vías controla el caudal de agua que circula por el circuito primario del intercambiador de calor de cada subestación de producción. La misma dejará fluir más o menos agua caliente por el circuito primario en función de la consigna de temperatura que se le fije al depósito de acumulación. Esta variable fue creada pues, en muchos casos prácticos una misma fuente de calor (caldera/bomba de calor) suministra a varios circuitos secundarios de calentamiento, cada uno de estos circuitos puede tener su demanda particular de agua en un instante determinado, por tanto en ocasiones hay circuitos que necesitarán calentamiento mientras que otros

en cambio no. Además, como fue demostrado en el capítulo anterior, un flujo máximo no siempre representa menor tiempo de calentamiento, hay otros factores que influyen en el mismo como son el tipo y características del intercambiador de calor utilizado así como el caudal que está fluyendo por el circuito secundario del mismo.

Tabla 6.9: Punto de consigna de la válvula de 3 vías del primario

Característica	Valor
Nombre de la variable	SPV3V
Universo de discurso	[0 11]
Valores lingüísticos	V3VMIN, V3VB, V3VMB, V3VM, V3VMA, V3VA, V3VXXA, V3VMAX

Donde los valores lingüísticos son:

- V3VMIN: Caudal de primario mínimo.
- V3VB: Caudal de primario bajo.
- V3VMB: Caudal de primario medio bajo.
- V3VM: Caudal de primario medio.
- V3VMA: Caudal de primario medio alto.
- V3VXXA: Caudal de primario muy alto.
- V3VMAX: Caudal de primario máximo.

Tabla 6.10: Variable: SPV3V. Valor lingüístico/Regla semántica

Valor lingüístico	Regla semántica
V3VMIN	trapmf(x,[0 0.152 1.404 1.55])
V3VB	trapmf(x,[1.546 1.81 2.83 3.08])
V3VMB	trapmf(x,[2.958 3.29 4.28 4.65])
V3VM	trimf(x,[4.33 5.0 5.8])
V3VMA	trapmf(x,[5.469 5.75 6.87 7.1])
V3VA	trapmf(x,[6.959 7.1 8.39 8.56])
V3VXXA	trapmf(x,[8.43 8.67 9.77 9.94])
V3VMAX	trapmf(x,[9.85 9.9 11.4 15.2])

Esta es la última de las variables que cierra el apartado de “Variables de salida”, como fue mencionado, estas variables eran intuitivas a la hora de su elección pues tenían un efecto directo sobre el proceso. A continuación, el siguiente apartado tratará acerca de las “Variables de entrada” al sistema de gestión.

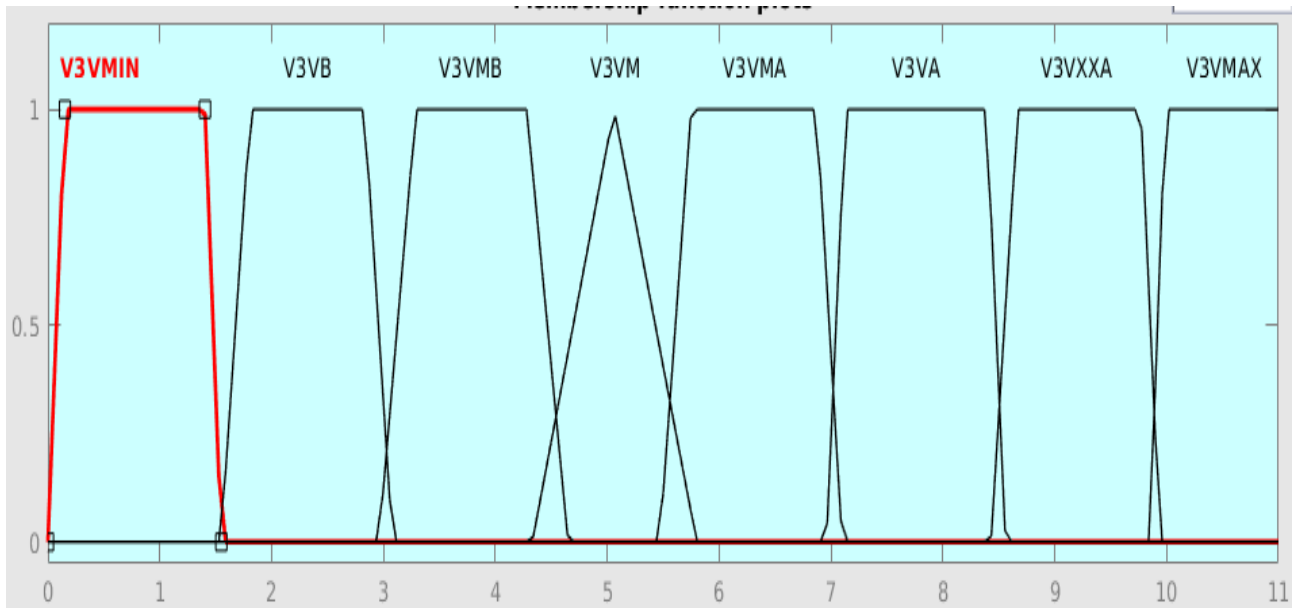


Figura 6.6: Variable difusa SPV3V. Fuente: Propia

### 6.2.2. Variables de entrada al sistema

En esta sección se realizará la elección del conjunto de variables de entrada. Dicho conjunto de variables es muy importante pues debe ser el menor posible por razones de carga computacional. Igualmente, la lectura de este conjunto de variables debe ser capaz de informarnos en todo momento el estado actual de la instalación. Conociendo esta lectura, el sistema será capaz de inferir hacia que punto de operación desplazarse, y ejecutarlo.

#### Hora del día

La variable hora del día se define como variable de entrada, es de suma importancia en el sistema de gestión pues el mismo toma las decisiones basándose principalmente en franjas horarias(aunque no el 100 definidas previamente por el experto según sea el patrón de consumo que tiene el sitio donde es aplicado. Muy pocas instalaciones sólo brindan servicio de agua caliente sanitaria en el horario diurno, es por ello que en la variable se contemplaron las 24 horas del día pues como ha venido comentándose se pretende diseñar un mecanismo de decisión lo más general posible. Aquellas instalaciones que brindan 24 horas de servicio(residencias y hospedajes) en su gran mayoría tienen los mayores picos de demanda organizados en franjas horarias, las mismas suelen ser dos, en el horario de la mañana y el de la tarde, de aquí nace la cantidad de conjuntos difusos de la variable, sus valores lingüísticos y su significado físico el cual se detalla en la siguiente lista:

Tabla 6.11: Hora del día

Característica	Valor
Nombre de la variable	HORA
Universo de discurso	[0 23]
Valores lingüísticos	SSMAD, PREPMAT, SMAT, SSVES, SVES, SSNOG

Donde los valores lingüísticos son:

- SSMAD: Sin servicio durante la madrugada.
- PREPMAT: Preparación para el servicio matutino.
- SMAT: Servicio matutino.

- SSVES: Sin servicio durante el horario vespertino.
- SVES: Servicio vespertino.
- SSNOC: Sin servicio durante horario nocturno.

Tabla 6.12: Variable: HORA. Valor lingüístico/Regla semántica

Valor lingüístico	Regla semántica
SSMAD	$\text{sigmf}(x,[-11.6 \ 5.58])$
PREPMAT	$\text{gauss2mf}(x,[0.156 \ 5.75 \ 0.152 \ 6.88])$
SMAT	$\text{gauss2mf}(x,[0.183 \ 7.36 \ 0.257 \ 9.036])$
SSVES	$\text{gauss2mf}(x,[0.26 \ 9.60 \ 0.635 \ 18.5])$
SVES	$\text{gauss2mf}(x,[0.368 \ 19.5 \ 0.604 \ 21.49])$
SSNOC	$\text{sigmf}(x,[11.86 \ 22.11])$

sigmf: función de pertenencia de tipo sigmoidal  
 gauss2mf: función de pertenencia de tipo gaussiana

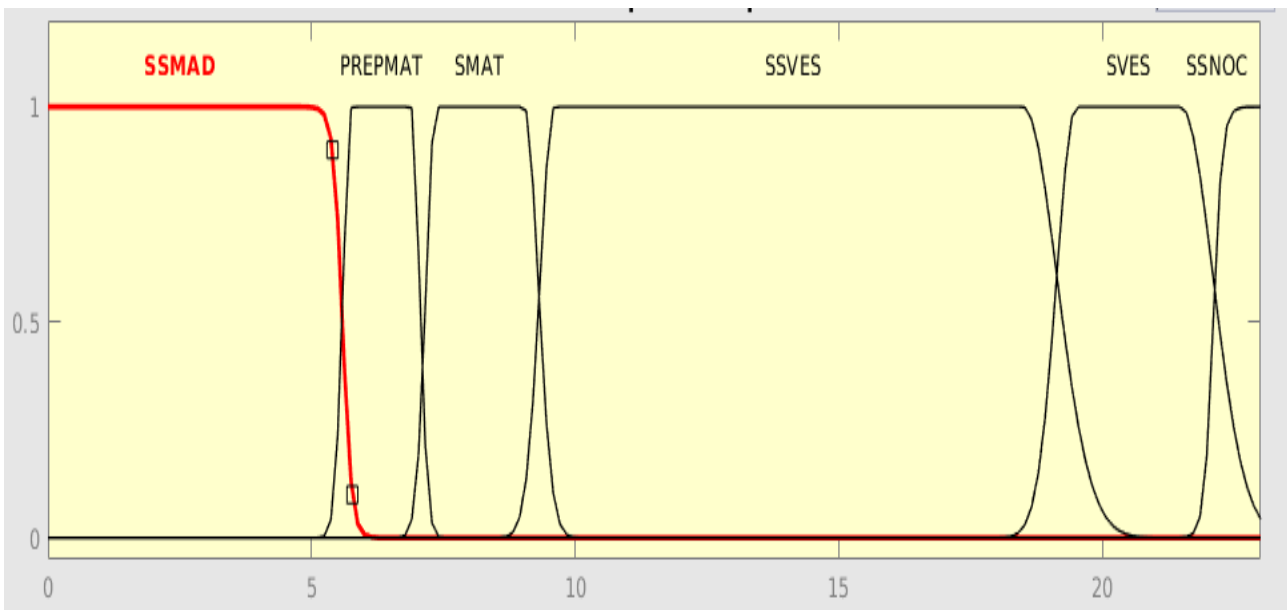


Figura 6.7: Variable difusa HORA. Fuente: Propia

### Consumo instantáneo

La variable consumo instantáneo se define igualmente como variable de entrada. En la definición de la variable anterior se dijo que el sistema de gestión toma decisiones principalmente(aunque no siempre) en la franja horaria que se estudia. Existen cierto tipo de instalaciones donde el consumo de agua caliente sanitaria no sigue un patrón fijo y por tanto predecible como podría ser en polideportivos u hoteles urbanos de negocios. Este perfil particular de consumo puede verse en algunos hoteles vacacionales litorales, es por ello que tenemos en cuenta el consumo instantáneo de la instalación para lo que vendría a denominarse eventos no programados en donde habría que cubrir una demanda que en un principio no estaba prevista.

Tabla 6.13: Consumo instantáneo

Característica	Valor
Nombre de la variable	CONSV1
Universo de discurso	[0 2]
Valores lingüísticos	CB, CMB, CM, CMA, CA

Donde los valores lingüísticos son:

- CB: Consumo bajo.
- CMB: Consumo medio bajo.
- CM: Consumo medio.
- CMA: Consumo medio alto.
- CA: Consumo alto.

Tabla 6.14: Variable: HORA. Valor lingüístico/Regla semántica

Valor lingüístico	Regla semántica
CB	$\text{sigmf}(x, [-79.5 \ 0.218])$
CMB	$\text{trapmf}(x, [0.22 \ 0.25 \ 0.62 \ 0.68])$
CM	$\text{trapmf}(x, [0.64 \ 0.70 \ 1.08 \ 1.15])$
CMA	$\text{trapmf}(x, [1.10 \ 1.14 \ 1.53 \ 1.60])$
CA	$\text{sigmf}(x, [106.5 \ 1.588])$

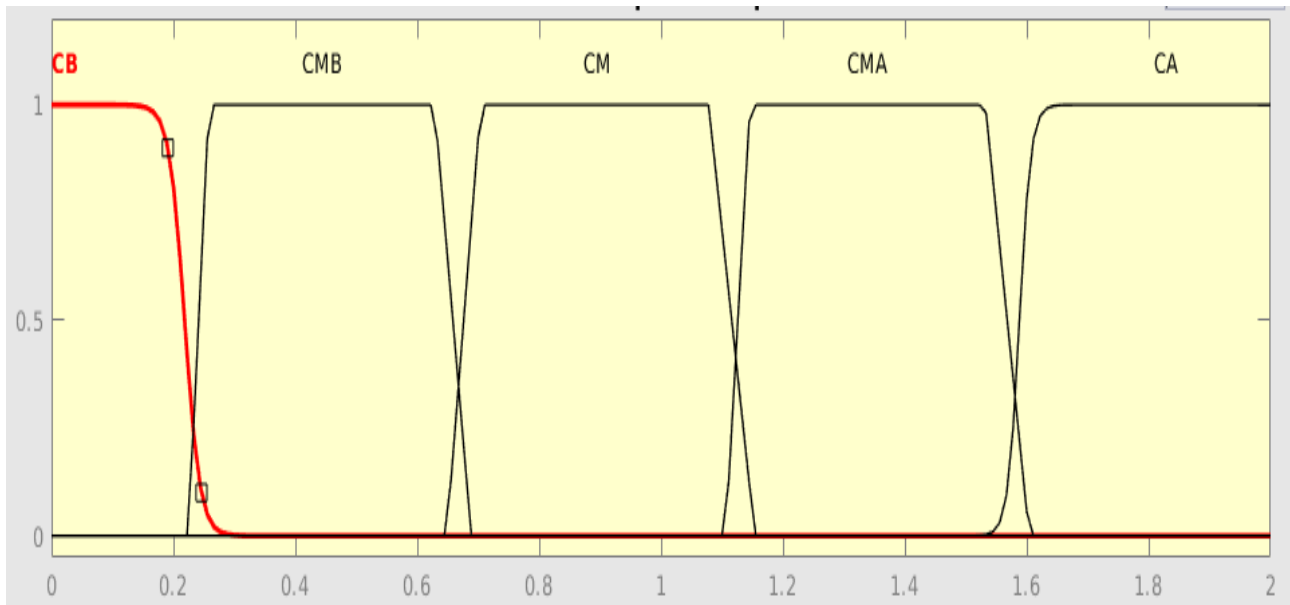


Figura 6.8: Variable difusa CONSV1. Fuente: Propia

### Error entre el punto de consigna y la variable del proceso

La variable de error es necesaria introducirla para conocer en todo momento cuán alejada se encuentra la temperatura del depósito de la consigna fijada. Esto se realiza pues tanto las consignas del depósito como las

histéresis cambian. Con esta variable por si sola el sistema es incapaz de inferir el estado de la instalación, pero cuando se combina con el resto brinda información muy importante.

Tabla 6.15: Error

Característica	Valor
Nombre de la variable	ERRORV1
Universo de discurso	[-5 5]
Valores lingüísticos	ENG, ENM, ENP, EZ, EPP, EPM, EPG

Donde los valores lingüísticos son:

- ENG: Error negativo grande.
- ENM: Error negativo medio.
- ENP: Error negativo pequeño.
- EZ: Error cero.
- EPP: Error positivo pequeño.
- EPM: Error positivo medio.
- EPG: Error positivo grande.

Tabla 6.16: Variable: ERRORV1. Valor lingüístico/Regla semántica

Valor lingüístico	Regla semántica
ENG	trapmf(x,[-12.1 -11 -1.852 -1.68])
ENM	trapmf(x,[-1.84 -1.73 -0.70 -0.51])
ENP	trapmf(x,[-0.70 -0.5 -0.247 -0.05])
EZ	trimf(x,[-0.2 0 0.2])
EPP	trapmf(x,[0.05 0.247 0.5 0.70])
EPM	trapmf(x,[0.51 0.70 1.73 1.87])
EPG	trapmf(x,[1.68 1.85 11 12.1])

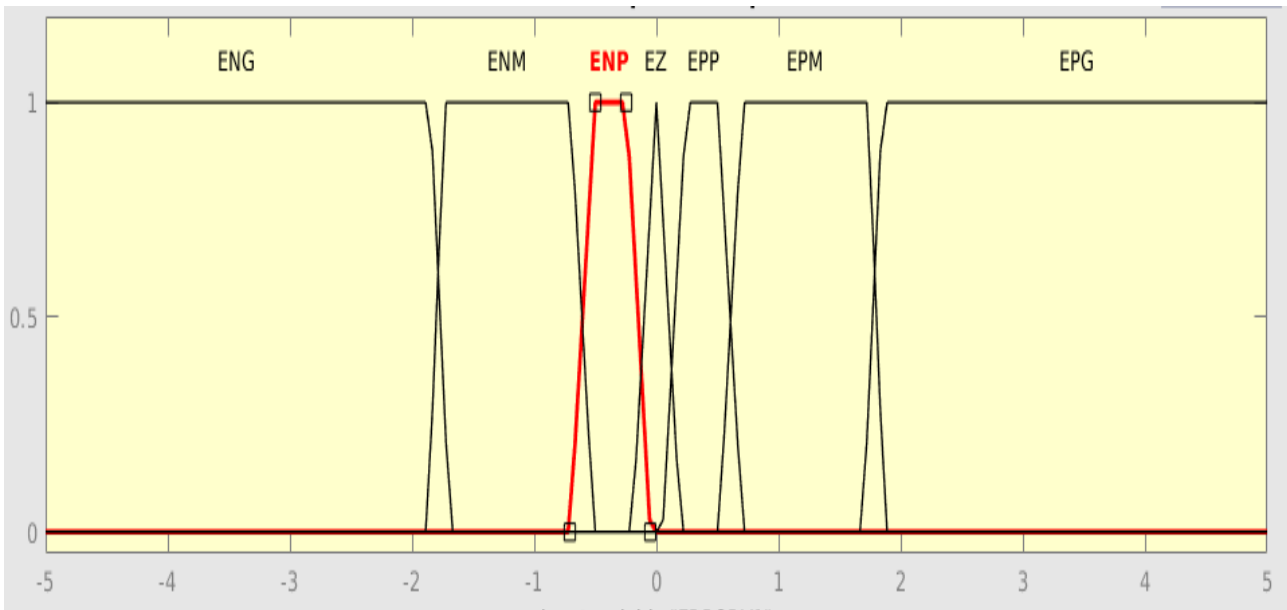


Figura 6.9: Variable difusa ERRORV1. Fuente: Propia

### Rango de temperaturas del depósito

Esta es la cuarta y última variable de entrada. No es imprescindible conocer exactamente la temperatura a la que se encuentra el depósito de acumulación en todo momento, pero sí el rango de temperaturas en el que se encuentra. Esta variable fue preciso añadirla al sistema de gestión porque cuando se realizaban cambios entre distintas franjas horarias (SMAT hacia SSVES ó SSMAD hacia PREPMAT) debido a la histéresis se necesitaba conocer el rango de temperaturas en el que se estaba moviendo el depósito, sólo con la variable de entrada del error no existía suficiente información para poder decidir.

Tabla 6.17: Rango de temperaturas del depósito

Característica	Valor
Nombre de la variable	DEPVILLA1
Universo de discurso	[42 70]
Valores lingüísticos	SSBAJO, SERVNORMAL, SSALTO

- SSBAJO: Sin servicio temperatura baja.
- SERVNORMAL: Durante servicio temperatura normal.
- SSALTO: Sin servicio temperatura alta.

Tabla 6.18: Variable: DEPVILLA1. Valor lingüístico/Regla semántica

Valor lingüístico	Regla semántica
SSBAJO	trapmf(x,[44.6 44.8 55.31 55.8])
SERVNORMAL	trapmf(x,[55.49 56 59.8 60.4])
SSALTO	trapmf(x,[59.92 60.34 63.58 64.26])

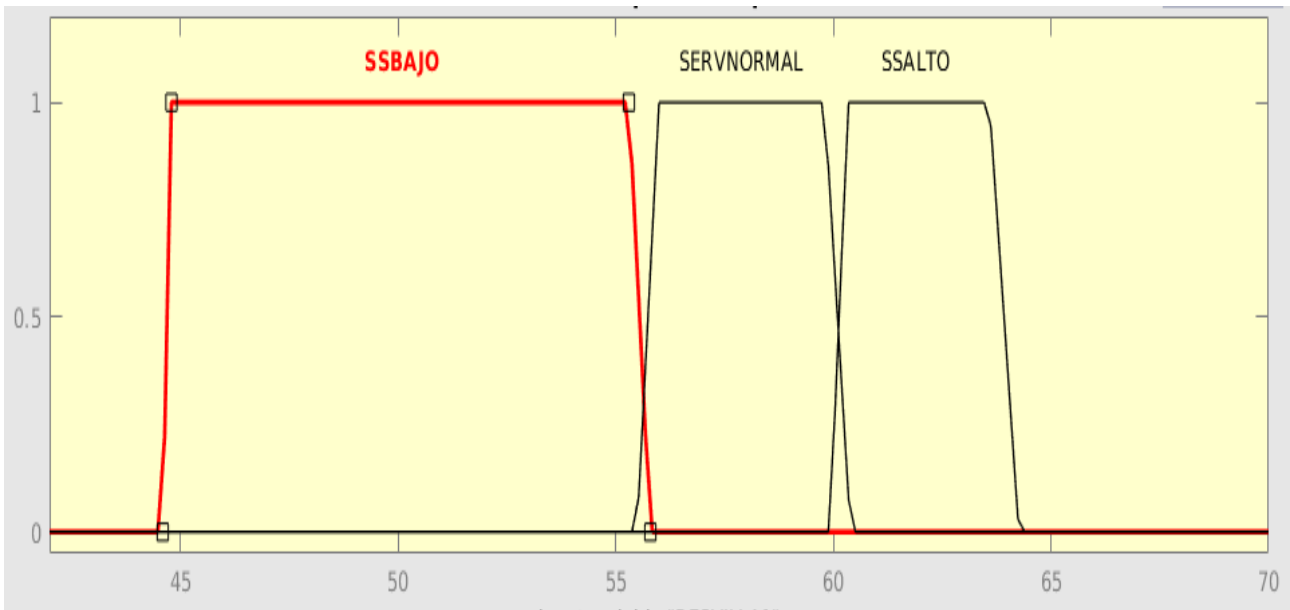


Figura 6.10: Variable difusa DEPVILLA1. Fuente: Propia

### 6.3. Generación de reglas del sistema de inferencia

Ya una vez definidas las variables de entrada y salida de nuestro sistema, se procede a establecer las reglas ENTONCES-SI que formarán el corazón del sistema de inferencia difuso. Este paso en el diseño del sistema de gestión debe realizarse con el conocimiento experto sobre la instalación, por tanto es evidente que cada instalación tendrá un conjunto de reglas que la definan exclusivamente. Ha quedado finalmente un sistema con cuatro variables de entrada y cinco variables de salida según se muestra a continuación.

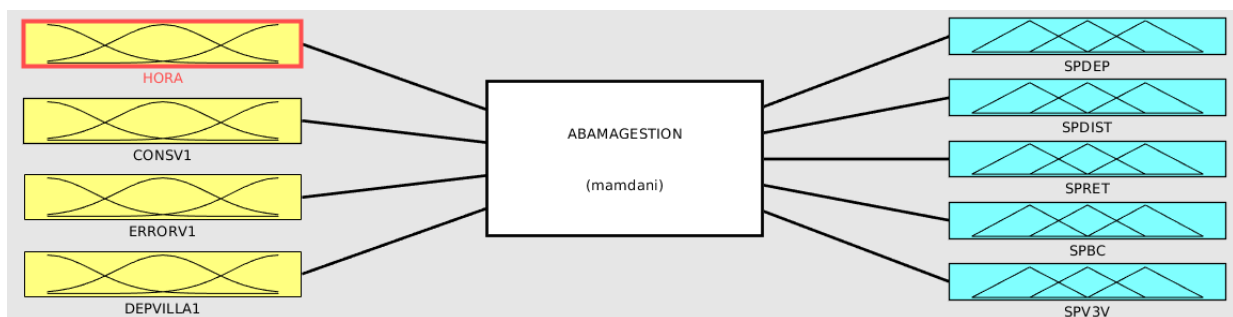
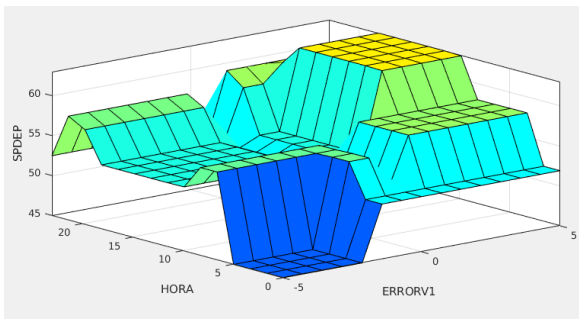


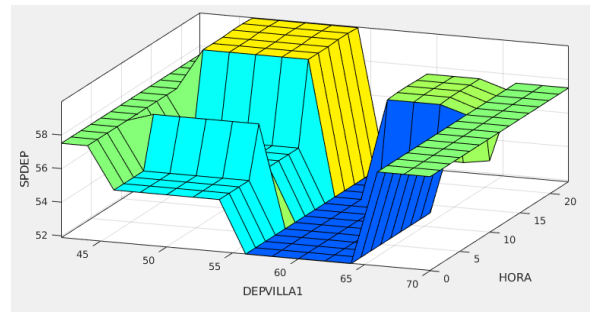
Figura 6.11: Esbozo del sistema de gestión difuso. Fuente: Propia

El sistema de gestión, para llevar a cabo la modificación según se ha establecido, de los puntos de consigna cuenta con un total de 74 reglas. Las mismas fueron establecidas basadas en información brindada por los técnicos de la instalación y en su mayoría por el conocimiento extraído de las simulaciones llevadas a cabo durante el estudio. Dichas reglas pueden comprobarse en la sección de Anexos de esta memoria. A continuación, se muestran las superficies de control resultantes de la definición de dichas reglas específicas para la instalación estudiada.





(a) X = HORA; Y = ERRORV1



(b) X = DEPVILLA1; Y = HORA

Figura 6.12: Superficies de control de la variable: SPDEP.

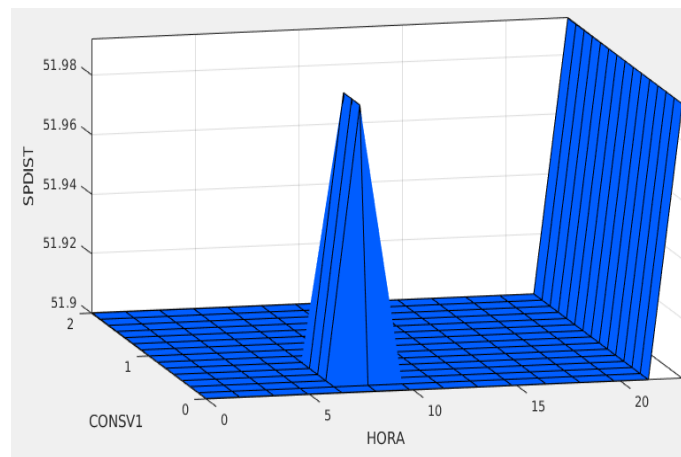


Figura 6.13: Superficie de control de la variable: SPDIST. Fuente: Propia

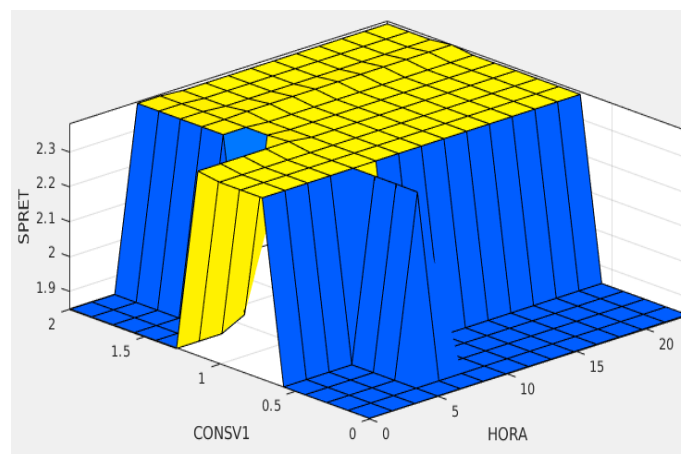
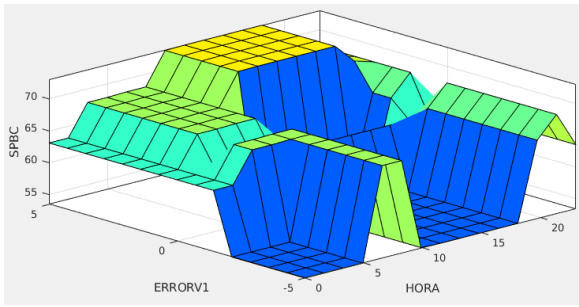
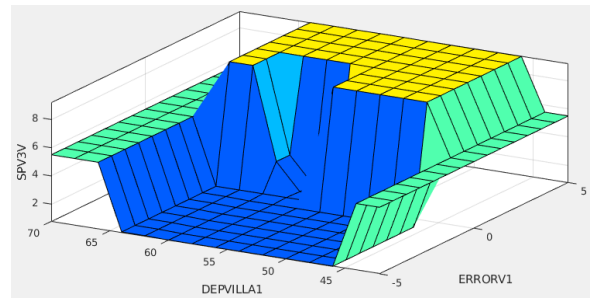


Figura 6.14: Superficie de control de la variable: SPRET. Fuente: Propia



(a) X = ERRORV1; Y = HORA



(b) X = DEPVILLA1; Y = ERRORV1

Figura 6.15: Superficies de control de las variable: SPBC(a) y SPV3V(b).

# Capítulo 7

## Resultados

En este último capítulo aplicaremos el sistema de gestión automatizado diseñado anteriormente al circuito de generación de agua caliente sanitaria de la simulación, para luego pasar a la instalación real. Los experimentos realizados durante esta etapa del proyecto fueron diseñados cuidadosamente y en estrecha coordinación con el equipo de ingeniería del Hotel Abama. El equipo técnico del centro estuvo pendiente en todo momento y a medida que las simulaciones iban arrojando resultados, los mismos les eran comunicados para que de manera paulatina los fuesen aplicando en la medida que le permitían las condiciones.

Las simulaciones realizadas fueron divididas en cinco bloques, pues la carga computacional que representaba el modelo difuso del controlador y el modelo de la planta al unísono era muy grande. Se decidió entonces realizar las simulaciones por bloques horarios según las franjas establecidas en el Capítulo 5. Los horarios escogidos para realizar las simulaciones fueron:

- Horario de madrugada.
- Transcurso del horario de madrugada a la preparación del servicio matutino.
- Horario vespertino donde no existe servicio.
- Horario de servicio vespertino.

El horario nocturno se dejó fuera de la simulación pues su comportamiento es muy similar a la franja horaria correspondiente a la madrugada, por ello se decide solamente plasmar uno de los dos. Junto a estas cuatro simulaciones se efectuará una quinta mostrando la respuesta del sistema ante un cambio en el caudal de consumo instantáneo de la instalación.

### 7.1. Resultados de las simulaciones

#### 7.1.1. Horario de madrugada

Las gráficas mostradas a continuación corresponden a la simulación efectuada durante el horario de madrugada. En todas las simulaciones se mostrarán el mismo número de gráficas, lo que varía como es lógico es el comportamiento de los puntos de consigna y del desempeño temporal del depósito de acumulación.

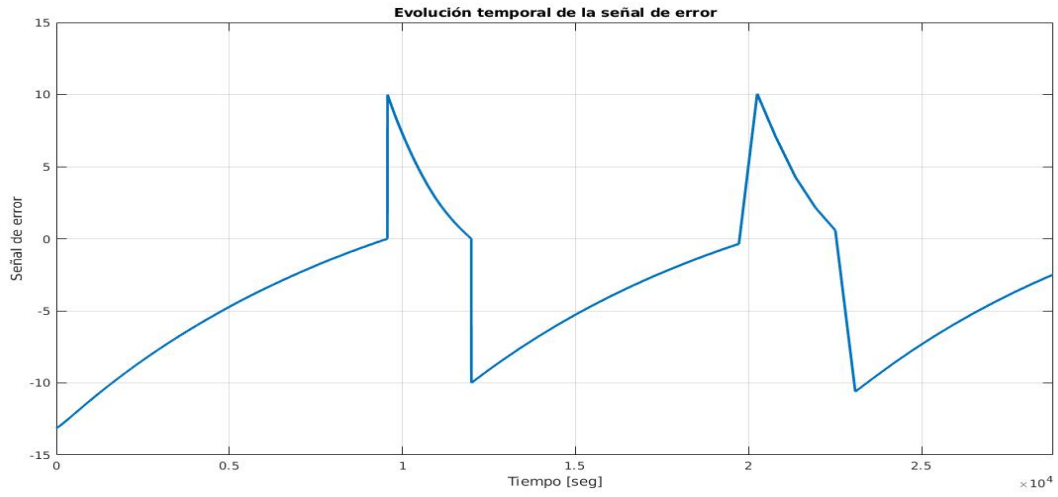


Figura 7.1: Evolución temporal de la señal de error. Simulación 1. Fuente: Propia

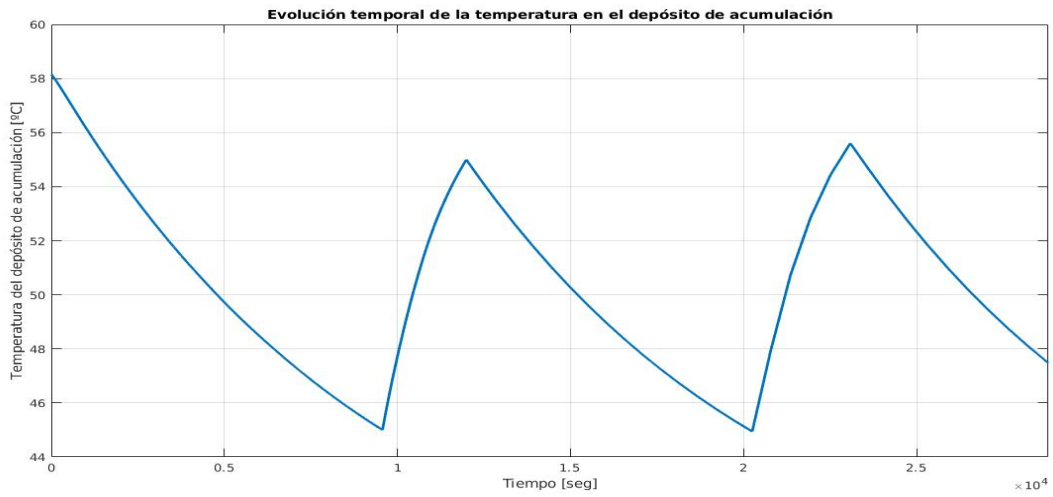


Figura 7.2: Evolución temporal de la temperatura dentro del depósito. Fuente: Propia

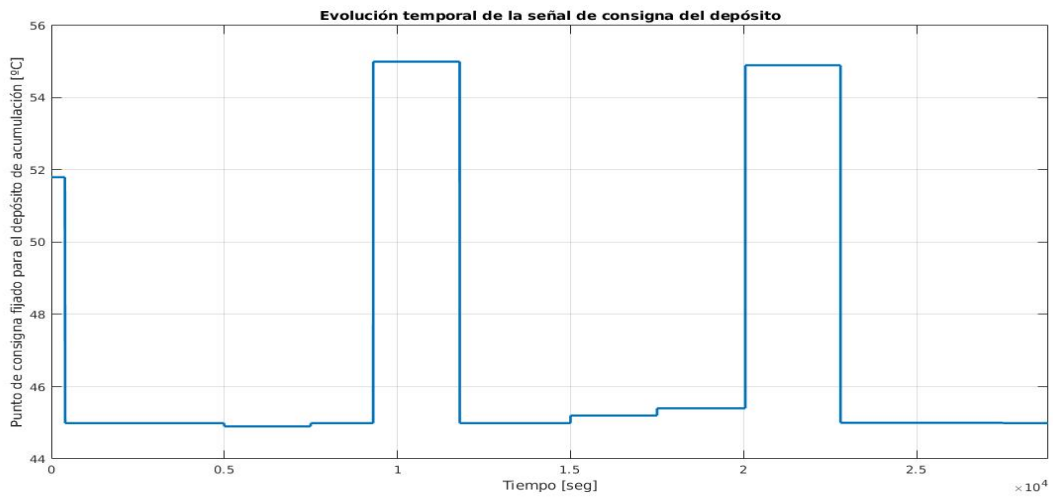


Figura 7.3: Evolución temporal de la consigna de temperatura del depósito. Fuente: Propia

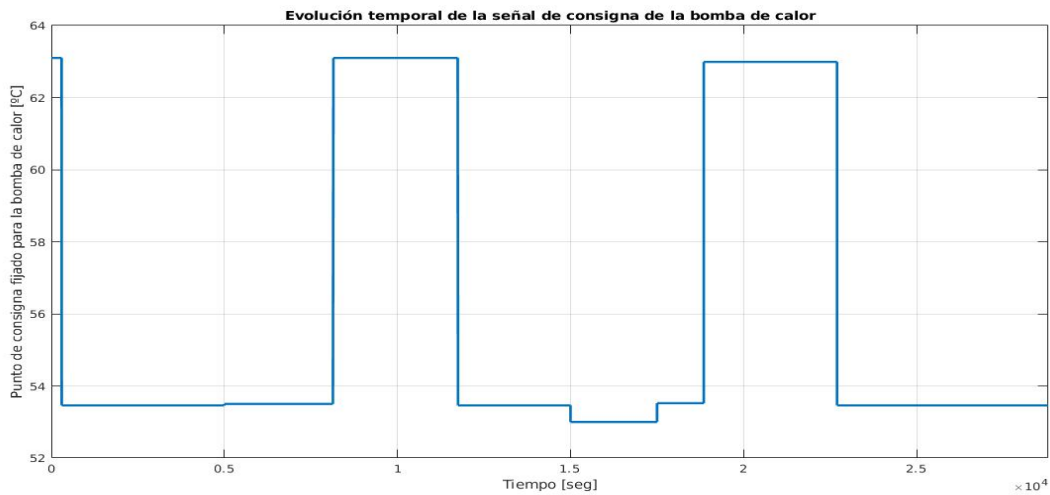


Figura 7.4: Evolución temporal de la consigna de la bomba de calor. *Fuente: Propia*

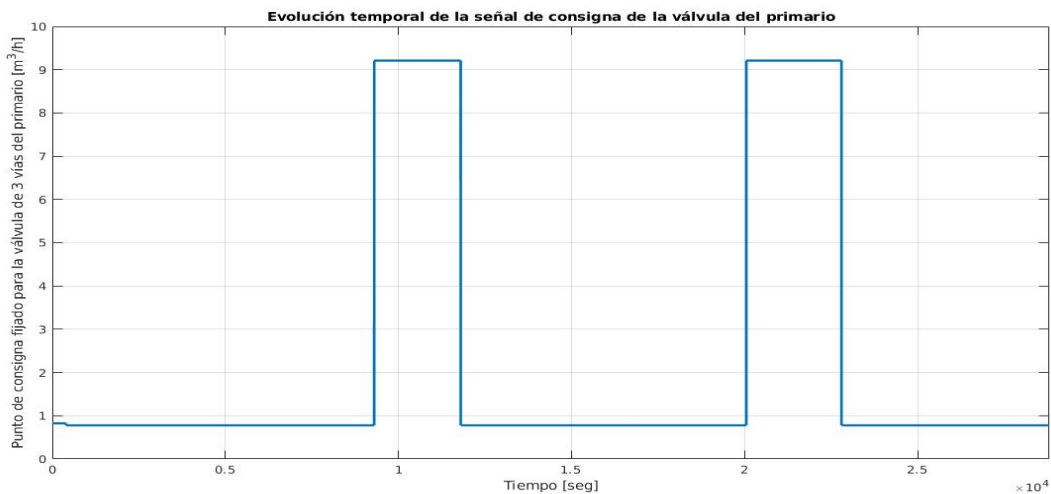


Figura 7.5: Evolución temporal de la consigna de la válvula de 3 vías del primario. *Fuente: Propia*

### 7.1.2. Transcurso del horario de madrugada a la preparación del servicio matutino.

Esta franja horaria fue elegida para evaluar el comportamiento del sistema cuando hay una transición entre un horario en el que el depósito se encuentra en “reposo” y otro horario en el que tiene que elevarse la temperatura del mismo para brindar un servicio dentro de poco tiempo. Este horario también tiene la particularidad que la bomba de calor debe preparar previamente la temperatura del circuito primario para luego transferir esa energía al circuito secundario.

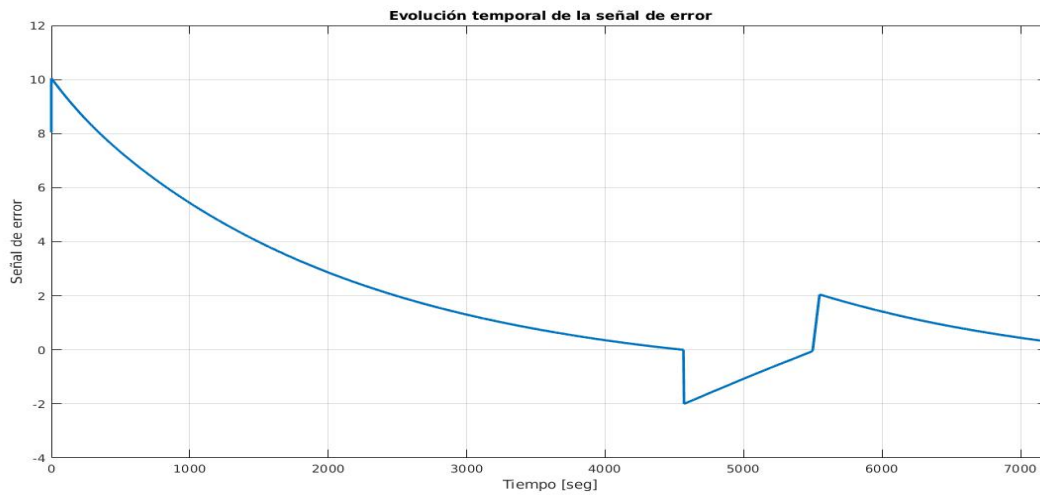


Figura 7.6: Evolución temporal de la señal de error. Simulación 2. Fuente: Propia

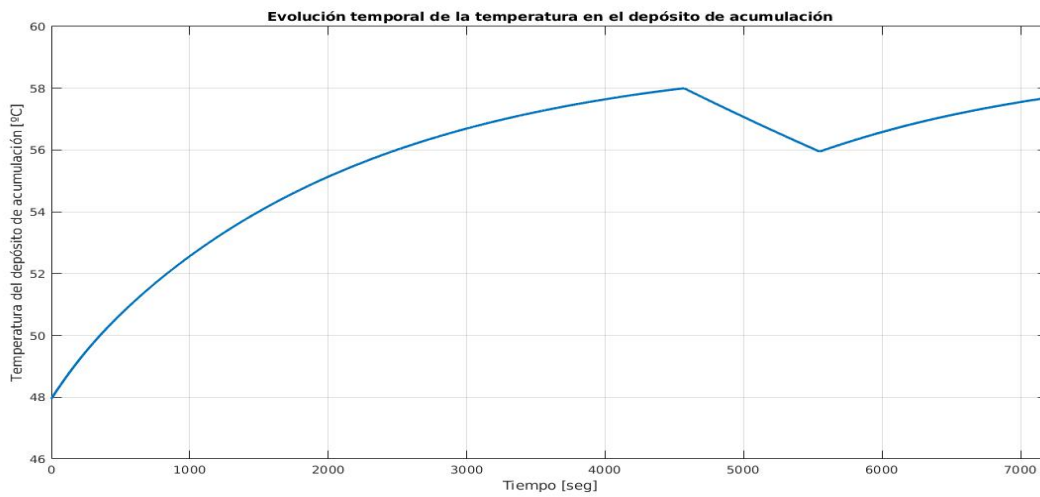


Figura 7.7: Evolución temporal de la temperatura dentro del depósito. Simulación 2. Fuente: Propia

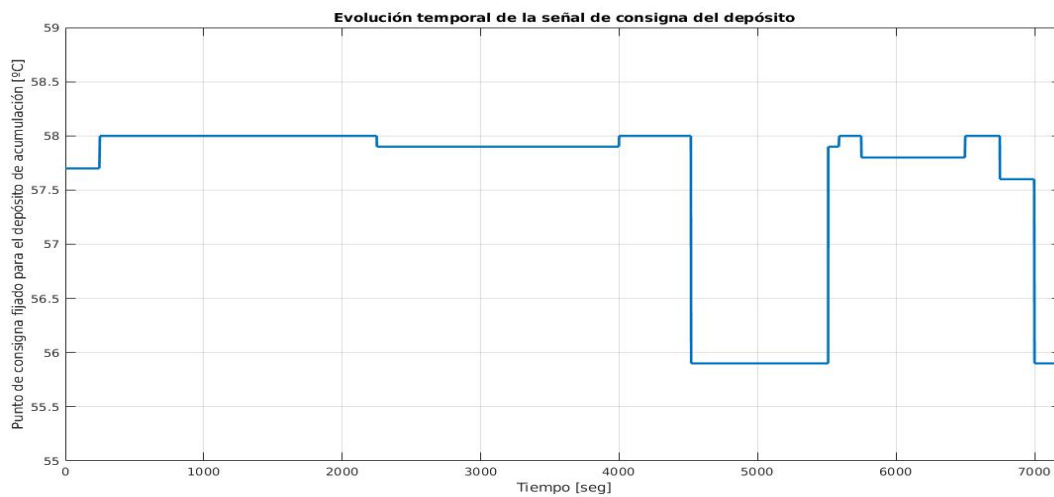


Figura 7.8: Evolución temporal de la consigna de temperatura del depósito. Simulación 2. Fuente: Propia

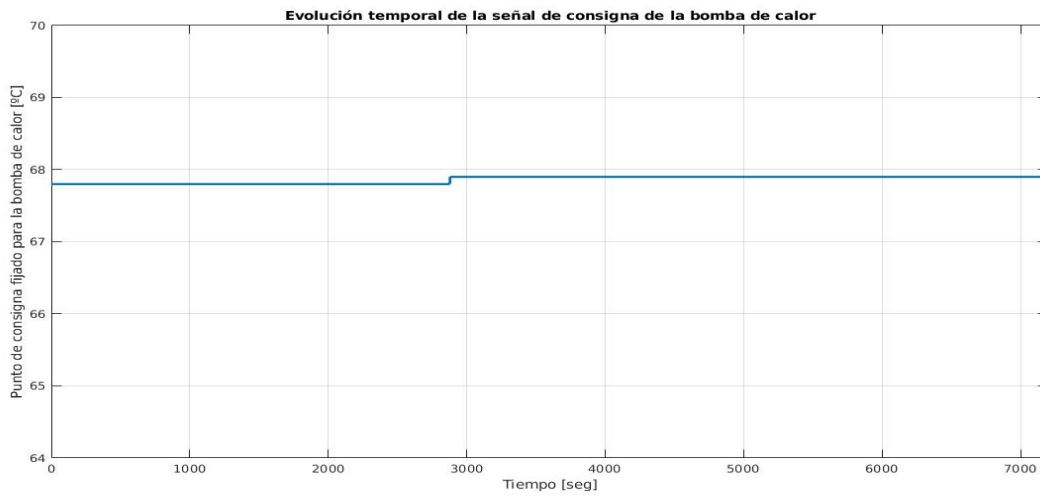


Figura 7.9: Evolución temporal de la consigna de la bomba de calor. Simulación 2. Fuente: Propia

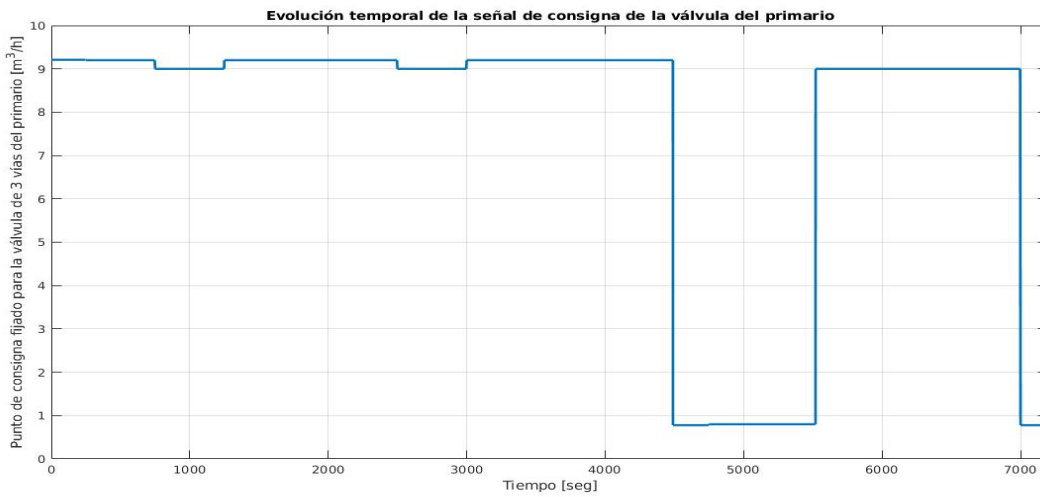


Figura 7.10: Evolución temporal de la consigna de la válvula de 3 vías del primario. Simulación 2. Fuente: Propia

### 7.1.3. Horario vespertino donde el consumo de la instalación es bajo

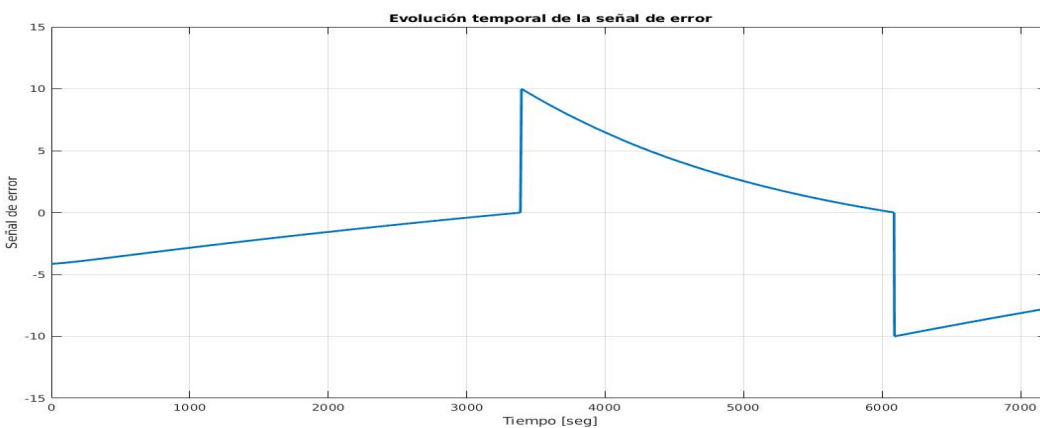


Figura 7.11: Evolución temporal de la consigna de la señal de error. Simulación 3. Fuente: Propia

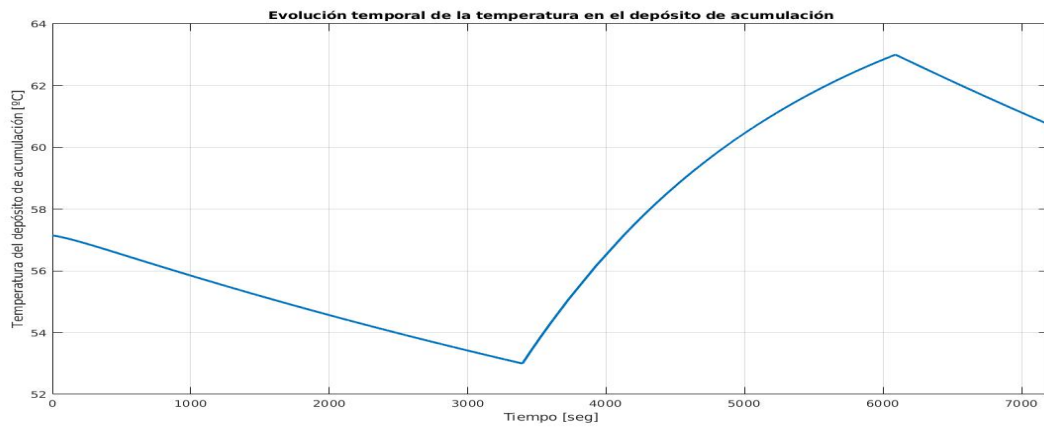


Figura 7.12: Evolución temporal de la temperatura dentro del depósito. Simulación 3. Fuente: Propia

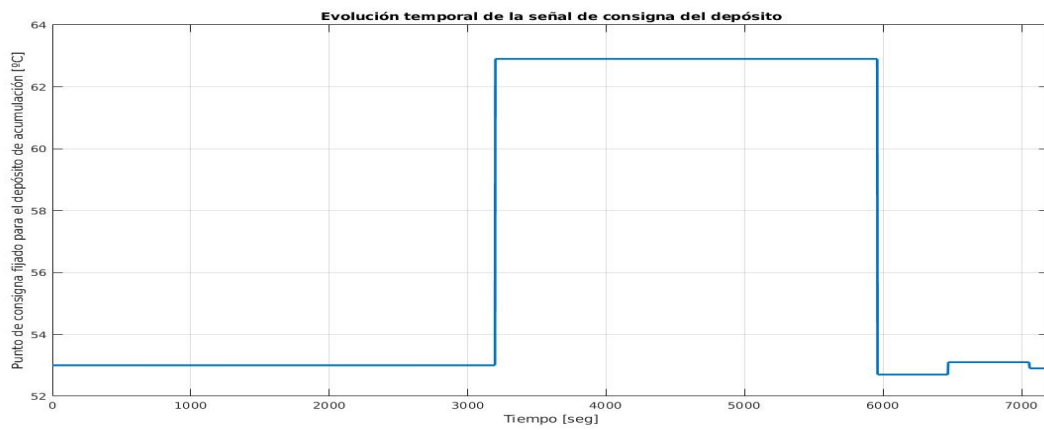


Figura 7.13: Evolución temporal de la consigna de temperatura del depósito. Simulación 3. Fuente: Propia

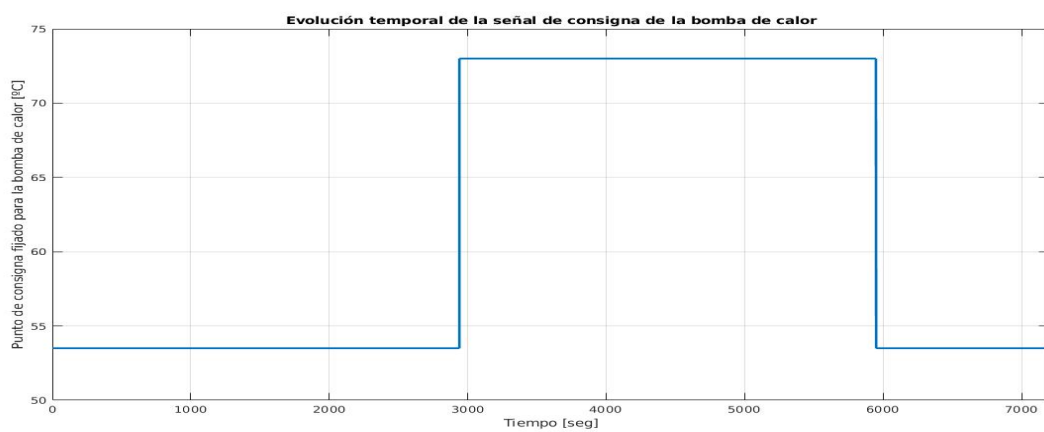


Figura 7.14: Evolución temporal de la consigna de la bomba de calor. Simulación 3. Fuente: Propia



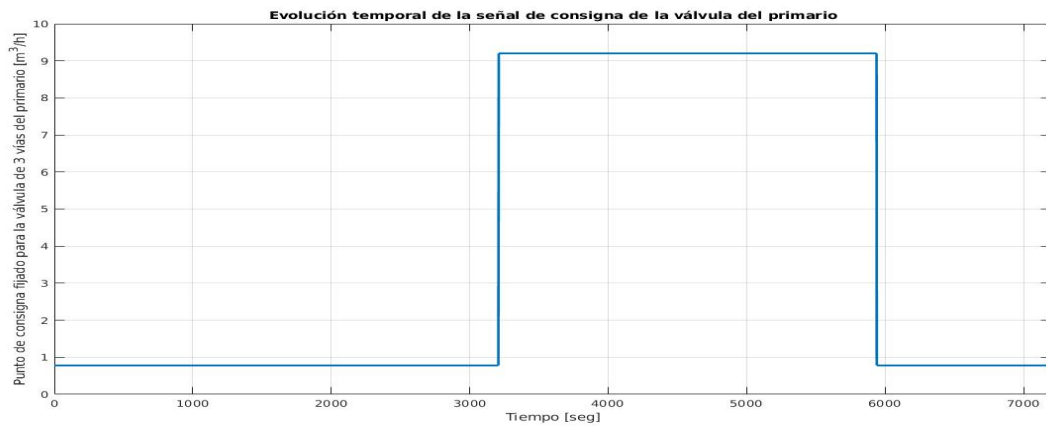


Figura 7.15: Evolución temporal de la consigna de la válvula de 3 vías del primario. Simulación 3. Fuente: Propia

#### 7.1.4. Horario de servicio vespertino

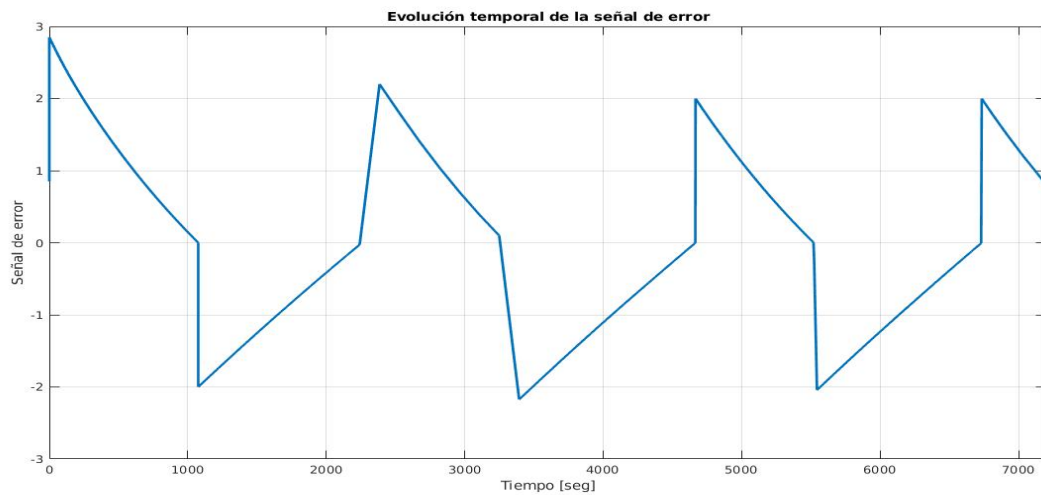


Figura 7.16: Evolución temporal de la señal de error. Simulación 4. Fuente: Propia

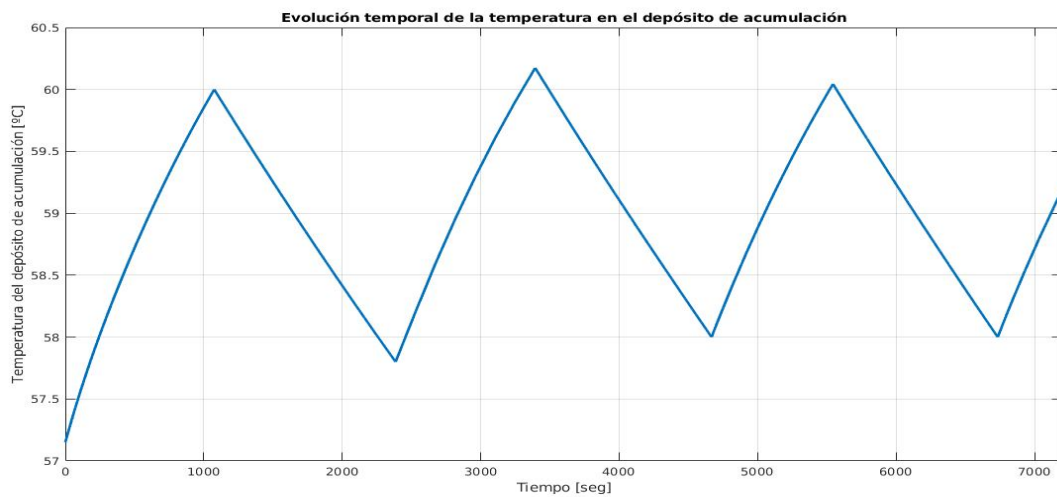


Figura 7.17: Evolución temporal de la señal de temperatura dentro del depósito. Simulación 4. Fuente: Propia

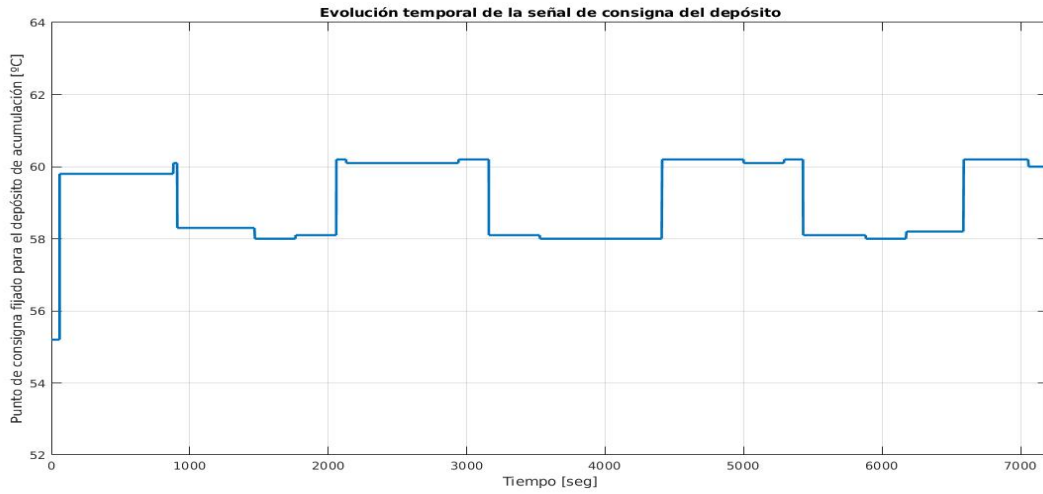


Figura 7.18: Evolución temporal de la consigna de temperatura del depósito. Simulación 4. Fuente: Propia

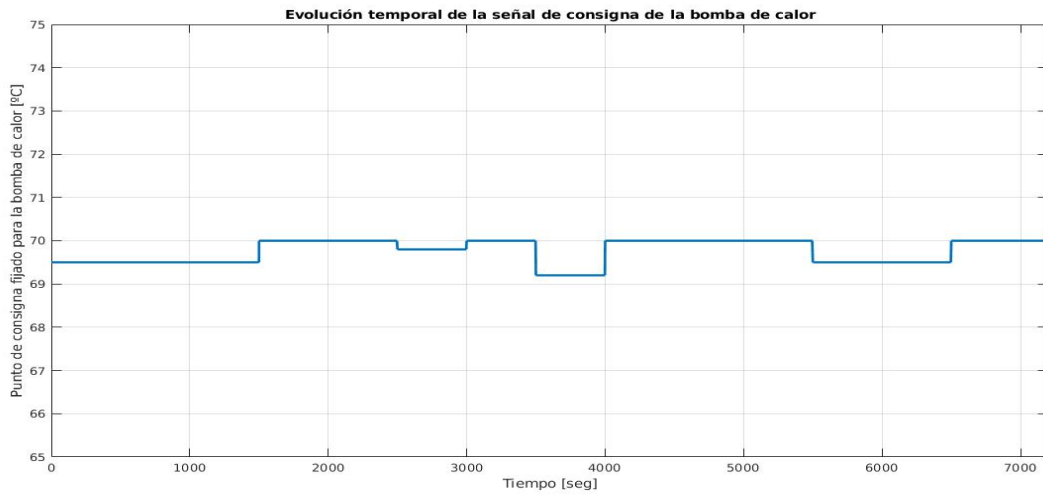


Figura 7.19: Evolución temporal de la consigna de la bomba de calor. Simulación 4. Fuente: Propia

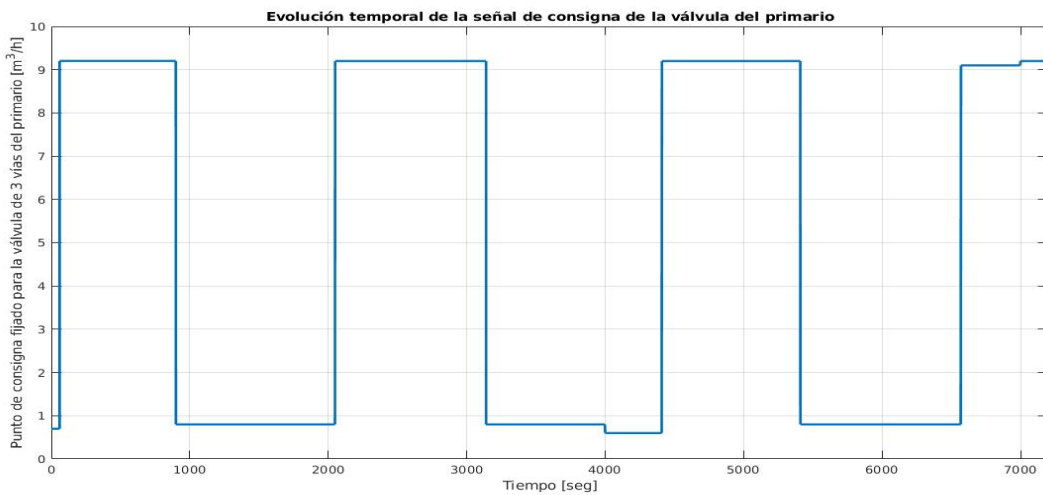


Figura 7.20: Evolución temporal de la consigna de la válvula de 3 vías del primario. Simulación 4. Fuente: Propia

Las simulaciones efectuadas anteriormente contemplan la relación que existe entre el consumo instantáneo y el incremento o decremento del caudal de retorno. Las mismas están relacionadas de una manera diferente a como lo hacen el quintento anteriormente mostrado. Seguidamente se muestra una simulación de la respuesta del sistema ante un cambio en el consumo instantáneo de la instalación.

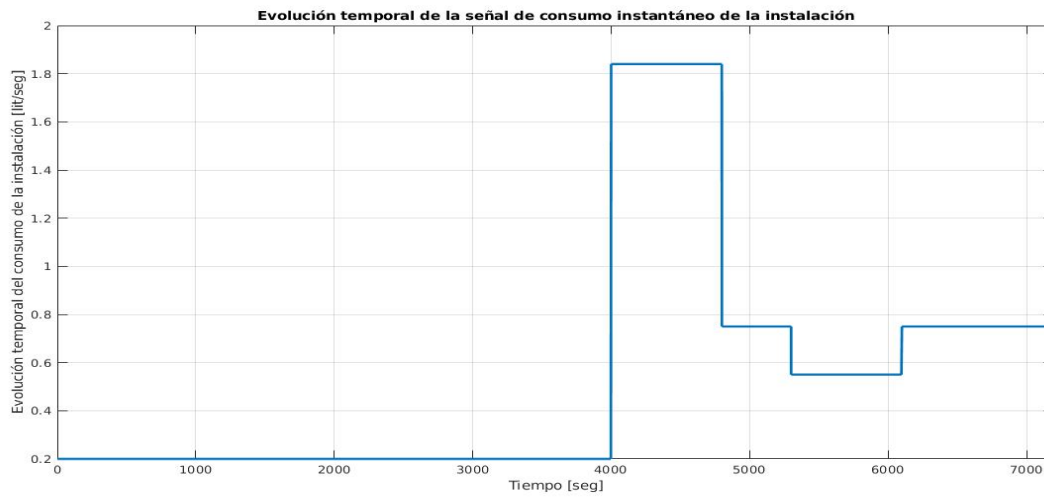


Figura 7.21: Evolución temporal del consumo instantáneo en la instalación. Simulación 5. Fuente: Propia

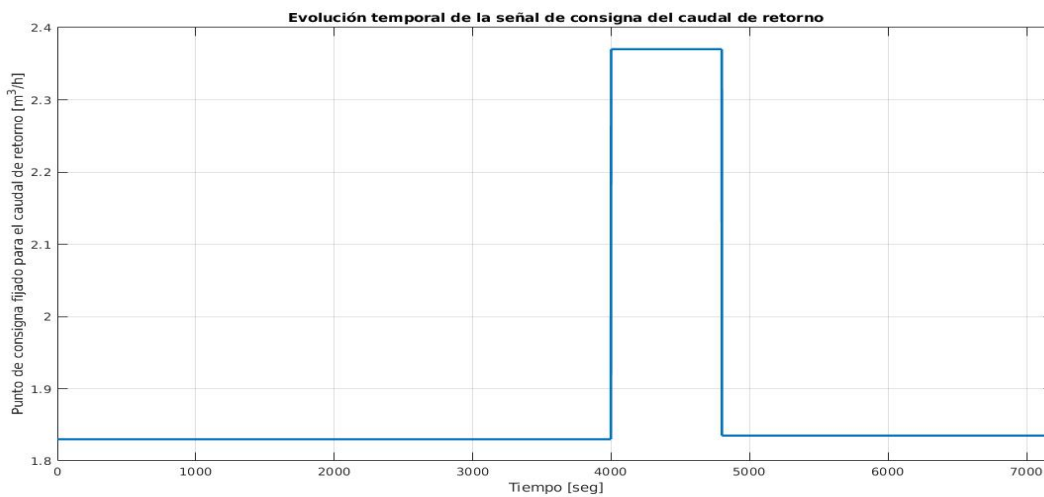


Figura 7.22: Evolución temporal de la consigna de caudal de retorno. Simulación 5. Fuente: Propia

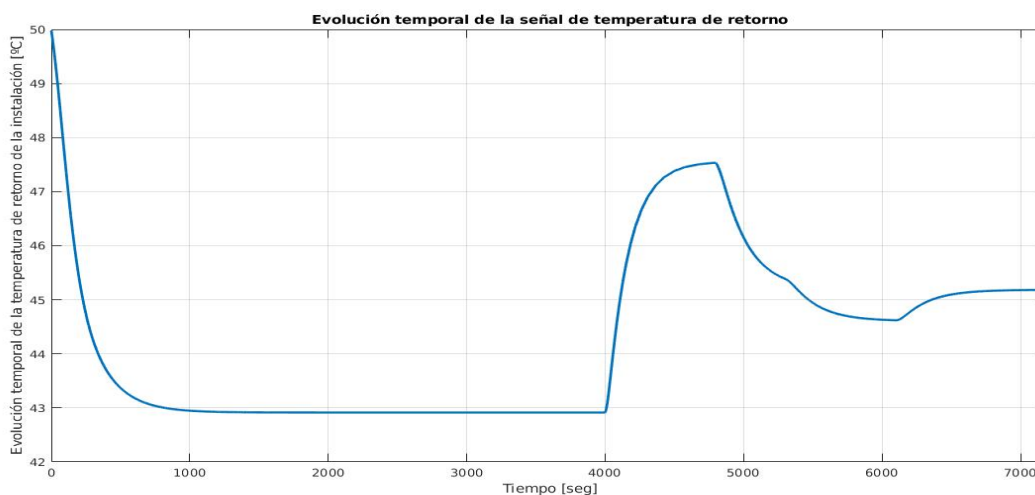


Figura 7.23: Evolución temporal de la temperatura del caudal de retorno. Simulación 5. Fuente: Propia

## 7.2. Discusión de resultados finales

Una vez finalizadas las simulaciones del sistema automático de toma de decisiones, se puede observar en las tablas a continuación cuáles fueron los resultados energéticos obtenidos. Observemos que la variación registrada es muy pequeña. Este resultado era el esperado pues dicho sistema está diseñado para de manera automática, llevar a la instalación hacia los puntos de operación discutidos en el Capítulo 5, donde se demuestra un ahorro de aproximadamente un 40 % de la energía que actualmente consume el proceso.

Tabla 7.1: Consumo energético en el horario 22:00 a 6:00 horas con automatización de la política de gestión

Equipo	Tiempo ON [horas]	Potencia [W]	Energía [kWh]
Bomba de retorno	8	635.18	5.1
Bomba de calentamiento	1.28	759.2	0.97
Bomba de calor	2.75	9340	25.68
Total			31.75

Tabla 7.2: Comparación del rendimiento entre el sistema automatizado y el manual para el horario 22:00-6:00

Política	Energía consumida [kWh]
Política No.1	32.93
Automatización del sistema	31.75

Tabla 7.3: Consumo energético en el horario 6:00 a 22:00 con automatización de la política de gestión

Horario	Energía [kWh]
Preparación matutina	8.37
Máxima demanda matutina	24.4
Bajo consumo vespertino	80.2
Máxima demanda vespertina	25.6
Bajo consumo nocturno	12.9
Total	151.47

Tabla 7.4: Comparación del rendimiento entre el sistema automatizado y el manual para el horario 6:00-22:00

Política	Energía consumida [kWh]
Política No.2	153.45
Automatización del sistema	151.47

Tabla 7.5: Comparación de gastos anuales entre la gestión actual y la propuesta automatizada sin tener en cuenta los ciclos manuales trimestrales contra la legionella.

Gestión del sistema	Energía consumida[kWh]	Costes €
Sin política de gestión	107802	10115.06
Propuesta automatizada	65959.2	6188.95

Tabla 7.6: Comparación de gastos anuales entre la gestión actual y la propuesta automatizada teniendo en cuenta los ciclos manuales trimestrales contra la legionella.

Gestión del sistema	Energía consumida[kWh]	Costes €
Sin política de gestión	107802	10115.06
Propuesta automatizada	66237.76	6215.09

Realizando un análisis de los resultados obtenidos anteriormente, se observa que el ahorro anual que representa la aplicación de un sistema automático que regule los puntos de consigna en el proceso de generación de agua caliente sanitaria en una Villa del Hotel Abama asciende a 3900 €. Esta cifra es, teniendo en cuenta la propuesta que se le realizó al recinto de efectuar cuatro choques térmicos al año contra la bacteria legionella. La validación de los resultados obtenidos se ha hecho en conjunto con los especialistas del centro dando estos últimos su aprobación final. Se estima, que de aplicarse el método de gestión propuesto en el resto de las Villas (3 restantes), los ahorros ascenderían a:

Tabla 7.7: Ahorro estimado con la aplicación del método de gestión al conjunto de las Villas.

Ahorro diario [kWh]	Ahorro mensual [kWh]	Ahorro anual [kWh]
452.28	13568.4	166256.9

Tabla 7.8: Ahorro estimado en términos financieros.

Ahorro diario	Ahorro mensual	Ahorro anual
42.43 €	1273.12 €	15599.88 €

A lo largo de las simulaciones realizadas, luego contrastadas con la instalación real, se ha observado de qué forma responde el sistema de gestión ante los estímulos que se puedan presentar en el procesp. La respuesta que presenta el mismo es la esperada pues desplaza el punto de operación hacia un estado más eficiente. No se busca, como se comentó anteriormente, llegar a un punto de operación óptimo de la instalación pues no se encuentra dentro de los objetivos del proyecto además de que no fueron definidas funciones objetivos para este fin. Se espera, en trabajos futuros, seguir ampliando el conocimiento sobre los sistemas de agua caliente sanitaria centralizada y acondicionamiento de aire, para llegar a implementar una estrategia de control predictivo(MPC *por sus siglas en inglés*). En este punto ya se manejaría el concepto de “óptimo” y se trabajarían con modelos analíticos, tanto de la planta a controlar como modelos predictivos de cantidad de clientes durante el año, condiciones climáticas, etc.

# Capítulo 8

## Conclusiones

La finalización del estudio llevado a cabo sobre las condiciones y el funcionamiento de las instalaciones centralizadas de generación de agua caliente sanitaria da lugar a las conclusiones del presente informe. Primeramente se debe señalar que la hipótesis de partida planteada al inicio se ha demostrado:

*Una gestión eficiente de las consignas asociadas al control de las instalaciones de agua caliente sanitaria trae como resultado un ahorro energético sustancial en el proceso.*

Luego se debe añadir que los objetivos generales trazados fueron cumplidos satisfactoriamente:

- Se ha realizado una revisión de la normativa existente en cuanto a eficiencia energética en los edificios a diferentes escalas jerárquicas. Esto ha servido como punto de partida para enfocar el estudio recogido en este informe.
- Se realizó el modelado y la simulación de los distintos elementos vinculados en una instalación de agua caliente sanitaria. Luego fueron unificados para conocer el funcionamiento de la instalación en su conjunto.
- Se realizó un estudio energético de la instalación para conocer cifras de consumo. De igual manera, se identificaron las principales variables que intervienen en el proceso de generación de ACS y el impacto que cada una de ellas tiene sobre la instalación.
- Una vez identificados los puntos débiles y vulnerabilidades a explotar sobre la instalación, se realizaron propuestas de modificaciones de los puntos de consigna del proceso y se comprobó que el resultado fue satisfactorio.
- Se diseñó un método de gestión haciendo uso de la inteligencia artificial y el conocimiento adquirido a través de las simulaciones, que permite registrar el estado actual de una instalación cualquiera de ACS, y decide hacia que punto de operación desplazar al sistema, de modo que se ahorre energía.

El cumplimiento de algunos de los objetivos trajo consigo aportes o propuestas de cambio, esto fue así con el modelado de una instalación de agua caliente sanitaria en el software MATLAB/Simulink, pues el programa por excelencia para el modelado y estudio de sistemas térmicos es TRNSYS.

Producto del estudio energético de la instalación de ACS, se realizaron propuestas basadas en estudios recientes contra la bacteria legionella(2020) que entran en discrepancia con la normativa actual. Aún así, fueron concebidas dentro de las propuestas realizadas medidas para combatirla.

Se diseñó un método general de gestión de puntos de consigna, que al no estar basado en modelos analíticos estrictos, permite adaptarse a cualquier instalación centralizada de ACS, definir las reglas propias de la misma y desempeñar su función correctamente.

## 8.1. Conclusions

The completion of the study carried out on the conditions and operation of centralized domestic hot water generation facilities leads to the conclusions of this report. First of all, it should be noted that the initial hypothesis at the beginning has been demonstrated:

*An efficient management of the setpoints associated with the control of domestic hot water installations results in substantial energy savings to the process.*

Then it should be added that the general objectives set were satisfactorily met:

- A review of the existing regulations regarding energy efficiency in buildings has been carried out at different hierarchical scales. This has been our starting point to focus this research.
- The modeling and simulation of the different elements associated within a domestic hot water installation was carried out. Then they were unified to study the performance of the installation.
- An energy study of the installation was carried out to find out consumption numbers. In the same way, the main variables in the DHW generation process and the impact that each of them have on the installation were identified.
- Once the weak points and vulnerabilities to be exploited on the installation had been identified, proposals were made to modify the setpoints of the process and it was verified that the result was satisfactory.
- A management method was designed making use of artificial intelligence and the knowledge acquired through simulations, which allows reading the current status of any DHW installation, and decides to which point of operation to move the system, with considerable energy savings.

The fulfillment of some of the objectives brought with them contributions or proposals for change, this was the case with the modeling of a domestic hot water installation in the MATLAB / Simulink software, since the most widely used program for modeling and study of thermal systems is TRNSYS.

As a result of the energy study of the DHW installation, proposals were made based on recent studies against the legionella bacteria (2020) that aren't completely agree with the current regulations. Even so, measures to combat it were conceived within the proposals made.

A general method for managing setpoints was designed, which, as it is not based on strict analytical models, allows it to be adapted to any centralized DHW installation, define its own rules and perform its function correctly.

## Capítulo 9

# Líneas abiertas

El estudio realizado sobre el control y supervisión de instalaciones de agua caliente sanitaria es aún mucho más amplio, interesante y con muchas ramas aún por explotar. En este estudio se ha trabajado sobre una sola subestación de producción de ACS, pero sería en cambio muy provechoso conocer el desempeño de un circuito primario frente a múltiples circuitos secundarios. Para ellos habría que diseñar un sistema de gestión que atendiera a múltiples subestaciones de producción y basándose en su demanda, gestionara el circuito primario de calentamiento de agua.

El Control Predictivo basado en Modelos(MPC *por sus siglas en inglés*) para gestionar los puntos de consigna de la instalación es otra ventaja potencial. Las decisiones concernientes a optimizar las operaciones en los sistemas energéticos hoteleros son cada vez más complejas, por ello los algoritmos basados en MPC juegan un rol decisivo. Dichos algoritmos trabajan con horizontes de control que nos permiten “predecir” cuál será la entrada a nuestro proceso. De igual manera, mediante un sistema de pesos asignados podemos controlar la intensidad de nuestra señal de control para optimizar energía. Esta combinación de factores que viene a ser la predicción en las variables de entrada con las ventajas que nos ofrece el control óptimo, podría cambiar por completo a los sistemas de administración de recursos energéticos.

Es innegable hoy en día el enorme impacto que está teniendo en la sociedad contemporánea la inteligencia artificial. Nos encontramos actualmente viviendo la 4ta Revolución Industrial de la historia, y la misma tiene entre los grandes pilares que la sostienen a la inteligencia artificial. El aumento exponencial en la digitalización de los procesos y el Internet de las Cosas(IoT *por sus siglas en inglés*)hace que una gran cantidad de datos estén fluyendo constantemente. Como fue comentado, las decisiones sobre la forma de operar los sistemas energéticos, tanto hoteleros, metropolitanos o nacionales son cada vez más complejos pues la interconexión y el mallado de dichos sistemas trae ventajas pero igualmente complejiza el conjunto. La ciencia de datos ha venido a brindar una herramienta muy poderosa para lidiar con dichas complejidades, y aplicada correctamente, puede desmontar el mito y crear novedosos sistemas de gestión energéticos muy diferentes a los que conocemos hoy en día.





```

60. if (HORA is SVES) and (CONSV1 is CA) then (SPRET is SPRETM) (1)
61. if (HORA is SSNOC) and (DEPVILLA1 is SSALTO) then (SPDEP is TD52)(SPDIST is DIS52)(SPBC is BC63)(SPV3V is V3VMIN) (1)
62. if (HORA is SSNOC) and (DEPVILLA1 is SERVNORMAL) then (SPDEP is TD52)(SPDIST is DIS52)(SPBC is BC63)(SPV3V is V3VMIN) (1)
63. if (HORA is SSNOC) and (ERRORV1 is ENP) and (DEPVILLA1 is SSBAJO) then (SPDEP is TD54)(SPDIST is DIS52)(SPBC is BC63)(SPV3V is V3VXXX) (1)
64. if (HORA is SSNOC) and (ERRORV1 is ENP) and (DEPVILLA1 is SERVNORMAL) then (SPDEP is TD54)(SPDIST is DIS52)(SPBC is BC63)(SPV3V is V3VXXX) (1)
65. if (HORA is SSNOC) and (ERRORV1 is ENM) and (DEPVILLA1 is SSBAJO) then (SPDEP is TD52)(SPDIST is DIS52)(SPBC is BC63)(SPV3V is V3VMIN) (1)
66. if (HORA is SSNOC) and (ERRORV1 is ENM) and (DEPVILLA1 is SERVNORMAL) then (SPDEP is TD52)(SPDIST is DIS52)(SPBC is BC63)(SPV3V is V3VMIN) (1)
67. if (HORA is SSNOC) and (ERRORV1 is ENM) and (DEPVILLA1 is SSBAJO) then (SPDEP is TD52)(SPDIST is DIS52)(SPBC is BC63)(SPV3V is V3VMIN) (1)
68. if (HORA is SSNOC) and (ERRORV1 is ENM) and (DEPVILLA1 is SERVNORMAL) then (SPDEP is TD52)(SPDIST is DIS52)(SPBC is BC63)(SPV3V is V3VMIN) (1)
69. if (HORA is SSNOC) and (ERRORV1 is EPP) and (DEPVILLA1 is SSBAJO) then (SPDEP is TD52)(SPDIST is DIS52)(SPBC is BC63)(SPV3V is V3VMIN) (1)
70. if (HORA is SSNOC) and (ERRORV1 is EPP) and (DEPVILLA1 is SERVNORMAL) then (SPDEP is TD52)(SPDIST is DIS52)(SPBC is BC63)(SPV3V is V3VMIN) (1)
71. if (HORA is SSNOC) and (ERRORV1 is EPG) and (DEPVILLA1 is SSBAJO) then (SPDEP is TD54)(SPDIST is DIS52)(SPBC is BC63)(SPV3V is V3VXXX) (1)
72. if (HORA is SSNOC) and (CONSV1 is CB) then (SPRET is SPRETB) (1)
73. if (HORA is SSNOC) and (CONSV1 is CM) then (SPRET is SPRETM) (1)
74. if (HORA is SSNOC) and (CONSV1 is CA) then (SPRET is SPRETM) (1)

```

Figura 10.1: Reglas de inferencia del sistema difuso. Simulación 5. Fuente: Propia

## Script de Matlab para modelar el intercambiador de calor

```

function [tf_out,tc_out,ef,calor_trans] = Intercambiador(cc,tc_in,cf,tf_in)

ua120 = 3327.8;
pot120 = 120000;
cmax = 4;

if (cc>cmax || cc<0) || (tc_in<0) || (cf<0) || (tf_in>tc_in)%---Comprueba que todos los datos
están dentro de los intervalos
    tf_sal = 0;
    tc_sal = 0;
    ef = 0;
    disp("Error en los datos de entrada al intercambiador");
else
    Cmin = 4184*min(cf,cc);
    Cmax = 4184*max(cf,cc);
    NTU = ua120/Cmin;
    Cr = Cmin/Cmax;
    efi = (1-exp(-NTU*(1-Cr)))/(1-Cr*exp(-NTU*(1-Cr))); %---Doble tubo contracorriente

    if (cf < cc)
        tf_sal = tf_in+efi*(tc_in-tf_in); %---Temperatura de salida fluido frío
        pot_sec = Cmin*(tf_sal-tf_in); %---Calor aportado al secundario
        tc_sal = tc_in - (pot_sec/Cmax); %---Temperatura de salida fluido caliente
    else
        tc_sal = tc_in-efi*(tc_in-tf_in); %---Temperatura de salida del fluido caliente
        pot_pri = Cmin*(tc_sal-tf_in); %---Calor aportado por el primario
        tf_sal = tf_in + (pot_pri/Cmax); %---Temperatura de salida del fluido frío
    end
end
tf_out = tf_sal;
tc_out = tc_sal;
ef = efi;
calor_trans = cf*4184*(tf_sal-tf_in);
end

```

Figura 10.2: Script de Matlab para modelar el intercambiador de calor. Fuente: Propia

# Capítulo 11

## Presupuesto

### 11.1. Precios unitarios

Código	Ud	Descripción	Precio(€)	
UEBC1	Ud	Bomba de calor WWB0900	27883.41	VEINTISIETE MIL OCHOCIENTOS OCHENTA Y TRES EUROS con CUARENTA Y UN CÉNTIMOS
BIGF	Ud	Bomba de impulsión Grundfos ALPHA 1L	523.00	QUINIENTOS VEINTITRES EUROS
BCGF	Ud	Bomba de calentamiento Grundfos	2180.00	DOS MIL CIENTO OCHENTA EUROS
BRGF	Ud	Bomba de retorno Grundfos	2260.00	DOS MIL DOSCIENTOS SESENTA EUROS
HX	Ud	Intercambiador de calor Alfa Laval M3	1411.00	MIL CUATROCIENTOS ONCE EUROS
DPACM	Ud	Depósito de acumulación de ACS	3646.70	TRES MIL SEISCIENTOS CUARENTA Y SEIS EUROS con SETENTA CÉNTIMOS
V3P	Ud	Válvula de 3 vías del primario	51.00	CINCUENTA Y UN EUROS
V3M	Ud	Válvula mezcladora de ACS	51.00	CINCUENTA Y UN EUROS
STPT	Ud	Sensor de temperatura Pt-100	71.10	SETENTA Y UN EUROS con DIEZ CÉNTIMOS
FT	Ud	Caudalímetro SITRANS mag500	1174.74	MIL CIENTO SETENTA Y CUATRO EUROS con SETENTA Y CUATRO
AP	Ud	Autómata programable Simatic S7-300	990.00	NOVECIENTOS NOVENTA EUROS
TB	m	Tubería de polipropileno montaje superficial	2.45	DOS EUROS CON CUARENTA Y CINCO CÉNTIMOS
MO1	h	Peón ordinario de fontanería	16.16	DIECISEIS EUROS con DIECISEIS CÉNTIMOS
MO2	h	1er Oficial de fontanería	17.50	DIECISIETE EUROS con CINCUENTA CÉNTIMOS
MO3	h	Técnico de equipos de climatización	19.42	DIECINUEVE EUROS con CUARENTA Y DOS CÉNTIMOS
MO4	h	Ayudante técnico de equipos de climatización	17.86	DIECISIETE EUROS con OCHENTA Y SEIS CÉNTIMOS
MO5	h	Técnico en electrónica industrial y automática	18.13	DIECIOCHO EUROS con TRECE CÉNTIMOS
MO6	h	Ayudante técnico en electrónica industrial y automática	16.40	DIECISEIS EUROS con CUARENTA CÉNTIMOS
MO7	h	Ingeniero Jefe de Proyecto	25.00	VEINTICINCO EUROS

### 11.2. Precios descompuestos

Código	Cantidad	Ud	Descripción	Precio(€)	Subtotal	Importe(€)
<b>CAPÍTULO 01 EQUIPOS</b>						
<b>01.01 Bomba de calor WWB0900XHL</b>						
Bomba de calor agua-agua de alta temperatura. Potencia calorífica 266 kW						
UEBC1	1.00	Ud	Bomba de calor	27883.41	27883.41	
MO3	6.00	h	Técnico de equipos de climatización	19.42	116.52	
MO4	6.00	h	Ayudante técnico de equipos de climatización	17.86	107.16	
Porc2	2.00	%	Costes directos complementarios	558.41	562.14	
				<b>558.41</b>	<b>562.14</b>	
				<b>TOTAL PARTIDA</b>	<b>28669.23</b>	
<b>01.02 Bomba de impulsión Grundfos ALPHA 1L</b>						
Bomba de impulsión Grundfos ALPHA 1L de agua caliente sanitaria del circuito primario						
BIGF	1.00	Ud	Bomba de impulsión Grundfos ALPHA 1L	523.00	523.00	
MO3	3.00	h	Técnico de equipos de climatización	19.42	58.26	
MO4	3.00	h	Ayudante técnico de equipos de climatización	17.86	53.58	
Porc2	2.00	%	Costes directos complementarios	11.21	12.70	
				<b>11.21</b>	<b>12.70</b>	
				<b>TOTAL PARTIDA</b>	<b>647.54</b>	
<b>01.03 Bomba de calentamiento Grundfos</b>						
Bomba de calentamiento Grundfos de agua caliente sanitaria del circuito secundario						
BCGF	1.00	Ud	Bomba de calentamiento Grundfos	2180.00	2180.00	
MO3	3.00	h	Técnico de equipos de climatización	19.42	58.26	
MO4	3.00	h	Ayudante técnico de equipos de climatización	17.86	53.58	
Porc2	2.00	%	Costes directos complementarios	44.35	45.84	
				<b>44.35</b>	<b>45.84</b>	
				<b>TOTAL PARTIDA</b>	<b>2337.68</b>	

<b>01.04</b>		<b>Bomba de retorno</b>			
Bomba de retorno Grundfos de agua caliente sanitaria del circuito primario					
BRGF	1.00	Ud	Bomba de retorno Grundfos	2260.00	2260.00
MO3	3.00	h	Técnico de equipos de climatización	19.42	58.26
MO4	3.00	h	Ayudante técnico de equipos de climatización	17.86	53.58
Porc2	2.00	%	Costes directos complementarios	45.95	47.44
				<b>TOTAL PARTIDA</b>	<b>2419.28</b>

<b>01.05</b>		<b>Intercambiador de calor</b>			
Intercambiador de calor de agua caliente sanitaria del circuito secundario					
HX	1.00	Ud	Intercambiador de calor Alfa Laval M3	1411.00	1411.00
MO3	1.00	h	Técnico de equipos de climatización	19.42	19.42
MO4	1.00	h	Ayudante técnico de equipos de climatización	17.86	17.86
Porc2	2.00	%	Costes directos complementarios	28.97	28.97
				<b>TOTAL PARTIDA</b>	<b>1477.25</b>

<b>01.06</b>		<b>Depósito de acumulación de ACS</b>			
Instalación del Depósito de Acumulación de ACS					
DPACM	1.00	Ud	Depósito de acumulación de ACS	3646.70	3646.70
MO3	1.00	h	Técnico de equipos de climatización	19.42	19.42
MO4	1.00	h	Ayudante técnico de equipos de climatización	17.86	17.86
Porc2	2.00	%	Costes directos complementarios	73.68	73.68
				<b>TOTAL PARTIDA</b>	<b>3757.66</b>

**CAPÍTULO 02 INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL**

<b>02.01</b>		<b>Válvulas del sistema</b>			
Instalación de la válvula mezcladora y la válvula de tres vías del sistema					
V3P	1.00	Ud	Válvula de 3 vías del primario	51.00	51.00
V3M	1.00	Ud	Válvula mezcladora de ACS	51.00	51.00
MO2	1.00	h	1er Oficial de fontanería	17.50	17.50
Porc2	2.00	%	Costes directos complementarios	2.39	2.39
				<b>TOTAL PARTIDA</b>	<b>121.89</b>

<b>02.02</b>		<b>Sensores del sistema</b>			
Instalación de los sensores para el control del sistema de ACS					
STPT	1.00	Ud	Sensor de temperatura Pt-100	71.10	71.10
FT	1.00	Ud	Caudalímetro SITRANS mag500	1174.74	1174.74
MO5	1.00	h	Técnico en electrónica industrial y automática	18.13	18.13
MO6	1.00	h	Ayudante técnico en electrónica industrial y automática	16.40	16.40
Porc2	2.00	%	Costes directos complementarios	25.61	25.61
				<b>TOTAL PARTIDA</b>	<b>1305.98</b>

<b>02.03</b>		<b>Autómata del sistema</b>			
Instalación del autómata de control del sistema de ACS					
AP	1.00	Ud	Autómata programable Simatic S7-300	990.00	990.00
MO5	1.00	h	Técnico en electrónica industrial y automática	18.13	18.13
MO6	1.00	h	Ayudante técnico en electrónica industrial y automática	16.40	16.40
Porc2	2.00	%	Costes directos complementarios	20.49	20.49
				<b>TOTAL PARTIDA</b>	<b>1045.02</b>

**CAPÍTULO 03 TUBERÍAS**

<b>03.01</b>		<b>Tubería</b>			
Instalación de metro de tubería de propileno en montaje superficial					
TB	1.00	m	Tubería de polipropileno montaje superficial	2.45	2.45
MO1	0.11	h	Peón ordinario de fontanería	16.16	1.78
MO2	0.11	h	1er Oficial de fontanería	17.50	1.93
Porc2	2.00	%	Costes directos complementarios	0.72	0.12
				<b>TOTAL PARTIDA</b>	<b>6.28</b>

### 11.3. Mediciones y presupuesto

<b>CAPÍTULO 02 INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL</b>					
<b>02.01</b>	<b>Válvulas del sistema</b>	Ud	1	121.89	121.89
	Instalación de la válvula mezcladora y la válvula de tres vías del sistema				
<b>02.02</b>	<b>Sensores del sistema</b>	Ud	1	1305.98	1305.98
	Instalación de los sensores para el control del sistema de ACS				
<b>02.03</b>	<b>Autómata del sistema</b>	Ud	1	1045.02	1045.02
	Instalación del autómata de control del sistema de ACS				
<b>2.04</b>	<b>Implementación de sistema de gestión</b>	Ud	1	7000.00	7000.00
	Diseño e implementación del sistema automático de gestión de consignas en el PLC Siemens S7-300				
<b>CAPÍTULO 03 TUBERÍAS</b>					
<b>03.01</b>	<b>Tubería</b>	m	95	6.28	596.19
	Instalación de metro de tubería de propileno en montaje superficial				

### 11.4. Resumen general

<b>Cap Denominación</b>	<b>Importe (€)</b>
1 CAPÍTULO 01 EQUIPOS	39308.63
2 CAPÍTULO 02 INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL	9472.89
3 CAPÍTULO 03 TUBERÍAS	596.19
<b>TOTAL PRESUPUESTO EJECUCIÓN MATERIAL</b>	<b>48781.52</b>
13% Gastos Generales.....	6341.60
6% Beneficio Industrial.....	2926.89
SUMA DE G.G Y B.I.	9268.49
7% IGIC.....	3414.71
<b>TOTAL PRESUPUESTO DE CONTRATA</b>	<b>61464.71</b>
<b>TOTAL PRESUPUESTO GENERAL</b>	<b>61464.71</b>

# Bibliografía

- [1] Lester G. Cordes et. al. “Isolation of Legionella pneumophila from Hospital Shower Heads”. En: *Annals of Internal Medicine* 94 (1981). DOI: <https://doi.org/10.7326/0003-4819-94-2-195>.
- [2] C.V. Altrock y col. “Adaptive fuzzy control applied to home heating system”. En: *Fuzzy Sets and Systems* 61 (1994). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.09.015>.
- [3] Colectivo de autores. *Guía de Gestión Energética en el Sector Hotelero*. 2.<sup>a</sup> ed. Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid. Nov. de 2017.
- [4] A. Campos Celador, M. Odriozola y J.M. Sala. “Implications of the modelling of stratified hot water storage tanks in the simulation of CHP plants”. En: *Energy Conversion and Management* 52 (2011). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2011.04.015>.
- [5] Asociación Técnica Española de Climatización y Refrigeración (ATECYR). *Guía Técnica. Agua caliente sanitaria central*. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. Madrid, España, 2010.
- [6] Industria y Comercio Consejería de Empleo. *Plan Energético de Canarias 2006-2015*. 1.<sup>a</sup> ed. Gobierno de Canarias. Mar. de 2007.
- [7] Lester G. Cordes y David W. Fraser. “Legionellosis: Legionnaires’ disease; Pontiac fever”. En: *Medical Clinics of North America* 64 (1980). DOI: [https://doi.org/10.1016/S0025-7125\(16\)31600-5](https://doi.org/10.1016/S0025-7125(16)31600-5).
- [8] Karen D. Cowgill y col. “Recurrence of Legionnaires Disease at a Hotel in the United States Virgin Islands over a 20-Year Period”. En: *Annals of Internal Medicine* 94 (1981). DOI: <https://doi.org/10.7326/0003-4819-94-2-195>.
- [9] D.Kolokotsa y col. “Genetic algorithms optimized fuzzy controller for the indoor environmental management in buildings implemented using PLC and local operating networks”. En: *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 15 (2002). DOI: [https://doi.org/10.1016/S0952-1976\(02\)00090-8](https://doi.org/10.1016/S0952-1976(02)00090-8).
- [10] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. *Plan de Acción para el período 2008-2012*. 1.<sup>a</sup> ed. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. Jul. de 2007.
- [11] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. *Plan de Energías Renovables en España 2005-2010*. 1.<sup>a</sup> ed. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. Ago. de 2005.
- [12] A.I. Dounis y C.Caraiscos. “Advanced control systems engineering for energy and comfort management in a building environment—A review”. En: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13 (2009). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.09.015>.
- [13] Instituto de Estudios Turísticos e Instituto de Turismo de España. *Resultados de la actividad turística en España*. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. Madrid, España, 2013.
- [14] Yazeed Yasin Ghadi, M.G. Rasul y M.M.K. Khan. “Design and development of advanced fuzzy logic controllers in smart buildings for institutional buildings in subtropical Queensland”. En: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 54 (2016). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.105>.
- [15] Anurag Goyal, Marcel A. Staedter y Srinivas Garimella. “A review of control methodologies for vapor compression and absorption heat pumps”. En: *International Journal of Refrigeration* 97 (2019). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2018.08.026>.

- [16] Y.M. Han, R.Z. Wang e Y.J. Dai. “Thermal stratification within the water tank”. En: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13 (2009). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.03.001>.
- [17] Arif Hepbasli y Yildiz Kalinci. “A review of heat pump water heating systems”. En: *Renewable and sustainable energy reviews* 13 (2009). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.08.002>.
- [18] Oussama Ibrahim y col. “Air source heat pump water heater: Dynamic modeling, optimal energy management and mini-tubes condensers”. En: *Energy* 64 (2014). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.11.017>.
- [19] B. de Jong y col. “Travel-associated Legionnaires disease in Europe”. En: *Eurosurveillance* 18 (2013). DOI: <https://doi.org/10.2807/es.e18.23.20498-en>.
- [20] Minsung Kim, Min Soo Kim y Jae Dong Chung. “Transient thermal behavior of a water heater system driven by a heat pump”. En: *International Journal of Refrigeration* 27 (2004). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2003.11.009>.
- [21] Oh Jin Kwon, Jae Hoon Jung y Yong Tae Kang. “Development of experimental Nusselt number and friction factor correlations for condensation of R-1233zd(E) in plate heat exchangers”. En: *International Journal of Heat and Mass Transfer* 158 (2020). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120008>.
- [22] Shengchun Liu, Zheng Li y Baomin Dai. “Energy, Economic and Environmental Analyses of the CO2 Heat Pump System Compared with Boiler Heating System in China”. En: *Energy Procedia* 105 (2017). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.803>.
- [23] A.A. McKillop y W. L. Dunkley. “Plate heat exchangers-Heat transfer”. En: *Industrial Engineering Chemistry* 52 (1960). DOI: <https://doi.org/10.1021/ie50609a020>.
- [24] Consejo de Ministros, ed. *Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios*. Vol. 207. Real Decreto 1027/2007. Madrid, España, 2007.
- [25] Varvara Mouchtouri y col. “Risk Factors for Contamination of Hotel Water Distribution Systems by Legionella Species”. En: *Applied and Environmental Microbiology* 73 (2007). DOI: <https://doi.org/10.1128/AEM.02191-06>.
- [26] Vassiliki Mpelogianni y col. “Proactive Building Energy Management Methods based on Fuzzy Logic and Expert Intelligence”. En: *IFAC-PapersOnLine* 52 (2019). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.12.597>.
- [27] European Parliament. “DIRECTIVE (EU) 2018/844 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 30 May 2018 amending Directive 2010/31/EU on the energy performance of buildings and Directive 2012/27/EU on energy efficiency (Text with EEA relevance)”. En: *Official Journal of the European Union* 156 (2018). DOI: <http://data.europa.eu/eli/dir/2018/844/oj>.
- [28] European Parliament. “DIRECTIVE 2009/125/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL establishing a framework for the setting of ecodesign requirements for energy-related products”. En: *Official Journal of the European Union* 52 (2009). DOI: [doi:10.3000/17252555.L\\_2009.285.eng](https://doi.org/10.3000/17252555.L_2009.285.eng).
- [29] European Parliament. “DIRECTIVE 2010/31/EU OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on the energy performance of buildings”. En: *Official Journal of the European Union* 53 (2010). DOI: <http://data.europa.eu/eli/dir/2010/31/oj>.
- [30] European Parliament. “DIRECTIVE 2012/27/EU OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL, on energy efficiency, amending Directives 2009/125/EC and 2010/30/EU and repealing Directives 2004/8/EC and 2006/32/EC”. En: *Official Journal of the European Union* 55 (2012). DOI: [10.3000/19770677.L\\_2012.315.eng](https://doi.org/10.3000/19770677.L_2012.315.eng).

- [31] European Parliament. “REGULATION (EU) 2017/1369 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL setting a framework for energy labelling and repealing Directive 2010/30/EU”. En: *Official Journal of the European Union* 60 (2017). DOI: <http://data.europa.eu/eli/reg/2017/1369/oj>.
- [32] *Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030*. 1.<sup>a</sup> ed. Ministerio de Transición Ecológica. Feb. de 2019.
- [33] Ministerio de la Presidencia, ed. *Real Decreto 235/2013, de 5 de abril, por el que se aprueba el procedimiento básico para la certificación de la eficiencia energética de los edificios*. Vol. 89. BOE. Madrid, España, 2013.
- [34] Md Rasheduzzaman y col. “Required water temperature in hotel plumbing to control Legionella”. En: *Water Research* 182 (2020). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115943>.
- [35] Ministerio de Sanidad y Consumo, ed. *Real Decreto 865/2003, de 4 de julio, por el que se establecen los criterios higiénico-sanitarios para la prevención y control de la legionelosis*. Vol. 171. BOE. Madrid, España, 2003.
- [36] Desarrollo Industrial de la Pequeña y Mediana Empresa Secretaría de Estado de Energía. *Estrategia de Ahorro y Eficiencia Energética 2004-2012*. 1.<sup>a</sup> ed. Ministerio de Economía. Nov. de 2003.
- [37] Carlos A. Smith y Armando B. Corripio. *Principles and Practice of Automatic Process Control*. John Wiley Sons, 1997.
- [38] Dirección General de Arquitectura Vivienda y Suelo. *Código Técnico de la Edificación, Documento Básico HE, Ahorro de energía*. Ministerio de Fomento. Dic. de 2019.
- [39] W.M.Kays y A.L. London. *Compact Heat Exchangers*. Universidad de Michigan: Krieger Publishing Company, 1960.
- [40] Shengwei Wang y Xinqiao Jin. “Model-based optimal control of VAV air-conditioning system using genetic algorithm”. En: *Building and Environment* 35 (2000). DOI: [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(99\)00032-3](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(99)00032-3).
- [41] Rui Yang y Lingfeng Wang. “Development of multi-agent system for building energy and comfort management based on occupant behaviors”. En: *Energy and Buildings* 56 (2013). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.10.025>.
- [42] He Zang y col. “Fuzzy logic based energy management strategy for commercial buildings integrating photovoltaic and storage systems”. En: *Energy and Buildings* 54 (2012). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.07.022>.