



**Universidad**  
Zaragoza

# Trabajo Fin de Máster

Análisis comparativo de dos esquemas de  
poligeneración doméstica

Comparative analysis of two domestic  
polygeneration schemes

Autor

Katherine Chung Camargo

Director

Francisco Javier Uche Marcuello

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

2019

## **Agradecimientos**

Primeramente quiero agradecer a mi tutor y director Javier Uche, por la oportunidad de desarrollar este proyecto, desde que lo conocí y su trabajo quería ser parte de proyectos energéticos que realiza, y gracias a él he podido aprender muchos sistemas que no los conocía, además por su apoyo, revisión y sugerencias cuando lo necesitaba.

Por su apoyo económico y la realización de este Máster, al Instituto para la Formación y Aprovechamiento de Recursos Humanos (IFARHU) y la Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (SENACYT) de Panamá.

A los profesores en este Máster que por sus conocimientos en clase y dedicación a enseñar he podido adquirir habilidades para desarrollar este proyecto.

A Dios, el creador de todo, mi roca y sustento, quien me ha traído hasta aquí y cumple sus promesas.

A mi Familia por su apoyo constante aun en la distancia, por creer en mí.

A mi mejor amiga Stephanie que me inspira a seguir aprendiendo y su apoyo incondicional, Luis por sus ideas y consejos para mejorar en este proyecto. Y otros amigos que saben que sin ellos esto no sería posible, muchas gracias.

# ANÁLISIS COMPARATIVO DE DOS ESQUEMAS DE POLIGENERACIÓN DOMÉSTICO

## RESUMEN

La energía final se utiliza para desarrollar cualquier actividad en diferentes áreas como la educación, salud, agricultura, producción de alimentos, suministro de agua, industria, residencial, etc. Por lo tanto, la conversión de energía primaria y la tecnología utilizada para este fin son claves en la sostenibilidad futura. Que el suministro energético llegue a todas las regiones del mundo, específicamente en las zonas aisladas, es un indicador del desarrollo humano. Este trabajo fin de máster (TFM) analiza la cobertura con sistemas de poligeneración todas posibles demandas domésticas (agua potable, calefacción, refrigeración, y electricidad) en dichas zonas aisladas. Y se proponen dos esquemas usando únicamente energías renovables, uno basado en energía solar y biomasa (“todo térmico”); y otro en energía solar (“eléctrico”). Los dos esquemas propuestos se han localizado en la zona del mediterráneo, siendo la estimación de las demandas correspondiente a la localidad de Tarragona.

La metodología de trabajo del TFM comienza con la revisión del estado del arte y estudio de los sistemas de poligeneración (configuraciones, tecnologías utilizadas y comparación de resultados). Después se han hecho dos modelos implementados en el programa EES. Este programa ha permitido calcular los resultados necesarios para la comparación de los dos esquemas. Los valores promedio para un día de invierno, primavera, verano y otoño han sido los utilizados para la comparación relativa en el análisis de los resultados. Finalmente, el rendimiento energético y exergético y costes nivelados de las demandas suplidas han sido analizados tanto gráfica como numéricamente. En los anexos de la memoria se describen todas las ecuaciones utilizadas en los balances energéticos, exergéticos y los costes de la instalación.

Considero que este trabajo de fin de máster puede ser interesante como referencia a futuros proyectos enfocados a suplir en pequeña escala y con energías renovables en zonas aisladas, todas las demandas de una vivienda unifamiliar aislada.

## **Nomenclatura**

ACS	Agua caliente Sanitaria
LCOE	Costos nivelados de electricidad
LCOH	Costos nivelados de calefacción
LCOC	Costos nivelados de refrigeración
LCOW	Costos nivelados del agua
PVT	Panel fotovoltaico térmico
PV	Panel fotovoltaico
OI	Ósmosis Inversa
BC	Bomba de Calor
ORC	Ciclo orgánico Rankine
EES	Engineering Equation Solver

Índice

RESUMEN .....	3
<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1 OBJETIVOS.....	4
1.2 DESCRIPCIÓN DE LA MEMORIA .....	4
<b>2. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE .....</b>	<b>5</b>
<b>3. DEMANDAS.....</b>	<b>10</b>
3.1 AGUA POTABLE.....	10
3.2 CALEFACCIÓN .....	11
3.3 REFRIGERACIÓN.....	12
3.4 ELECTRICIDAD.....	13
<b>4. DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN.....</b>	<b>15</b>
4.1 ESQUEMA A .....	15
4.1.1 <i>Sistema de desalinización por ósmosis inversa</i> .....	17
4.1.2 <i>Sistema de captación solar</i> .....	17
4.1.3 <i>Sistema de agua caliente sanitaria</i> .....	18
4.1.4 <i>Sistema de calefacción</i> .....	18
4.1.5 <i>Sistema de refrigeración</i> .....	19
4.1.6 <i>Sistema eléctrico</i> .....	19
4.2 ESQUEMA B .....	20
4.2.1 <i>Sistema de desalinización por ósmosis inversa</i> .....	23
4.2.2 <i>Sistema de captación solar</i> .....	23
4.2.3 <i>Sistema de agua caliente sanitaria</i> .....	23
4.2.4 <i>Sistema de calefacción</i> .....	23
4.2.5 <i>Sistema de refrigeración</i> .....	23
4.2.6 <i>Sistema eléctrico</i> .....	24
<b>5. METODOLOGÍA .....</b>	<b>25</b>
5.1 ESTUDIO Y CONOCIMIENTO DE LOS SISTEMAS DE POLIGENERACIÓN .....	25
5.2 OBTENCIÓN DE DATOS DE DEMANDA DE LA VIVIENDA .....	25
5.3 REALIZACIÓN DE CÁLCULOS MODELADOS EN EL EES.....	26
5.4 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS .....	27
<b>6. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....</b>	<b>34</b>
<b>7. CONCLUSIONES .....</b>	<b>40</b>
<b>8. BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>42</b>
<b>9. ANEXOS .....</b>	<b>45</b>
<b>A. CÁLCULO DE LAS DEMANDAS.....</b>	<b>45</b>
A.1. AGUA POTABLE.....	45
A.2. AGUA PARA CONSUMO SANITARIO (ACS) .....	47
A.3. REFRIGERACIÓN.....	49
A.4. CALEFACCIÓN .....	56
A.5. ELECTRICIDAD.....	61
<b>B. CÁLCULOS ENERGÉTICOS.....</b>	<b>62</b>
B.1. ESQUEMA A .....	62
<i>Ósmosis inversa</i> .....	62
<i>PVT</i> .....	67

ORC+Colector.....	73
Ciclo de refrigeración por absorción .....	77
Caldera de biomasa .....	79
TEG .....	83
Baterías .....	85
Rendimiento global de la instalación .....	86
B.2. ESQUEMA B .....	89
Ósmosis inversa.....	89
PVT .....	89
PV.....	89
Bomba de calor .....	91
Calentador eléctrico .....	94
Baterías .....	95
Rendimiento global de la instalación .....	95
<b>C. CÁLCULOS EXEGÉTICOS.....</b>	<b>99</b>
C.1. ESQUEMA A .....	99
Ósmosis inversa.....	99
1.2.1 PVT .....	100
ORC+Colector.....	100
Ciclo refrigeración por absorción .....	101
Caldera de biomasa .....	101
TEG .....	102
Rendimiento exergético global.....	103
C.2. ESQUEMA B .....	104
Ósmosis inversa.....	104
PVT .....	104
PV.....	104
Bomba de calor .....	104
Calentador eléctrico .....	105
Rendimiento exergético global.....	105
<b>D. COSTE DE LA INSTALACIÓN .....</b>	<b>106</b>
D.1. COSTES NIVELADOS DEL AGUA .....	108
Esquema A.....	108
Esquema B.....	109
D.2. COSTES NIVELADOS DE CALEFACCIÓN .....	109
Esquema A.....	109
Esquema B.....	110
D.3. COSTES NIVELADOS DE REFRIGERACIÓN .....	112
Esquema A.....	112
Esquema B.....	113
D.4. COSTES NIVELADOS DE ELECTRICIDAD.....	115
Esquema A.....	115
Esquema B.....	116
D.5. PERIODO DE RETORNO SIMPLE .....	117
Esquema A.....	118
Esquema B.....	118
D.6. ANÁLISIS SENSIBILIDAD LCOE .....	119
<b>E. VALORES TERMODINÁMICOS CALCULADOS.....</b>	<b>121</b>
Esquema A.....	121
Esquema B.....	125

## Índice de Tablas

TABLA 1. DEMANDA DE CALEFACCIÓN .....	11
TABLA 2. DEMANDA DE REFRIGERACIÓN .....	12
TABLA 3. DEMANDA ELECTRODOMÉSTICOS .....	13
TABLA 4. DEMANDAS TOTALES DE LA VIVIENDA.....	14
TABLA 5. LISTA DE EQUIPOS ESQUEMA A.....	15
TABLA 6. DATOS DE DISEÑO ÓSMOSIS INVERSA.....	17
TABLA 7. DATOS PANEL HÍBRIDO .....	18
TABLA 8. LISTA DE EQUIPOS ESQUEMA B .....	20
TABLA 9. PRODUCCIÓN DIARIA. ESQUEMA A .....	28
TABLA 10. PRODUCCIÓN DIARIA. ESQUEMA B .....	29
TABLA 11. MODELO ANÁLISIS ESQUEMA.....	30
TABLA 12. MODELO ANÁLISIS COBERTURA.....	30
TABLA 13. MODELO POTENCIAS .....	31
TABLA 14. MODELO VALORES TERMODINÁMICOS .....	32
TABLA 15. VALORES GLOBALES DE RENDIMIENTOS .....	39
TABLA 16. VALORES GLOBALES DE LCOE.....	39
TABLA 17. DEMANDA AGUA POTABLE .....	45
TABLA 18. DEMANDA DE REFERENCIA. [19].....	47
TABLA 19. DEMANDA ENERGÉTICA .....	49
TABLA 20. CONDICIÓN GRADOS -DÍA PARA ENFRIAMIENTO. ....	49
TABLA 21. GRADOS DÍA DE REFRIGERACIÓN.....	50
TABLA 22. VALORES DE DISEÑO CALEFACCIÓN Y REFRIGERACIÓN SEGÚN RITE .....	50
TABLA 23. TEMPERATURA PARA REFRIGERACIÓN .....	50
TABLA 24. TRANSMITANCIA TÉRMICA FACHADA.....	51
TABLA 25. TRANSMITANCIA TÉRMICA DE CUBIERTA.....	51
TABLA 26. TRANSMITANCIA TÉRMICA DE HUECOS .....	51
TABLA 27. TRANSMITANCIA TÉRMICA DEL SUELO .....	52
TABLA 28. CARGA POR CONDUCCIÓN EN VERANO.....	53
TABLA 29. CARGA POR RENOVACIÓN DE AIRE EN VERANO.....	53
TABLA 30. CARGA POR INFILTRACIÓN EN VERANO.....	54
TABLA 31. CARGA POR PERSONA. ....	54
TABLA 32. CARGA POR ILUMINACIÓN. ....	54
TABLA 33. DEMANDA DE REFRIGERACIÓN .....	55
TABLA 34. TEMPERATURA PARA CALEFACCIÓN.....	56
TABLA 35. CARGA DE CONDUCCIÓN DE LA VIVIENDA .....	56
TABLA 36. CONDICIÓN GRADOS/DÍA DE CALENTAMIENTO.....	57
TABLA 37. GRADOS DÍA DE CALEFACCIÓN .....	57
TABLA 38. RESUMEN CARGAS CONDUCTANCIA EN VIVIENDA.....	57
TABLA 39. CÁLCULO DE POTENCIA DE CALEFACCIÓN .....	58
TABLA 40. DEMANDA DE CALEFACCIÓN. ....	59
TABLA 41. DEMANDA ELECTRODOMÉSTICOS .....	61
TABLA 42. DATOS DE DISEÑO ÓSMOSIS INVERSA. ....	63
TABLA 43. POTENCIA DE BOMBA ÓSMOSIS INVERSA. ....	66
TABLA 44. COBERTURA DE OI .....	66
TABLA 45. ENERGÍA QUE INCIDE SOBRE UN METRO CUADRADO DE SUPERFICIE HORIZONTAL. TABLA 2 IDAE [26] .....	67
TABLA 46. DATOS PANEL HIBRIDO .....	68
TABLA 47. ENERGÍA ÚTIL SOLAR.....	69
TABLA 48. POTENCIA TÉRMICA PANELES PVT .....	71
TABLA 49. POTENCIA ELÉCTRICA PANELES PVT .....	72
TABLA 50. COBERTURA TÉRMICA DE PVT .....	72
TABLA 51. COBERTURA ELÉCTRICA DE PVT .....	73

TABLA 52. DATOS COLECTOR PARA ORC.....	74
TABLA 53. DATOS DE OPERACIÓN ORC .....	75
TABLA 54. POTENCIA ORC.....	76
TABLA 55. COBERTURA ELÉCTRICA ORC .....	76
TABLA 56. DATOS DE DISEÑO LIBRH2O.....	77
TABLA 57. POTENCIA CICLO DE ABSORCIÓN .....	78
TABLA 58. COBERTURA DE CICLO DE ABSORCIÓN .....	79
TABLA 59. PROPIEDADES DEL PELLETS. [36] .....	80
TABLA 60. POTENCIA DE CALDERA .....	81
TABLA 61. COBERTURA DE CALEFACCIÓN CALDERA.....	82
TABLA 62. COBERTURA ACS POR LA CALDERA.....	82
TABLA 63. POTENCIA DE TEG.....	84
TABLA 64. COBERTURA ELÉCTRICA TEG.....	85
TABLA 65. DATOS DE BATERÍA .....	85
TABLA 66. <i>PRODUCCIÓN MENSUAL. ESQUEMA A</i> .....	87
TABLA 67. RESUMEN DE POTENCIAS ESQUEMA A .....	88
TABLA 68. DATOS PANEL FOTOVOLTAICO .....	89
TABLA 69. POTENCIA DE PV .....	90
TABLA 70. COBERTURA ELÉCTRICA PV .....	90
TABLA 71. POTENCIA BOMBA DE CALOR.....	92
TABLA 72. COBERTURA CALEFACCIÓN BC.....	93
TABLA 73. COBERTURA REFRIGERACIÓN BC .....	93
TABLA 74. POTENCIA CALENTADOR ELÉCTRICO .....	94
TABLA 75. COBERTURA ACS POR CALENTADOR ELÉCTRICO .....	95
TABLA 76. <i>PRODUCCIÓN MENSUAL. ESQUEMA B</i> .....	97
TABLA 77. RESUMEN DE POTENCIAS ESQUEMA B .....	98
TABLA 78. PRECIOS DE EQUIPOS ESQUEMA A.....	106
TABLA 79. PRECIOS DE EQUIPOS ESQUEMA B.....	107
TABLA 80. PARÁMETROS PARA LCOW. ESQUEMA A .....	108
TABLA 81. COSTOS NIVELADOS DEL AGUA. ESQUEMA A.....	109
TABLA 82. PARÁMETROS PARA LCOH. ESQUEMA A.....	109
TABLA 83. COSTOS NIVELADOS DE CALEFACCIÓN. ESQUEMA A.....	110
TABLA 84. PARÁMETROS PARA LCOH. ESQUEMA B.....	111
TABLA 85. COSTOS NIVELADOS DE CALEFACCIÓN. ESQUEMA B.....	112
TABLA 86. PARÁMETROS PARA LCOC. ESQUEMA A.....	112
TABLA 87. COSTOS NIVELADOS DE REFRIGERACIÓN. ESQUEMA A .....	113
TABLA 88. PARÁMETROS PARA LCOC. ESQUEMA B.....	113
TABLA 89. COSTOS NIVELADOS DE REFRIGERACIÓN. ESQUEMA B .....	114
TABLA 90. PARÁMETROS PARA LCOE. ESQUEMA A .....	115
TABLA 91. COSTOS NIVELADOS DE ELECTRICIDAD. ESQUEMA A .....	116
TABLA 92. PARÁMETROS PARA LCOE. ESQUEMA B .....	117
TABLA 93. COSTOS NIVELADOS DE ELECTRICIDAD. ESQUEMA B .....	117
TABLA 94. PRECIOS DE ENERGÍA.....	118
TABLA 95. TIEMPO DE RETORNO ESQUEMA A.....	118
TABLA 96. TIEMPO DE RETORNO ESQUEMA B.....	118

## Índice de Figuras

FIGURA 1. SISTEMA DE POLIGENERACIÓN[6].....	1
FIGURA 2. ESQUEMA A DE POLIGENERACIÓN DOMESTICA .....	16
FIGURA 3 ESQUEMA B. VERANO.....	21
FIGURA 4. ESQUEMA B. INVIERNO .....	22
FIGURA 5. CONCEPTO EES .....	26



FIGURA 6. DEMANDA DIARIA DE CALEFACCIÓN Y REFRIGERACIÓN .....	60
FIGURA 7. DEMANDA MENSUAL DE CALEFACCIÓN Y REFRIGERACIÓN.....	60
FIGURA 8. SISTEMA ÓSMOSIS INVERSA .....	62
FIGURA 9. CAUDALES ÓSMOSIS INVERSA. ....	63
FIGURA 10. SISTEMA SOLAR TÉRMICO .....	67
FIGURA 11. CICLO ORGÁNICO RANKINE CON FUENTE SOLAR .....	73
FIGURA 12. CICLO DE REFRIGERACIÓN POR ABSORCIÓN.....	77
FIGURA 13. CALDERA DE BIOMASA.....	79
FIGURA 14. CONSUMO DE COMBUSTIBLE.....	81
FIGURA 15. TERMOGENERADOR ELÉCTRICO.....	83
FIGURA 16. PANELES FOTOVOLTAICOS.....	89
FIGURA 17. BOMBA DE CALOR MODO REFRIGERACIÓN.....	91
FIGURA 18. BOMBA DE CALOR MODO CALEFACCIÓN.....	91
FIGURA 19. CALENTADOR ELÉCTRICO .....	94

## 1. Introducción

La energía primaria está disponible en la naturaleza de diferentes formas [1] y algunas de ellas para su utilidad no necesitan procesos de transformación, sin embargo, la electricidad es la energía secundaria mayormente utilizada [2]. La energía se requiere para desarrollar actividades en áreas como la educación, salud, agricultura, producción de alimentos, suministro de agua, industria, residencial, etc. Los combustibles fósiles [2] han estado disponible a lo largo de los años, por esta razón las centrales eléctricas de suministro de energía lo utilizan para la generación de electricidad. El sector de la energía en todo el mundo está actualmente dominado por la generación de energía a gran escala a partir de centrales eléctricas de gran capacidad (cientos de MW).

El consumo de la energía ha aumentado constantemente durante las últimas tres décadas y esta tendencia seguirá en el futuro [3]. Por todo ello, las centrales eléctricas han aumentado sus producciones y el consumo de recursos, causando el agotamiento de los recursos limitados como los combustibles fósiles, daños al planeta, problemas políticos, sociales y la emisión de contaminantes como los gases de efecto invernadero [4].

La poligeneración es el proceso de integración del sistema y se considera como una posible solución de energía sostenible que puede utilizar múltiples combustibles con la entrega simultánea de varias productos energéticos [5]. Cuando se producen tres salidas desde una sola planta, tenemos un esquema de trigeneración, siendo las salidas de electricidad, refrigeración y calefacción. Cuando se producen múltiples utilidades en una sola planta a partir de uno o múltiples recursos, esa planta se denomina planta de multigeneración o poligeneración, como se muestra en la Figura 1. Además, se pueden usar varios combustibles alternativos para mejorar la utilización de los recursos a través de un cambio adecuado de combustibles convencionales.

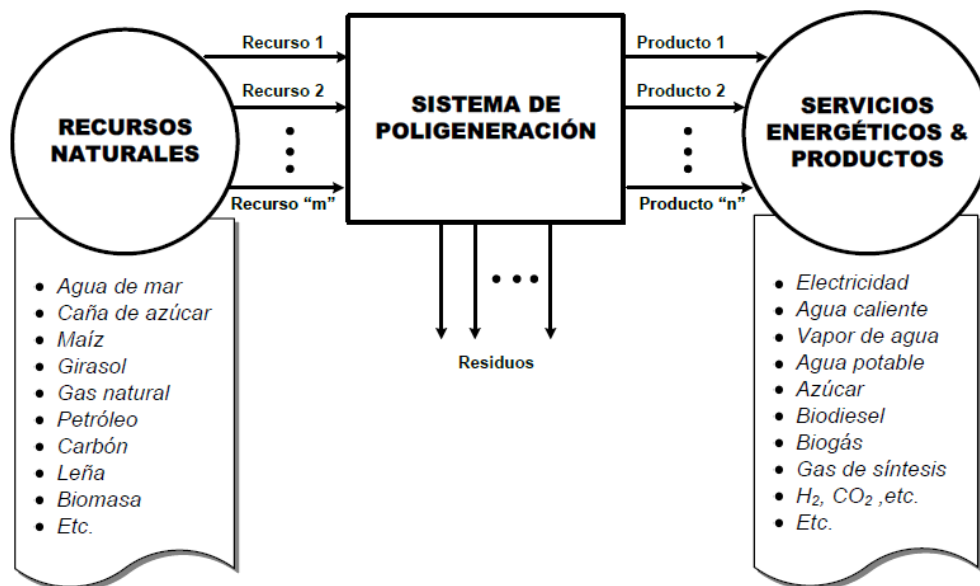


Figura 1. Sistema de Poligeneración[6]

La poligeneración adecuadamente diseñada aumenta la eficiencia energética, conserva los recursos, reduce las emisiones y los residuos, y aumenta el beneficio económico [7]. Aunque

## Introducción

La complejidad del sistema es mayor comparado con otros sistemas de generación. La poligeneración presenta varias ventajas, por ejemplo, la poligeneración basada en biomasa / solar reduce la huella de carbono, resuelve el problema de la escasez de recursos fósiles y aumenta la eficiencia energética en comparación con las unidades independientes. La poligeneración descentralizada en áreas remotas también aumenta el acceso de energía a la población rural [7]. Para el sistema a base de carbón, la poligeneración con captura y utilización de carbono es beneficiosa desde el punto de vista ambiental y económico [8].

La energía primaria es convertida en energía secundaria por un proceso de conversión utilizando dispositivos de conversión de energía, los dispositivos se seleccionan según las configuraciones, puntos de vista tecnológicos y socioeconómicos. Los sistemas de poligeneración para su óptima configuración dependen de los recursos utilizados a la entrada y características de las demandas requeridas.

Existen muchos proyectos enfocados a la generación de una demanda a partir de un recurso. La energía solar es una de las fuentes más prometedoras de energía alternativa [9]. Hoy en día, hay dos maneras diferentes de aprovechar la energía solar; convirtiendo la energía solar directamente en electricidad a través de paneles fotovoltaicos o calentando a través de colectores solares térmicos. Para las zonas donde no es posible el acceso a servicios públicos como el agua o electricidad, el enfocarnos en alternativas de recursos renovables da la oportunidad de poder innovar y ofrecer una mejor calidad de vida en zonas aisladas. Un diseño que pueda suplir las necesidades en zonas de difícil acceso en el caso de viviendas unifamiliares me motiva a aprender configuraciones y sistemas que mejor se adapten para el diseño.

La poligeneración engloba muchas configuraciones, utilizando recursos tanto renovables como no renovables. Dentro de todas las posibilidades de estudios con poligeneración, en este trabajo será con recursos de energía renovables. Por lo tanto, dos configuraciones han sido analizadas. En la primera, el recurso solar y biomasa se usa para suplir las necesidades de agua potable, agua caliente sanitaria, calefacción, refrigeración y electricidad. En la segunda, la energía solar es utilizada como único recurso para generar las demandas de la vivienda unifamiliar aislada anteriormente mencionadas para el primer caso.

Este trabajo de fin de máster tiene como objetivo realizar un análisis comparativo de estos dos esquemas de poligeneración doméstico para viviendas unifamiliares aisladas. Los diseños realizados deben cubrir las demandas de agua, calefacción, refrigeración y electricidad. El diseño de estos dos esquemas y su comparación ayuda a conocer mejor las posibilidades de implementación y optimización a viviendas con difícil acceso a la red, donde los costes económicos y ambientales son más elevados que en sistemas centralizados.

Se espera que este trabajo de fin de máster pueda servir de ejemplo para proyectos de poligeneración en viviendas unifamiliares aisladas, y referencia para futuros diseños enfocados a pequeña escala.

Este trabajo fin de máster lleva acabo una metodología de diseño de dos esquemas de poligeneración novedosos. Ello se constata de la recopilación de información y de investigaciones, proyectos, y estudios relacionados a la poligeneración. Los sistemas de poligeneración es mejor resolverlos por subsistemas para luego integrarlos y analizarlos. Por eso, en este trabajo de fin de máster los dos diseños (esquema A térmico y esquema B eléctrico), se dividen en subsistemas:

- Sistema de captación solar
- Sistema de desalinización por ósmosis inversa,

Introducción

- Sistema de agua caliente sanitaria
- Sistema de calefacción
- Sistema de refrigeración
- Sistema de electricidad

En cada subsistema la comprensión de su funcionamiento y tecnología ha sido posible por distintos trabajos de investigaciones publicados. A su vez, ciertos parámetros han sido utilizados de otros trabajos, como punto de partida para poder realizar los balances energéticos y exergéticos en cada subsistema.

Los dos esquemas de poligeneración tienen diferentes subsistemas, utilizan equipos y configuraciones distintas. En el esquema A (“todo térmico”) los equipos realizan la transformación de los recursos a utilidades principalmente al consumir calor. En el esquema B (“todo eléctrico”) los equipos consumen electricidad para realizar la transformación y cubrir con las demandas de la vivienda.

En el esquema A, el sistema de captación solar está compuesto por paneles híbridos fotovoltaicos-térmicos (PVT) que aportan calor al agua para su posterior uso. El sistema de desalinización por ósmosis inversa tiene una bomba de alta presión que se utiliza para aportar la presión en las membranas de ósmosis inversa. El sistema de agua caliente sanitaria incluye el tanque de almacenamiento solar que mantendrá el calor del agua para el uso en la vivienda. El sistema de calefacción su equipo principal es una caldera de biomasa, el sistema de refrigeración tiene un equipo de ciclo de refrigeración por absorción, su fuente de calor viene de la caldera de biomasa. El sistema de electricidad incluye un ciclo orgánico Rankine, paneles híbridos fotovoltaicos térmicos (PVT) y módulo de generador termoeléctrico.

En el esquema B, el sistema de captación solar y desalinización por ósmosis inversa, se ha mantenido igual que el esquema A. En el subsistema de calefacción y refrigeración el equipo principal es una bomba de calor reversible, en verano funciona como refrigeración y en invierno como calefacción. El sistema eléctrico está compuesto por paneles fotovoltaicos (PV).

En ambos esquemas se han realizado los cálculos de todas las corrientes de flujo de temperatura, presión, entalpía, y corrientes exergéticas. En algunos equipos se han utilizado como referencias parámetros presentados como resultados de otras investigaciones, que han sido de ayuda para poder resolver todas las ecuaciones en los modelos del EES.

Los resultados obtenidos en ambas configuraciones han sido llevados a cabo en el programa EES. Los valores obtenidos son importantes para realizar las comparaciones de los rendimientos energéticos de demanda y exergéticos. Las comparaciones son realizadas por gráficos y tablas, agrupados en Excel.

En cada esquema los precios de inversión varían según los equipos utilizados en la instalación. Para ambos esquemas de poligeneración se han estimado los cálculos de costes nivelados de las demandas (LCOx), siendo los productos el agua, calefacción, refrigeración y electricidad.

En este trabajo fin de máster se espera en las conclusiones y resultados que los esquemas diseñados cubran las demandas de la vivienda unifamiliar aislada, poder comparar cada esquema para un día de primavera, verano, otoño e invierno del año, y maneras de optimizar los equipos o configuraciones seleccionadas.

A nivel técnico en el proceso para realizar este trabajo de fin de máster, espero poder conocer nuevas tecnologías, configuraciones de los sistemas, innovar para futuras propuestas a proyectos que sean enfocados a zonas aisladas. Además, adquirir habilidades en creatividad y resolución de problemas, búsqueda de oportunidades en realizar proyectos de este tipo, e incluso presentando ideas en zonas que sea difícil el acceso de las utilidades básicas.

## 1.1 Objetivos

El objetivo de este trabajo fin de máster es el diseño óptimo de dos esquemas de poligeneración para una vivienda unifamiliar aislada. Los criterios de diseño para los dos esquemas son los siguientes: 1) cubrir 100% las demandas de la vivienda, 2) el esquema A es “todo térmico”, el esquema B “todo eléctrico”; y 3) no está contabilizada la acumulación eléctrica.

Las propiedades termodinámicas se calculan realizando balances energéticos en los dos esquemas para un día promedio de un mes de verano, otoño, invierno y primavera. Con los valores de las corrientes de flujo y tamaño de los equipos se calculan los rendimientos energéticos, exegéticos y costes de la instalación. Las ventajas y desventajas de ambos esquemas en el ámbito doméstico para una vivienda aislada se conocen al realizar el análisis de los resultados que son mostrados en forma gráfica y numérica.

El proceso de trabajo consta del estudio y el conocimiento de sistemas de poligeneración a pequeña escala, la obtención de datos de la demanda de la vivienda, la realización de cálculos de modelado en EES, el análisis de los resultados, la comparación de los resultados de los esquemas y, por último, unas conclusiones del análisis.

## 1.2 Descripción de la memoria

La presente memoria se divide en nueve capítulos, los cuales se han distribuido de la siguiente manera:

El primer capítulo aborda la introducción y objetivos del trabajo; el segundo recopila el estado del arte referente a trabajos de trigeneración y poligeneración, dependiendo de su fuente y el tipo de energía final; una tercera parte calcula y muestra las demandas de la vivienda, las cuales deben ser cubiertas por el diseño desarrollado en este trabajo; el siguiente bloque aborda una descripción de dos esquemas de poligeneración, que llamamos esquema A y esquema B y contiene una conceptual de los equipos que se utilizan en el diseño y los flujos identificados en cada proceso de ambos esquemas; le sigue un quinto capítulo con la metodología utilizada para la elaboración de este trabajo; una comparación de los resultados obtenidos de ambos esquemas en un sexto punto, seguido, finalmente del octavo y noveno capítulo que presentan las conclusiones y bibliografía utilizada para la elaboración de este trabajo.

## 2. Antecedentes y estado del arte

Antes de presentar el trabajo de campo realizado en este trabajo final de máster se presentan los proyectos y estudios realizados acerca de la misma temática. A continuación se presentan resultados de investigación relacionados con la poligeneración, con el fin de conocer las posibilidades de desarrollo de este ámbito de estudio y contribuir a futuras investigaciones.

En 2014, los autores Calise, Denticed'Accadia y Piacentino [10], realizaron una investigación sobre la integración de las fuentes de energía renovables y los sistemas de agua, presentando un nuevo sistema solar que produce simultáneamente: energía eléctrica, energía térmica, energía de refrigeración y agua doméstica. Este nuevo sistema está diseñado para pequeñas comunidades en países mediterráneos europeos, ricos en fuentes renovables y pobres en combustibles fósiles y recursos hídricos.

El sistema de poligeneración bajo análisis incluye PVT (colectores solares fotovoltaicos / térmicos), un sistema MED (destilación de efectos múltiples) para la desalinización, un LiBr / H<sub>2</sub>O (enfriador de absorción) de una etapa y componentes adicionales, como tanques de almacenamiento, dispositivos AH (calentadores auxiliares) y BOP (balance de planta). Este sistema fue simulado dinámicamente por TRNSYS.

Los autores señalados hacen referencia a que una validación completa del sistema en su conjunto no es posible porque, según el conocimiento de los autores, nunca se ha experimentado un prototipo similar. Sin embargo, todos los modelos de los componentes incluidos en los sistemas son muy confiables. Se desarrolló un estudio de caso numérico y ampliamente discutido, poniendo en evidencia el potencial significativo de ahorro de energía alcanzable por dicho sistema, también debido a la oportunidad de maximizar el factor de utilización de la energía térmica producida por concentración fotovoltaica / colectores térmicos (CPVT), especialmente durante el verano. Por otro lado, el desempeño en el invierno fue mucho menos satisfactorio, ya que las producciones térmicas y eléctricas de CPVT disminuyeron dramáticamente; como consecuencia, en tales períodos, un calentador auxiliar debe producir una gran cantidad de calor para impulsar el MED.

Los investigadores recomiendan prestar especial atención al diseño del sistema, a fin de maximizar el rendimiento energético y la rentabilidad económica del sistema. La relación óptima entre la capacidad de ACH del área del campo solar (a una capacidad MED constante) se encontró alrededor de 5.9 m<sup>2</sup>/kW; los volúmenes del tanque de almacenamiento deben ser relativamente pequeños (alrededor de 15 L por unidad de área de campo solar); las temperaturas de salida del campo solar deben ser alrededor de 85 ° C en verano y 55 ° C en invierno; y se debe utilizar un alto número de efectos (14) para la unidad MED.

En el 2014 también los investigadores Buonomano, Calise, Ferruzzi, y Vanoli [11] realizaron un trabajo donde presentan un análisis de una posible adaptación energética de un distrito hospitalario universitario ubicado en Nápoles (Italia), mediante el uso de un sistema innovador de poligeneración renovable. Este sistema integra las tecnologías de concentración fotovoltaica / colectores térmicos (CPVT) y las tecnologías de calefacción y refrigeración solar. Los datos relativos a las demandas y producciones de refrigeración, calefacción y electricidad se miden para una operación de un año. El CPVT produce electricidad, proporciona calor, que se utiliza para calentar espacios, para agua caliente doméstica y/o para impulsar el enfriador de absorción, que produce energía de refrigeración. El sistema está diseñado y simulado dinámicamente en el entorno TRNSYS, incluidos modelos matemáticos detallados y validados para la simulación de todos los componentes. Los resultados se analizan desde el punto de vista energético y económico, utilizando análisis paramétricos y optimizaciones

termoeconómicas. Los resultados también mostraron que el rendimiento del sistema se ve dramáticamente afectado por las condiciones climáticas, siendo pobre en invierno y excelente en verano.

Esta notable diferencia se debe básicamente a la dramática disminución de la disponibilidad de radiación en invierno. Las simulaciones dinámicas también demostraron la robustez de las estrategias de control implementadas en este trabajo. La optimización termoeconómica mostró que el rendimiento económico del sistema puede mejorarse aumentando la capacidad del campo solar y reduciendo los volúmenes de los tanques. Este sistema bajo investigación es excelente desde el punto de vista energético ya que la mayoría de la energía producida es utilizada por el usuario. Esta circunstancia se debe básicamente a la peculiaridad del usuario (Hospital del Distrito) que exige constantes y grandes cantidades de energía térmica, de refrigeración y eléctrica durante todo el año.

En el 2015 Calise, Denticed'Accadia, y Piacentino [12] como continuación del trabajo de investigación realizado en 2014, aplicaron un análisis exergético y exergoeconómico al sistema para investigar las principales fuentes de irreversibilidad y abordar los costos exergéticos del sistema. Analizaron un sistema de poligeneración renovable, que incluye un campo solar basado en colectores fotovoltaicos / térmicos parabólicos, un calentador de biomasa, un enfriador de absorción y una unidad de desalinización por destilación de efecto múltiple.

El análisis exergético está destinado a identificar los pasos que afectan principalmente a la eficiencia de la energía de la planta, a fin de proponer posibles mejoras. Una vez que se describen en detalle los modos de funcionamiento del sistema, se obtuvieron y discutieron los resultados en términos de eficiencia de exergía instantánea y destrucciones de exergía semanales en cada componente. Como se esperaba, las mayores destrucciones de exergía se producen en los colectores fotovoltaicos de concentración térmica y en el calentador auxiliar de biomasa. Además, las destrucciones de exergía relevantes se producen en la sección MED, donde solo una fracción muy baja de la entrada de exergía a través del agua caliente se convierte en exergía química del producto de agua desalada, como es habitual en los sistemas de desalinización térmica.

Tanto los análisis exergéticos como los exergoeconómicos se aplican a los valores integrales de los flujos de energía, comparando los resultados obtenidos en la temporada de verano e invierno. Finalmente, se discute la viabilidad económica del sistema en diferentes escenarios de contexto. Además, se demostró que el costo unitario de la energía suministrada a los usos de espacio de calefacción es mayor que el de la energía para el espacio de enfriamiento, debido a los niveles de irradiación mucho más bajos observados durante el período de invierno y, por consiguiente, la mayor incidencia, por unidad de energía, de capital de inversión. Finalmente, se realizó una comparación del costo unitario del flujo de energía del sistema de poligeneración renovable (RPS), considerando una serie de "escenarios de referencia"; al costo actual, el RPS resultó ser poco competitivo para reemplazar las opciones convencionales de suministro de agua y energía, lo que representa una solución económicamente viable solo para áreas desfavorecidas, como las islas pequeñas, donde dichos servicios generalmente se ofrecen a costos unitarios más altos.

En 2016, Soutulloa, Bujedob, Samaniego, et al. [13] analizan el rendimiento dinámico teórico de las tecnologías de poligeneración centralizadas utilizando redes de distritos como sistema de distribución. Se han estudiado tres ciudades españolas utilizando como variables de entrada los años meteorológicos típicos (TMY), construcciones locales representativas y cargas internas normativas para edificios residenciales y terciarios. La simulación de energía se ha llevado a cabo con el software TRNSYS. Se han desarrollado diferentes modelos

dinámicos que conectan tecnologías renovables y convencionales para representar el rendimiento térmico y eléctrico de una planta de poligeneración. El modelo térmico está compuesto por colectores solares térmicos ( $60 \text{ m}^2$ ), turbina del ciclo orgánico Rankine, tanques de almacenamiento de agua ( $4 \text{ m}^3$ ), calderas de biomasa, y sistemas de cogeneración alimentados por gas natural como respaldo cuando ambas tecnologías renovables no pueden suministrar las cargas del distrito térmico.

El modelo eléctrico se basa en el funcionamiento independiente de paneles fotovoltaicos y turbinas eólicas en combinación con celdas de combustible de membrana de electrolito polimérico (PEM) y producción eléctrica de los sistemas de cogeneración más el ciclo orgánico Rankine. Se han establecido límites de funcionamiento fijos para los paneles fotovoltaicos (600 kW), las turbinas eólicas (600 kW), el electrolizador (504 kW) y las células PEM (182 kW) para permitir la comparación entre tres ciudades. Se han evaluado tres configuraciones: PV + PEM, wind + PEM y PV + Wind + PEM. Los mejores resultados se han obtenido con la acción combinada de paneles fotovoltaicos, turbinas eólicas y células PEM. Estas tres configuraciones deben considerar la cobertura eléctrica provista por el modelo térmico. Se han evaluado dos casos. El caso 1 maximiza la contribución a las energías renovables y alcanza contribuciones renovables por encima del 90% en todas las ciudades. Caso 2 maximiza la contribución de la cogeneración y el funcionamiento combinado de calderas solares y de biomasa para cubrir aproximadamente el 50% de las demandas térmicas urbanas. Cuando este porcentaje es bajo (Caso 1), las fracciones eléctricas anuales dependen de los potenciales renovables de cada tecnología.

Las fracciones medias obtenidas por cada ciudad son: 35% en Oviedo, 64% en Sevilla y 38% en Zamora. Sin embargo, cuando este porcentaje es alto (Caso 2), las fracciones eléctricas anuales alcanzadas promediando las tres configuraciones son: 50% en Oviedo, 73% en Sevilla y 54% en Zamora. En ambos casos, la desviación media más alta se logra en Zamora debido a la gran diferencia entre el potencial solar y eólico.

En 2016, Mohan, Kumar, et al. [14] presentan un trabajo de investigación donde se modela y analiza un nuevo sistema de poligeneración solar térmica (STP) para la producción de refrigeración, agua limpia y agua caliente doméstica para las condiciones meteorológicas de los Emiratos Árabes Unidos (EAU). El sistema tiene colectores solares para la producción de energía térmica, enfriadoras de absorción LiBr-H<sub>2</sub>O (35 kW) de una etapa para proporcionar aire acondicionado a cabinas de oficinas y módulos de destilación de membrana (MD) para la producción de agua limpia junto con la generación de agua caliente doméstica como producto derivado.

El rendimiento de STP se analiza con tres colectores solares diferentes: colectores de placa plana (FPC), colector de tubo de vacío (ETC) y colector parabólico compuesto (CPC). El sistema se modela y se simula dinámicamente utilizando el software TRNSYS. La eficiencia combinada y del sistema del sistema STP se ha determinado para condiciones óptimas. Se analizan los beneficios económicos para diferentes colectores y ahorro de costos de combustible. STP con un campo colector de tubos de vacío con un área bruta de  $216 \text{ m}^2$  alcanza un período de recuperación más bajo de 6.75 años. El sistema STP tiene ahorros acumulativos de \$ 520,000 durante la vida útil del proyecto a través de la instalación del colector solar en el techo. Los resultados de simulación dinámica del sistema de poligeneración solar demuestran que las demandas de enfriamiento de los edificios considerados en el estudio se cumplen completamente con los tres tipos de colectores que tienen diferentes áreas de colectores. La optimización de los parámetros de diseño se lleva a cabo para maximizar el rendimiento energético y los beneficios económicos. El rendimiento del sistema de poligeneración se maximiza con los siguientes parámetros: Ángulo de



inclinación del colector a  $15^\circ$ , caudal al colector a 300 kg/h y volumen de almacenamiento de  $1 \text{ m}^3$ . Los resultados completos de la simulación del sistema STP se utilizan para el desarrollo, instalación y prueba de un sistema de poligeneración en RAKRIC. Parámetros clave como COP, productividad de destilados y eficiencias de cada componente integrado se consideran parámetros de validación. Las evaluaciones experimentales son coherentes con los resultados de simulación dinámica.

En 2016, Calise, Denticed' Accadia, Figaj, y Vanoli [15] presentan un diseño y una simulación dinámica de un novedoso sistema de calefacción y refrigeración solar extremadamente eficiente. Se desarrolló un estudio de caso base para el sistema, utilizando datos meteorológicos de meteonorm en Nápoles, sur de Italia. El edificio incluye un techo plano y 4 zonas. El piso y el techo de la casa tienen una superficie de  $100 \text{ m}^2$  y la altura es de 2,70 m; el área acristalada por cada fachada es de  $3,60 \text{ m}^2$ . El diseño del sistema es desarrollado con el software TRNSYS, que incluye todos los componentes necesarios para operar el sistema (mezcladores, válvulas, controladores, intercambiadores de calor, tanques, colectores, etc.). El diseño general de la planta está diseñado para suministrar electricidad, calefacción (Bomba de calor) y refrigeración (Ciclo de Adsorción) de espacios y agua caliente doméstica para un pequeño edificio residencial.

La calefacción y el enfriamiento del espacio del sistema y las demandas de agua caliente doméstica se calculan sobre la base de modelos de simulación detallados de un edificio específico, desarrollado en TRNBUILD, incluido en el paquete TRNSYS. Los resultados mostraron una eficiencia energética total del PVT del 49%, un coeficiente de rendimiento anual de la bomba de calor para el modo de calefacción por encima de 4 y un coeficiente de rendimiento del enfriador de adsorción de 0,55. La energía eléctrica producida por el campo PVT es totalmente consumida por los usuarios del sistema, mientras que la energía térmica se utiliza principalmente para suministrar la bomba de calor asistida por energía solar, en invierno, y el enfriador de adsorción, en verano, y de forma secundaria para producir ACS. Los resultados de la simulación dinámica mostraron que: la energía térmica de PVT está fluctuando debido a la radiación externa y la temperatura, por lo tanto, un sistema auxiliar es siempre obligatorio para satisfacer la demanda de ACS y de refrigeración del espacio; en el verano, la combinación de PVT y una enfriadora de adsorción permite maximizar la utilización de la energía solar porque no se disipa la energía térmica producida por el PVT; la utilización de la energía solar térmica producida es de alrededor del 83%; el rendimiento energético y económico del sistema es mejor en localidades con alta disponibilidad de irradiancia, como Nápoles y Palermo, el sistema puede no ser rentable sin incentivo, se volvió rentable con un subsidio de inversión de capital del 50%, para el caso base, el rendimiento óptimo del sistema en términos de rentabilidad económica se logra con un área de recolección de  $24,25 \text{ m}^2$ .

En 2017, Cioccolanti, Villarini, Tascionu y Bocci [16] realizan una evaluación del desempeño del sistema integrado a pequeña escala para evaluar la factibilidad potencial de dicho sistema para aplicaciones residenciales. Para conocer el potencial se ha hecho una simulación de  $50 \text{ m}^2$  de captación de colectores de concentrador solar, 3,5 kW<sub>e</sub> ORC y 17,6 kW<sub>c</sub> en un ciclo de absorción para satisfacer las demandas de calefacción, electricidad y refrigeración para uso residencial. Su investigación es basada en una planta prototipo y la simulación de todo el sistema ha sido realizada en TRNSYS 17. Se analizó un modelo mejorado de una planta de trigeneración solar y su rendimiento se comparó con el de un modelo anterior. El comportamiento dinámico de la planta se ha obtenido mediante un modelo de simulación y se ha evaluado de forma anual, mensual y diaria. El análisis muestra que el sistema integrado puede funcionar durante más de 2500 horas / año, lo que genera una cantidad significativa de energía eléctrica y térmica. Debido a las altas temperaturas de operación, la eficiencia de conversión de CPC es baja pero, por otro lado, permite obtener una buena eficiencia eléctrica

Antecedentes y estado del arte

de la ORC también en invierno. A pesar de la mayor temperatura de entrada en el expansor, en verano, la eficiencia eléctrica de la unidad ORC es <3.2% debido a la operación del absorbedor. La importante capacidad de los tanques de almacenamiento permite extender sensiblemente el funcionamiento de la unidad ORC y el absorbedor, y permitir su funcionamiento cuando la radiación solar es baja. En general, en los resultados se ha obtenido un rendimiento más realista de cada subsistema analizado. Comparando la unidad de prototipo, el análisis muestra que el diseño del sistema integrado es adecuado, pero existe posibilidades para mejorar el rendimiento del sistema. Tales sistemas integrados de trigeneración son de hecho complejos y demasiado costosos a pequeña escala. Por lo tanto, es fundamental que los sistemas operen el mayor tiempo posible con buenas eficiencias generales de conversión. Los autores planean seguir investigando en el futuro la influencia de diferentes estrategias de control y parámetros operativos para proporcionar contribuciones interesantes a la optimización de un sistema prototipo real.

La mayoría de estos estudios presentados es para plantas de poligeneración de mediana o gran escala. Proyectos de poligeneración a pequeña escala que sean muy eficientes y económicos siguen siendo un reto. Dentro de este contexto, no se ha presentado proyectos en lo que se comparen dos esquemas de poligeneración en viviendas unifamiliares aisladas, el cual un esquema este enfocado a energía térmica de solar y biomasa, y un enfoque eléctrico, en energía solar fotovoltaica. Este trabajo de fin de máster diseña ambos esquemas y los compara para conocer el diseño óptimo por sus rendimientos energéticos, rendimiento exergéticos y sus costes nivelados.

### 3. Demandas

El objetivo de este trabajo de fin de máster es cubrir las demandas energéticas de una vivienda unifamiliar aislada, pero antes es preciso conocer las demandas de esta vivienda, con el fin de ofrecer un diseño que tenga una cobertura del 100% para cada demanda del inmueble.

Los valores han sido tomados de estudios estadísticos o calculados por métodos que han sido comparados con los estadísticos.

Las demandas de la vivienda se dividen en cuatro:

- Agua potable
- Calefacción
- Refrigeración
- Electricidad

#### 3.1 Agua potable

El Instituto Nacional de Estadística [18] proporciona los valores de demanda de agua potable para una vivienda unifamiliar para alojar a cuatro personas. El consumo por persona y día es de 132 litros, lo que se sitúa en 580,8 l/día para una familia. El agua potable se utiliza principalmente para consumo humano, preparación de alimentos, otros usos y agua caliente sanitaria (ACS).

Los cálculos para el ACS están en los anexos, son obtenidos por el código técnico de edificación [17] el cual recomienda el consumo de ACS de 28 l/persona-día y para la vivienda 112 l/día.

La cobertura del agua potable del 100% está basada en la producción mínima de 580,8 l/día.

### 3.2 Calefacción

La vivienda seleccionada tiene un área de 100 m<sup>2</sup> y está ubicada en la zona de Tarragona. El gasto en calefacción se calcula por el método de grados/día para un día del mes de invierno y se aproxima a los valores por el IDAE. Los cálculos detallados se pueden ver en los *anexos: Cálculo de las demandas*. Además se compara con una metodología de corrección de factor por instaladores de equipos de calefacción.

El promedio de horas de calefacción de un hogar unifamiliar es de 960 h/año. Se distribuyó esa cantidad de una manera mensual por día, dependiendo de los meses más fríos y menos fríos como se muestra en la Tabla 1.

<b>Demanda de Calefacción</b>				
<b>Mes</b>	<b>horas</b>	<b>días</b>	<b>kWh/día</b>	<b>kWh/mes</b>
Enero	8	31	98,24	3045,44
Febrero	6	28	73,68	2063,04
Marzo	1	31	12,28	380,68
Abril	0,78	30	9,5784	287,352
Mayo	0,5	31	6,14	190,34
Junio	0	30	0	0
Julio	0	31	0	0
Agosto	0	31	0	0
Septiembre	0,5	30	6,14	184,2
Octubre	1	31	12,28	380,68
Noviembre	6	30	73,68	2210,4
Diciembre	8	31	98,24	3045,44
<b>Total</b>				<b>11.787,57</b>

Tabla 1. Demanda de calefacción.

### 3.3 Refrigeración

La demanda de refrigeración se calcula por el método de grados/día de refrigeración (los cálculos detallados están en los *anexos: Cálculo de las demandas*). En este trabajo, los días que se utiliza la refrigeración serán para los meses de verano (junio, julio, agosto). En método de grados/día para refrigeración se ha comparado con valores estadísticos del Instituto para la Diversificación de Energía, y por el cálculo de pérdidas por cargas térmicas en la vivienda.

El valor de la potencia a refrigerar es de 3 kW. A este valor se estima 8 h de uso diario para los tres meses de verano como se muestra en la Tabla 2. Dando un total de 2208 kWh/año.

<b>Demanda de Refrigeración</b>				
<b>Mes</b>	<b>horas</b>	<b>días</b>	<b>kWh/día</b>	<b>kWh/mes</b>
Enero	0	31	0	0
Febrero	0	28	0	0
Marzo	0	31	0	0
Abril	0	30	0	0
Mayo	0	31	0	0
Junio	8	30	24	720
Julio	8	31	24	744
Agosto	8	31	24	744
Septiembre	0	30	0	0
Octubre	0	31	0	0
Noviembre	0	30	0	0
Diciembre	0	31	0	0
<b>Total</b>				<b>2.208</b>

Tabla 2. Demanda de refrigeración

### 3.4 Electricidad

La demanda eléctrica de la vivienda se basa en los porcentajes dados en el Informe Proyecto SECH-SPAHOUSEC. Utilizando 6 kWh/día que se distribuyen de la siguiente manera

Descripción	%	kWh/día
<b>Frigoríficos</b>	29%	1,734
<b>congeladores</b>	11%	0,648
<b>Lavadoras</b>	11%	0,66
<b>Lavavajillas</b>	7%	0,396
<b>Secadoras</b>	4%	0,24
<b>Horno</b>	8%	0,474
<b>Tv</b>	12%	0,744
<b>Ordenadores</b>	7%	0,426
<b>Stand-by</b>	9%	0,546
<b>Otro equipamiento</b>	2%	0,132
	100%	6

*Tabla 3. Demanda electrodomésticos*

## Demandas

Demanda de la Vivienda											
	Eléctrica kWh/día	ACS kWh/día	Calefacción kWh/día	Refrig. kWh/día	Agua Potable l/día	días al mes	Eléctrica kWh/mes	ACS kWh/mes	Calefacción kWh/mes	Refrig. kWh/mes	Agua Potable l/mes
<b>Enero</b>	6	6,005	98,22	0	580,8	31	186	186,155	3044,82	0	18004,8
<b>febrero</b>	6	6,135	73,66	0	580,8	28	168	171,78	2062,48	0	16262,4
<b>Marzo</b>	6	6,07	12,28	0	580,8	31	186	188,17	380,68	0	18004,8
<b>Abril</b>	6	5,94	9,576	0	580,8	30	180	178,2	287,28	0	17424
<b>mayo</b>	6	5,81	6,138	0	580,8	31	186	180,11	190,278	0	18004,8
<b>junio</b>	6	5,406		24	580,8	30	180	162,18	0	720	17424
<b>julio</b>	6	5,08		24	580,8	31	186	157,48	0	744	18004,8
<b>agosto</b>	6	5,067		24	580,8	31	186	157,077	0	744	18004,8
<b>septiembre</b>	6	5,093	6,138	0	580,8	30	180	152,79	184,14	0	17424
<b>octubre</b>	6	5,458	12,28	0	580,8	31	186	169,198	380,68	0	18004,8
<b>noviembre</b>	6	5,719	73,66	0	580,8	30	180	171,57	2209,8	0	17424
<b>diciembre</b>	6	6,057	98,22	0	580,8	31	186	187,767	3044,82	0	18004,8
<b>Total</b>	72	67,84	390,172	72	6969,6	365	2190	2062,477	11784,978	2208	211992

Tabla 4. Demandas totales de la vivienda

En la Tabla 4 se muestran las demandas que deben cubrir los esquemas, resumidas en diarios y mensuales. Los días de calefacción se han dividido en 273 días y los de refrigeración en 92.

## 4. Descripción de la instalación

Se han diseñado dos esquemas de poligeneración para una vivienda unifamiliar aislada con un área de 100m<sup>2</sup> localizada en la ciudad mediterránea de Tarragona. Ambos esquemas tienen como objetivo cubrir las demandas de agua potable, agua caliente sanitaria, calefacción, refrigeración y electricidad de la vivienda.

El esquema A está basado en tecnologías que consumen calor para cubrir las demandas. La fuente principal de este esquema térmico es la energía solar y la biomasa. El esquema B está basado en tecnologías que consumen electricidad para cubrir las demandas y tiene en la energía solar la principal fuente de este esquema eléctrico. Ambos esquemas necesitan de equipos para transformar los recursos naturales en la energía final que requiere la vivienda unifamiliar aislada. Además, hay que tener en cuenta que cada equipo tiene horas de funcionamiento distintas, y que en este diseño los cálculos finales están en un período estacional.

Ambos esquemas de poligeneración se pueden dividir en subsistemas siendo seis:

- Sistema de desalinización por ósmosis inversa
- Sistema de captación solar
- Sistema de agua caliente sanitaria
- Sistema de calefacción
- Sistema de refrigeración
- Sistema eléctrico

A continuación se explica cada subsistema del esquema A y esquema B para el diseño de la vivienda unifamiliar aislada.

### 4.1 Esquema A

En la Figura 2 se muestra el diagrama general del esquema A, basado en un sistema solar y de biomasa para cubrir las demandas de agua potable, electricidad, agua de consumo sanitario, calefacción y refrigeración de una vivienda unifamiliar aislada. En este esquema se puede ver los principales equipos utilizados en el diseño, la integración de los sistemas, y la dirección de las corrientes de flujos. Cada equipo está identificado por una enumeración romana (Tabla 5) y las corrientes de flujos por números. Los valores de los flujos han sido calculados por balances de energía y exergía, los resultados de estos balances se encuentran en los *anexos: Valores termodinámicos calculados*.

I Panel fotovoltaico térmico	XII Caldera de biomasa
II Bomba 1	XIII Termogenerador Eléctrico
III Tanque Solar	XIV Generador 2
IV Colector Solar	XV Condensador 2
V Generador 1	XVI Válvula 1
VI Bomba 2	XVII Evaporador 2
VII Turbina de Vapor	XVIII Absorbedor
VIII Condensador 1	XIX Bomba 4
IX Bomba 3	XX Intercambiador
X Membrana Ósmosis inversa	XXI Válvula 2
XI Tanque agua potable	XXII Batería

Tabla 5. Lista de equipos Esquema A



Descripción de la instalación

**ESQUEMA A**

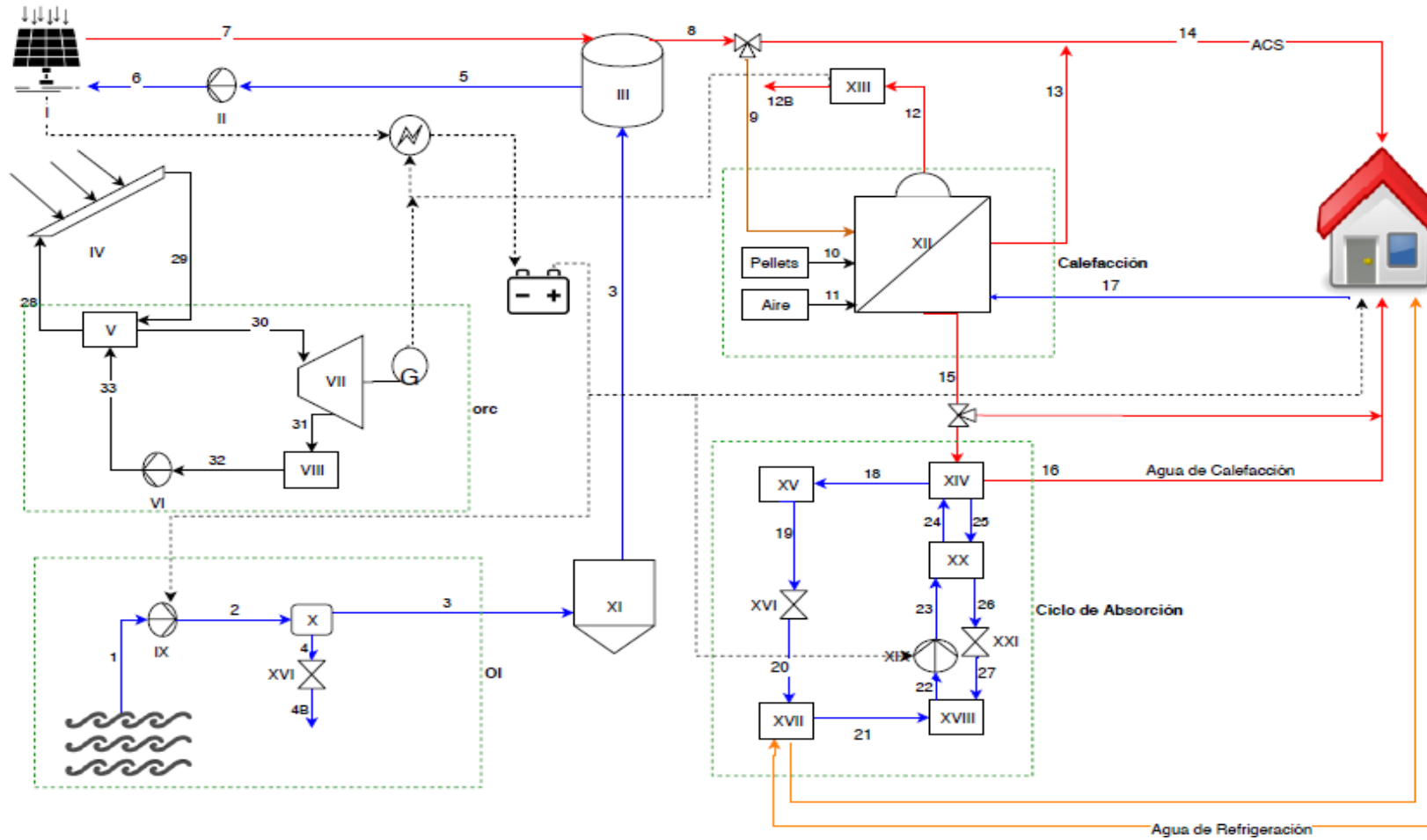


Figura 2. Esquema A de Poligeneración doméstica

#### 4.1.1 Sistema de desalinización por ósmosis inversa

El sistema de desalinización por ósmosis inversa (OI) es un proceso que se obtiene agua potable del agua de mar. La ósmosis inversa consiste en hacer pasar por la membrana semipermeable (X) el agua desde el lado donde está la solución más concentrada (agua de mar) (1), hacia el lado contrario. En este proceso solo se transfiere el agua, quedando fuera las sales (3). Para realizar este proceso se requiere energía en forma de presión, la cual deberá ser superior a la presión osmótica que atraviesa la membrana. Este sistema de ósmosis inversa se conecta al suministro eléctrico para hacer funcionar la bomba a alta presión (IX) que proporcionará la presión necesaria para el proceso.

El agua de mar tiene una salinidad de 35000 ppm y su temperatura cambia según la estación del año. En la Tabla 6 se muestran las características de la membrana y la bomba de alta presión que se utilizará para la producción de agua potable con una salinidad de 100 ppm.

El caso en el que estamos trabajando es una vivienda aislada, por lo que, como criterio de diseño, el uso del sistema de desalinización será de una producción de dos días. La producción del agua utiliza dos membranas semipermeables para lo que la reserva será en un tanque de almacenamiento (XI) de 1200 litros. Con ello, esta producción tendrá un consumo eléctrico de la bomba de 7,7 kWh. Al no tener recuperador de presión la energía específica es de 6,629 kWh/m<sup>3</sup>.

Datos Ósmosis inversa	
Ratio de Recuperación de la membrana (Y)	10%
Rechazo de sales	99,4%
Caída de presión del modulo	(1 bar) (100 kpa)
Presión máxima aplicada	(6,9Mpa)
Máximo flujo de alimentación	6 gpm (1,4 m <sup>3</sup> /h)
máximo flujo de permeado (q <sub>p1</sub> )	150 gpd (0,6 m <sup>3</sup> /d)
Potencia de la Bomba	2,2 kW

Tabla 6. Datos de diseño Ósmosis inversa

#### 4.1.2 Sistema de captación solar

El sistema de captación solar aprovecha la energía solar para transformarla en calor y ese calor se utiliza para calentar el agua. Este sistema tiene como equipo principal los paneles híbridos fotovoltaico-térmicos (PVT) (I). En total, se instalan tres paneles. En la Tabla 7 se muestran las características del panel utilizado. El área total de captación es de 4,71 m<sup>2</sup> y su inclinación y orientación es 45° al sur.

El fluido caloportador está en un circuito cerrado que se mueve por una bomba (II), la energía en forma de calor es transferida al fluido (7), este fluido por medio de un intercambiador de calor calienta el agua del tanque de acumulación solar (III) que será utilizada para el agua caliente sanitaria (8). Las horas de funcionamiento de este sistema es acorde a la cantidad

## Descripción de la instalación

promedio de sol en esa zona. La caldera de biomasa es auxiliar para cubrir la demanda de agua caliente sanitaria ya que la cobertura solar de los colectores es de 74%.

Datos del Panel Híbrido	
Área total	1,65 m <sup>2</sup>
Rendimiento Óptico $\eta_0$	0,59
Coeficiente Pérdidas Térmicas, $a_1$	3,3 $\frac{W}{m^2K}$
Coeficiente Pérdidas Térmicas, $a_2$	0,018 $\frac{W}{m^2K^2}$
$P_{mpp}$	260 W
$I_{modMpp}$	8,59 A
$V_{modMpp}$	31,44 V

Tabla 7. Datos panel híbrido

#### 4.1.3 Sistema de agua caliente sanitaria

Al pasar por el proceso de desalinización y obtener agua potable, una fracción del agua será utilizada para el agua caliente sanitaria. Se estima una temperatura de 1°C mayor a la del agua de mar, después de pasar el proceso de desalación. El tanque de almacenamiento solar (III) es el encargado de calentar el agua por la transferencia de calor por el sistema de captación. El volumen del tanque es de 325 litros y la extracción del agua caliente para su consumo es por la parte superior. Se utiliza una válvula de tres vías para controlar la temperatura de uso final de ACS. Si la temperatura en la extracción del tanque es de 55°C se dirige directamente a la vivienda (14), mientras que en el caso de no llegar a la temperatura de demanda, el agua (9) se dirige a la caldera auxiliar (XII), que aportara el calor faltante para llegar a la cobertura del usuario.

#### 4.1.4 Sistema de calefacción

El sistema de calefacción está compuesto principalmente por una caldera de biomasa (XII), que utiliza pellets como combustible. El consumo de la caldera varía según la cantidad de uso y la temperatura del aire del ambiente para la combustión. Hay que tener en cuenta que los mayores consumos se muestran en el invierno.

En primer lugar se calentará el agua, que recorrerá la vivienda por medio de radiadores y transferirá el calor a los espacios a calefactar. La caldera tiene una potencia de 15 kW, de los cuales 12 kW son para el uso de calefacción en los meses de invierno y 3 kW para auxiliar en el agua caliente sanitaria. La caldera funciona todos los meses del año, ya que durante los meses de verano aportará el calor necesario para el funcionamiento del generador del sistema de refrigeración por absorción.

#### 4.1.5 Sistema de refrigeración

El equipo principal utilizado en el sistema de refrigeración es un ciclo de absorción de  $\text{LiBr-H}_2\text{O}$ . Este equipo, por medio de transferencia de calor, absorbe el calor del área caliente de la vivienda para así refrigerarla. La potencia en el evaporador es de 3,045kW y en el generador de 4,2 kW, siendo un COP de 0,725.

La caldera de biomasa aporta la potencia de calor en el generador, el cual se considera una fuente de energía renovable para el proceso de refrigeración. Tomamos la caldera como una fuente renovable, ya que utiliza biomasa y no combustibles fósiles. Se ha tomado en cuenta el consumo eléctrico en la bomba (XIX), siendo menor a 0,5kW.

#### 4.1.6 Sistema eléctrico

El sistema eléctrico se encuentra compuesto por los paneles híbridos fotovoltaico-térmicos (PVT), con una potencia pico de 702 W y un área total de captación de 4,71 m<sup>2</sup>. Sus horas de funcionamiento y producción son las horas solares pico en esa zona climática.

La fuente de generación de un ciclo Rankine orgánico (ORC) es por colectores solares, de los cuales existen 23 colectores y un área de captación de 60m<sup>2</sup>. Este sistema se ha enfocado a diciembre, considerado como peor mes, y si en este caso se cubre la demanda, se da por hecho que también se cubrirá el resto de meses. Para diciembre, por tanto, la potencia eléctrica es de 3,90 kW.

Otro equipo que contribuye aprovechando los gases de escape de la caldera de biomasa es el generador termoeléctrico, o por sus iniciales en inglés TEG, (thermoelectric generator). Por el diferencial de temperatura del lado caliente, proporcionado por los gases de escape de la caldera de biomasa y el lado frío por agua, genera una corriente eléctrica.

La potencia máxima generada por un módulo compuesto por 4 TEG es de 5W. Se trata de un sistema con posibilidades de investigación y desarrollo, y que en este equipo se ha utilizado para conocer su influencia en el diseño. En el almacenamiento de la energía eléctrica se utilizan tres baterías de 1800 Ah y las descargas no serán mayor al 50%. Para el uso de la electricidad también se incluye un inversor y reguladores que distribuyen la energía eléctrica a los equipos que necesitan para su funcionamiento y el consumo en el hogar.

Los consumos eléctricos se pueden clasificar en:

- Demanda eléctrica de la vivienda
- Funcionamiento de la bomba de ósmosis inversa
- Funcionamiento de la bomba del ciclo de absorción
- Funcionamiento de la caldera
- Funcionamiento de la bomba del ciclo orgánico Rankine

## 4.2 Esquema B

En las figuras 3 y 4 se muestran los diagramas generales del esquema B eléctrico, basado en un sistema solar para producir agua potable, electricidad, agua de consumo sanitario, calefacción y refrigeración de una vivienda unifamiliar aislada. Este esquema B utiliza una bomba de calor reversible, que en invierno está en modo de calefacción y en verano en modo de refrigeración.

En este esquema B se pueden ver los principales equipos utilizados en el diseño, la integración de los sistemas y la dirección de las corrientes de flujos. Cada equipo está identificado por una enumeración romana (Tabla 8) y las corrientes de flujos por números. Los valores de los flujos han sido calculados por balances de energía y exergía, los resultados de estos balances se encuentran en los *anexos: Valores termodinámicos calculados*.

I Panel fotovoltaico térmico	VIII Calentador eléctrico
II Bomba 1	IX Compresor
III Tanque Solar	X Condensador
IV Panel Fotovoltaico	XI Válvula
V Bomba 2	XII Evaporador
VI Membrana Ósmosis Inversa	XIII Batería
VII Tanque agua potable	

Tabla 8. Lista de Equipos Esquema B

Descripción de la instalación

**ESQUEMA B. MODO VERANO**

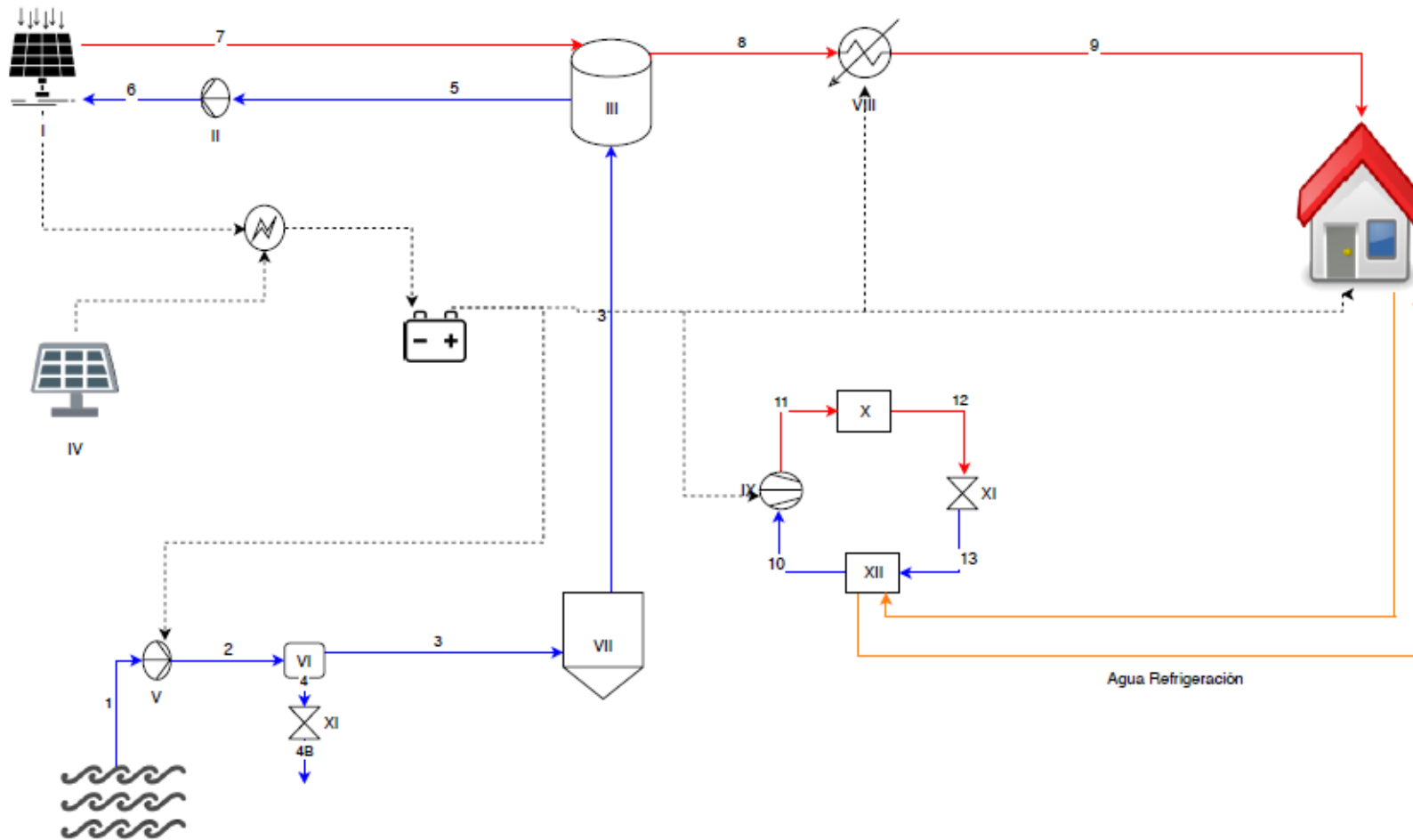


Figura 3 Esquema B. Verano

Descripción de la instalación

**ESQUEMA B. MODO INVIERNO**

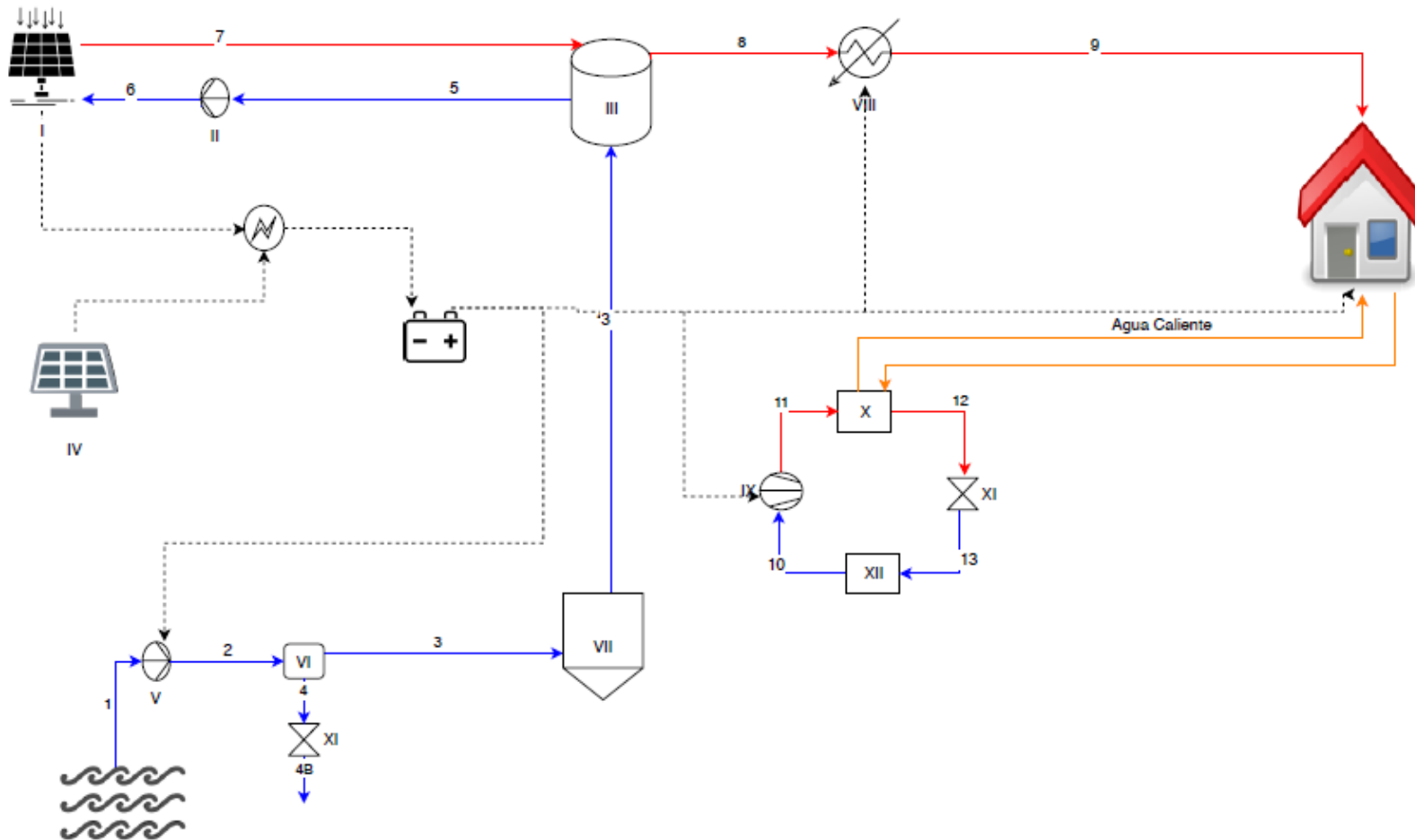


Figura 4. Esquema B. Invierno

#### 4.2.1 Sistema de desalinización por ósmosis inversa

Para este esquema B eléctrico, el sistema de desalinización por ósmosis inversa es igual al descrito en el esquema A.

#### 4.2.2 Sistema de captación solar

Para este esquema B eléctrico, el sistema de captación solar es igual al descrito en el esquema A.

#### 4.2.3 Sistema de agua caliente sanitaria

El sistema de agua caliente sanitaria es muy parecido al esquema A. Los valores de temperatura y el volumen del tanque de acumulación son los mismos que los mencionados en la sección del esquema A. El agua que se extrae por la parte superior del tanque de almacenamiento, en el caso que la temperatura en la extracción del tanque sea de 55°C, se dirige directamente a la vivienda (9).

En el caso de no llegar a la temperatura de demanda, se utiliza un calentador eléctrico (VIII) que aportará el calor faltante para llegar a la cobertura del usuario. En este caso, la potencia del calentador eléctrico es de 3 kW. La frecuencia de uso del calentador eléctrico es mayor para meses de invierno, mientras que en los meses de primavera y otoño disminuye. En el verano es prácticamente cero, ya que los paneles híbridos fotovoltaicos-térmicos (PVT) cubren la demanda de agua caliente sanitaria en esos meses y no es necesario utilizar el calentador eléctrico. La conexión eléctrica de la instalación es la fuente de energía para el funcionamiento del calentador.

#### 4.2.4 Sistema de calefacción

El sistema de calefacción está compuesto principalmente por una bomba de calor. La potencia de la bomba es de 12 kW para calefactar las zonas de la vivienda en los meses de invierno. La potencia calorífica o el coeficiente de operación de este equipo es de 4,9, y el sistema eléctrico de la instalación en la vivienda aislada es la fuente de energía eléctrica. Esta bomba de calor tiene la configuración de agua/agua y se usará todos los meses del año, con mayor frecuencia en invierno, ya que son los meses con mayor demanda para la calefacción.

#### 4.2.5 Sistema de refrigeración

El sistema de refrigeración está compuesto principalmente por una bomba de calor, la misma que en el sistema de calefacción, solo que cambiando su configuración a 'modo verano'. La potencia calorífica de esta bomba es de 3 kW para refrigerar las zonas de la vivienda en los meses de verano. El coeficiente de operación de este equipo para modo verano es de 3 y el sistema eléctrico de la instalación en la vivienda aislada es la fuente de energía eléctrica.



#### 4.2.6 Sistema eléctrico

El sistema eléctrico se encuentra compuesto por los paneles híbridos fotovoltaico-térmicos (PVT), con una potencia pico de 702 W y un área total de captación de 4,71 m<sup>2</sup>. Los paneles fotovoltaicos (PV) presentan una potencia pico de 13,82 kW y un área de captación de 94 m<sup>2</sup>. Este sistema se ha enfocado a diciembre, considerado el peor mes, con lo cual, si se cubre la demanda de ese mes se cubrirá la del resto de meses del año.

Sus horas de funcionamiento y producción son las horas solares picos en esa zona climática. En el almacenamiento de la energía eléctrica se utilizan 8 baterías de 1800 Ah, donde las descargas no serán mayor al 50%. Para la distribución de la electricidad se incluye un inversor y reguladores, que distribuyen la energía eléctrica a los equipos que necesitan para su funcionamiento y el consumo en el hogar.

Los consumos eléctricos se pueden clasificar en:

- Demanda eléctrica de la vivienda
- Funcionamiento de la bomba de ósmosis inversa
- Funcionamiento de la bomba de calor
- Funcionamiento del calentador eléctrico

## 5. Metodología

El objetivo de este trabajo de fin de máster es la realización y comparación de dos esquemas de poligeneración en el ámbito doméstico utilizando energías renovables en una vivienda unifamiliar aislada. Se proponen cubrir las demandas de agua potable, agua caliente sanitaria, calefacción, refrigeración y electricidad.

En este capítulo se expondrá la metodología utilizada con un enfoque secuencial típico, de un análisis configuracional de estos esquemas integrados.

Las tareas llevadas a cabo en la realización de este trabajo final de máster son las siguientes:

- Estudio y conocimiento de los sistemas de poligeneración
- Obtención de datos de demanda de la vivienda
- Realización de cálculos modelados en el EES
- Análisis de los resultados

### 5.1 Estudio y conocimiento de los sistemas de poligeneración

En las primeras jornadas de trabajo se ha investigado sobre proyectos en los sistemas de poligeneración, los cuales existen con enfoques de distintas configuraciones. Estas investigaciones ayudaron a familiarizarse con la situación actual de los sistemas de poligeneración. Se ha acudido a numerosas fuentes de proyectos a gran escala para documentar este proyecto, si bien muy pocos están enfocados a una potencia limitada como, es el enfoque de este trabajo.

Una vez finalizada la búsqueda de información sobre sistemas de poligeneración, se procede a investigar cada subsistema que compone el sistema de poligeneración. El esquema A, se investiga sobre sistema de agua potable, sistema de captación solar con paneles híbridos fotovoltaicos-térmicos (PVT), el tipo de caldera de biomasa, los ciclos orgánicos Rankine, ciclo de absorción para refrigeración. En el esquema B, el sistema de agua potable y captación solar se utilizó la misma información utilizada en el esquema A, con una bomba de calor agua/agua que es utilizada para la calefacción y refrigeración. En ambos esquemas se recogió información de diseño para los equipos, ya que es necesaria para modelar los cálculos en el EES y los análisis.

Los resultados de distintas investigaciones se basan en valores experimentales o teóricos. Los dos esquemas se han podido realizar con la ayuda de toda la información presentada en trabajos de investigación. Los parámetros calculados en los modelos se han comparado con otras investigaciones para aproximar el diseño a los realizados en distintos proyectos. El esquema A y el B, se diseñan por módulos, siendo cada subsistema un módulo. El sistema de poligeneración se analiza al integrar todos los módulos.

En las figuras 2,3 y 4 se muestra un esquema conceptual, con entradas y salidas de corriente, realizado una vez asegurado el funcionamiento de cada subsistema.

### 5.2 Obtención de datos de demanda de la vivienda

En cada país las demandas energéticas son diferentes. Este trabajo de fin de máster se toma una instalación ubicada en la zona de Tarragona, para la cual se han obtenido las demandas

de la vivienda por análisis estadísticos, informes sobre las demandas promedio obtenidas por mediciones o encuestas a los usuarios. Para el agua potable se utilizaron los valores de referencias dadas por fuentes de estudios en España. Por su parte, los datos de el agua caliente sanitaria, la calefacción, la refrigeración y la electricidad se calcularon y compararon con los promedios para una casa típica en España.

A continuación se menciona la fuente utilizada para comparar los valores calculados de las demandas energéticas para la vivienda unifamiliar aislada.

- Demanda de agua potable: Instituto Nacional de Estadística [18].
- Demanda de agua caliente Sanitaria (ACS): Documento básico HE, Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía [17].
- Demanda de Calefacción y Refrigeración: Consumos del Sector Residencial en España [19].
- Demanda de electricidad: proyecto Sech-Spahousec informe final [20].

### 5.3 Realización de cálculos modelados en el EES

La herramienta utilizada para resolver los balances energéticos en cada subsistema ha sido el EES. Con esta herramienta se conocen los valores de producción y se analizan si se cubren las demandas en la vivienda.

Cada subsistema de los dos esquemas diseñados se ha calculado en un documento nuevo en el EES. El procedimiento para el cálculo en los esquemas A y B son los mismos, los cuales se describe a continuación:

En primer lugar se realiza el diseño del esquema. Cada subsistema se estudia por separado para conocer el principio de funcionamiento de cada uno.

A continuación se fijan las condiciones de partida para el análisis termodinámico. Los valores de las demandas se mantienen fijas en el diseño. La Figura 5 muestra que cada subsistema tiene entradas y salidas, en algunos casos se percibe como las salidas de uno se utilizan como entradas en el siguiente módulo.

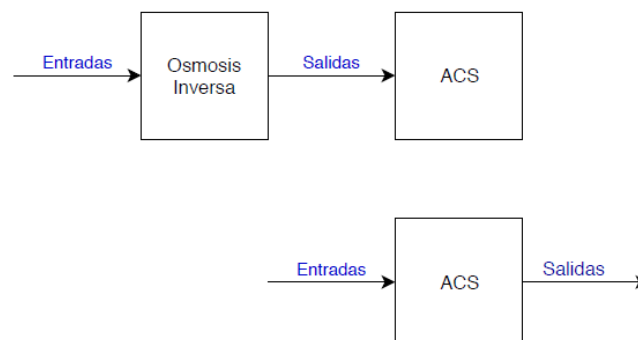


Figura 5. Concepto EES

El diseño de ambos esquemas ha sido realizado de manera modular. La temperatura ambiente se obtiene según el área climática, para lo cual se utilizan valores de partida según el subsistema lo requiera.

En tercer lugar, al tener los valores de partida definidos ya sean temperaturas, presiones, eficiencia de equipo, caudal, se realizan los balances energéticos en cada equipo de los subsistemas. Los valores de cada corriente de flujo, de temperatura, presión, caudal másico, entalpía es calculada en todos los módulos, y utilizadas para calcular el rendimiento de la instalación. La ventaja de utilizar el EES es que su librería termodinámica nos permite calcular fácilmente los valores para el agua de mar, agua, refrigerante R245fa utilizado en el ciclo Rankine orgánico, R134a utilizado en la bomba de calor y ciclo de absorción, y glicol en el sistema de captación solar.

El siguiente y cuarto paso tiene relación con los valores exergéticos, que son calculados por los valores termodinámicos y estado muerto. Hay un estado muerto para temperatura, presión y en el caso del agua de mar, salinidad del agua. El estado muerto en la temperatura será para cuatro temperaturas siendo la temperatura media de un día medio para un mes de invierno, primavera, verano y otoño, y el estado muerto en la presión de mantiene constante.

Por último, en quinto lugar, los valores obtenidos se agrupan en tablas para analizarlos y comprobar si cumplen con el objetivo de cubrir las demandas de la vivienda unifamiliar aislada.

Los seis subsistemas del esquema A y B han sido calculados de la manera descrita. A continuación se analizan los resultados obtenidos en cada esquema.

## 5.4 Análisis de los resultados

Debido a la gran cantidad de valores obtenidos en cada subsistema, se ha recopilado la información en hojas de Excel para así poder analizar los resultados.

Las hojas de Excel se dividieron en columnas según la producción eléctrica o térmica de cada equipo en el subsistema analizado. Se recolectaron los valores del EES y se realizó un balance de la producción de cada esquema con respecto a las demandas, así se conoce la cobertura energética. En el caso se ha comprobado que se excede la producción térmica por el equipo de refrigeración, por lo que se ajustaron los valores en el EES y se colocaron nuevamente en las hojas de Excel para cumplir el 100% de la cobertura en el sistema. El diseño se ha enfocado en el considerado peor mes, en el cual, las coberturas en el caso de la eléctrica aumentan para el verano, siendo estos los excedentes o pérdidas en el sistema si no se implementa en algo útil.

Se agrupan como muestra las Tabla 9 y 10 y los valores del esquema A térmica y esquema B eléctrico. Para así poder ver claramente la producción diaria de cada esquema y su cobertura. Los valores en esta tabla muestran la producción y cobertura final.

En la Tabla 11 se muestra los valores de las potencias de los equipos, horas de uso, cantidad de energía ya sea consumida o producida dependiendo del subsistema. Han sido colocados en nuevas hojas de Excel y para cada equipo se ha realizado el mismo proceso. Sus valores están en los *anexos: Cálculos energéticos*.

## Metodología

Producción Diaria Esquema A														
	Días al mes	Térmica ACS PVT kWh/día	Eléctrica PVT kWh/día	Térmica ACS Caldera kWh/día	Calefacción Caldera kWh/día	Eléctrica ORC kWh/día	Refrig. por absorción kWh/día	A_TEG kWh/día	Agua l/día	Producción Neta Eléctrica kWh/día	Producción Neta Térmica kWh/día	Cobertura Eléctrica kWh/día	Cobertura Agua l/día	Cobertura Térmica kWh/día
Enero	31	2,65	2,02	3,36	98,24	12,78	0	0,04	1162	14,31	104,25	104%	200%	100%
febrero	28	3,61	2,71	2,52	73,68	18,98	0	0,03	1162	21,20	79,82	155%	200%	100%
Marzo	31	4,46	3,37	1,62	12,28	25,88	0	0,00	1162	28,73	18,35	210%	200%	100%
Abril	30	4,64	3,54	1,30	9,5784	27,08	0	0,00	1162	30,09	15,52	220%	200%	100%
mayo	31	4,88	3,66	0,93	6,14	28,43	0	0,00	1162	31,57	11,95	230%	200%	100%
junio	30	4,94	3,91	0,47	0	30,97	24,36	0,04	1162	34,62	29,77	253%	200%	101%
julio	31	5,05	4,32	0,03	0	35,28	24,36	0,05	1162	39,34	29,44	287%	200%	101%
agosto	31	5,00	4,16	0,07	0	33,62	24,36	0,04	1162	37,51	29,43	274%	200%	101%
septiembre	30	4,71	3,87	0,38	6,14	31,12	0	0,00	1162	34,47	11,23	252%	200%	100%
octubre	31	4,47	3,38	0,99	12,28	26,01	0	0,01	1162	28,87	17,74	211%	200%	100%
noviembre	30	3,61	2,66	2,10	73,68	19,48	0	0,03	1162	21,65	79,40	158%	200%	100%
diciembre	31	2,54	1,87	3,51	98,24	11,69	0	0,04	1162	13,07	104,30	95%	200%	100%
<b>Total</b>	365	50,55	39,46	17,29	390,26	301,32	73,08	0,28	13944,00	335,44	531,18			

Tabla 9. Producción diaria. Esquema A

La Tabla 9 muestra los valores de un día promedio de ese mes. La columna de producción neta eléctrica y neta térmica son los valores finales para uso en la vivienda, ya han sido restado los consumos de los equipos que requieren en los procesos del esquema. La columna de cobertura térmica y eléctrica muestra el exceso de esa energía para ese día, en el caso de un mes de diciembre hace falta menos de 1 kWh/día, pero al tener las baterías un mayor almacenamiento y la bomba de ósmosis inversa no se utiliza todos los días, el sistema aun podrá cubrir las demandas eléctricas de la vivienda.

## Metodología

Producción Diaria Esquema B													
	Días al mes	Térmica ACS PVT kWh/día	Eléctrica PVT kWh/día	Eléctrica PV kWh/día	Calefacción BC kWh/día	Refrigeración por BC kWh/día	Heater Termico kWh/día	Agua l/día	Producción Neta Eléctrica kWh/día	Producción Neta Térmica kWh/día	Cobertura Eléctrica kWh/día	Cobertura Agua l/día	Cobertura Térmica kWh/día
<b>Enero</b>	31	2,65	2,021	39,81	100	0	3,36	1162	17,90	106,01	131%	200%	102%
<b>febrero</b>	28	3,613	2,712	53,41	75	0	2,52	1162	38,17	81,14	279%	200%	102%
<b>Marzo</b>	31	4,455	3,37	66,37	12,5	0	1,62	1162	65,55	18,57	478%	200%	101%
<b>Abril</b>	30	4,641	3,535	69,61	9,75	0	1,30	1162	69,84	15,69	510%	200%	101%
<b>mayo</b>	31	4,877	3,663	72,14	6,25	0	0,93	1162	73,58	12,06	537%	200%	101%
<b>junio</b>	30	4,94	3,905	76,9	0	24	0,47	1162	72,34	29,41	528%	200%	100%
<b>julio</b>	31	5,045	4,316	84,99	0	24	0,03	1162	81,27	29,08	593%	200%	100%
<b>agosto</b>	31	4,999	4,157	81,87	0	24	0,07	1162	77,96	29,07	569%	200%	100%
<b>septiembre</b>	30	4,71	3,87	76,2	6,25	0	0,38	1162	78,40	11,34	572%	200%	101%
<b>octubre</b>	31	4,465	3,382	66,6	12,5	0	0,99	1162	66,42	17,96	485%	200%	101%
<b>noviembre</b>	30	3,614	2,66	52,38	75	0	2,10	1162	37,51	80,72	274%	200%	102%
<b>diciembre</b>	31	2,544	1,867	36,77	100	0	3,51	1162	14,54	106,06	106%	200%	102%
<b>Total</b>		50,553	39,458	777,05	397,25	72	17,287452		693,478548	537,090452			

Tabla 10. Producción diaria. Esquema B

<b>Equipos Esquema A</b>				
<b>Bomba de Ósmosis Inversa</b>				
<b>Datos Diarios</b>				
	<b>Potencia kW</b>	<b>Horas de Uso</b>	<b>Energía consumida kWh</b>	<b>Agua Producida (litros/día)</b>
<b>Enero</b>	2,2	3,5	7,7	1162
<b>Febrero</b>	2,2	3,5	7,7	1162
<b>Marzo</b>	2,2	3,5	7,7	1162
<b>Abril</b>	2,2	3,5	7,7	1162
<b>Mayo</b>	2,2	3,5	7,7	1162
<b>Junio</b>	2,2	3,5	7,7	1162
<b>Julio</b>	2,2	3,5	7,7	1162
<b>Agosto</b>	2,2	3,5	7,7	1162
<b>Septiembre</b>	2,2	3,5	7,7	1162
<b>Octubre</b>	2,2	3,5	7,7	1162
<b>Noviembre</b>	2,2	3,5	7,7	1162
<b>Diciembre</b>	2,2	3,5	7,7	1162

Tabla 11. Modelo análisis esquema

Se ha realizado otro análisis para conocer la contribución de cada equipo a la cobertura térmica o eléctrica como muestra la tabla 12. Para todos los equipos se realizó el mismo proceso y sus valores están en los *anexos: Cálculos energéticos*.

<b>Equipos Esquema A</b>			
<b>PVT</b>			
<b>Cobertura Térmica</b>			
	<b>Demanda de ACS kWh/día</b>	<b>ACS producida por PVT kWh/día</b>	<b>Cobertura Total (kWh/día)</b>
<b>Enero</b>	6,01	2,65	44%
<b>Febrero</b>	6,14	3,61	59%
<b>Marzo</b>	6,07	4,46	73%
<b>Abril</b>	5,94	4,64	78%
<b>Mayo</b>	5,81	4,88	84%
<b>Junio</b>	5,41	4,94	91%
<b>Julio</b>	5,08	5,05	99%
<b>Agosto</b>	5,07	5,00	99%
<b>Septiembre</b>	5,09	4,71	92%
<b>Octubre</b>	5,46	4,47	82%
<b>Noviembre</b>	5,72	3,61	63%
<b>Diciembre</b>	6,06	2,54	42%

Tabla 12. Modelo Análisis cobertura

Metodología

En una tabla de solo potencias como se muestra en la Tabla 13, se agruparon las potencias de cada equipo, el cual utilizamos para los cálculos finales de rendimiento energético y exergético.

Potencia Esquema A									
	Potencia solar sobre PVT kW	Potencia Solar sobre ORC kW	Potencia Turbina ORC kW	Potencia Bomba ORC kW	Potencia PVT kW	Potencia Bomba Refriger. por absorción kW	Potencia TEG kW	Potencia Bomba Agua Potable kW	Potencia Eléctrica Neta de la instalación
Enero	6,31	53,99	4,38	0,23	0,70	0,00000	0,00	2,20	2,65
febrero	7,84	64,40	5,71	0,23	0,70	0,00000	0,00	2,20	3,98
Marzo	9,60	80,02	7,71	0,23	0,70	0,00000	0,00	2,20	5,98
Abril	10,16	79,51	7,64	0,23	0,70	0,00000	0,01	2,20	5,92
mayo	10,83	82,39	8,01	0,23	0,70	0,00000	0,00	2,20	6,29
junio	12,09	87,83	8,71	0,23	0,70	0,00006	0,01	2,20	6,98
julio	13,90	97,08	9,89	0,23	0,70	0,00006	0,01	2,20	8,16
agosto	13,52	93,51	9,43	0,23	0,70	0,00006	0,00	2,20	7,71
septiembre	12,43	91,87	9,22	0,23	0,70	0,00000	0,01	2,20	7,50
octubre	10,51	80,29	7,74	0,23	0,70	0,00000	0,01	2,20	6,02
noviembre	8,24	71,04	6,56	0,23	0,70	0,00000	0,01	2,20	4,83
diciembre	6,01	53,20	4,28	0,23	0,70	0,00000	0,00	2,20	2,55

Tabla 13. Modelo Potencias

Finalmente en ambos esquemas, cada corriente de flujo se agrupó según el mes analizado y el subsistema. Como se muestra en la Tabla 14, se colocaron todos los valores de las corrientes por mes en una nueva hoja de Excel y se identificó su número con respecto a los esquemas, tipo de fluido, temperatura, presión, flujo másico, entalpía, exergía específica en kJ/kg y kW.

Agrupados de esta manera los valores, se calculan los rendimientos energéticos de demanda y exergéticos de demanda para un día promedio de mes de invierno, primavera, verano y otoño. El análisis de los rendimientos se muestra en el Gráfico 1.

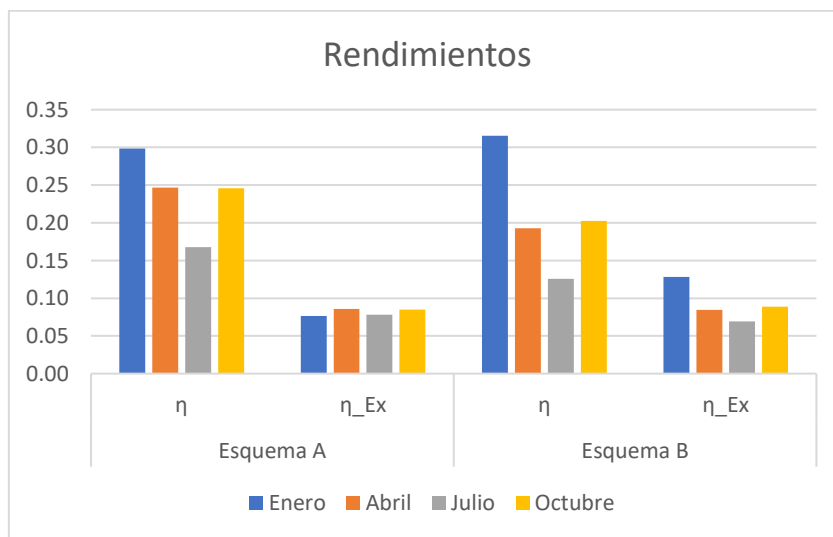


Gráfico 1. Concepto Rendimientos



## Metodología

Estado	Tipo del Fluido	Enero. Esquema A					
		T(°C)	P(bar)	ṁ(kg/s)	h(kJ/kg)	E(kJ/kg)	Ė(kW)
1	Agua de mar	13,9	1,013	0,95	55,51	0,00	0,00
2	Agua de mar	13,9	29	0,95	58,08	2,72	2,58
3	Agua	14,9	1,01	0,09	62,63	2,45	0,23
4	Salmuera	15,9	28	0,85	65,52	2,63	2,24
4b	Salmuera	15,9	1,01	0,85	63,07	0,02	0,01
5	Glicol	38	1	0,04	97,00	4,33	0,17
6	Glicol	38	1,01	0,04	97,00	4,33	0,17
7	Glicol	54,7	1,01	0,04	165,20	12,21	0,48
8	Agua	32,04	1	0,03	134,30	3,11	0,11
9	Agua	32,04	1	0,03	134,30	3,11	0,11
10	Biomasa	11	1	0,001	18000,00	20554,17	18,99
11	Aire	11	1	0,01	-	0,00	0,00
12	Gases de escape	165,9	1	0,01	181,20	170,80	1,70
13	Agua	55	1	0,03	230,30	12,93	0,45
14	Agua	55	1	0,03	230,30	12,93	0,45
15	Agua	69,71	1	0,05	291,90	22,34	1,12
16	Agua	69,71	1	0,05	291,90	22,34	1,12
17	Agua	11	1	0,05	46,27	0,00	0
18	Agua	-	-	-	-	-	-
19	Agua	-	-	-	-	-	-
20	Agua	-	-	-	-	-	-
21	Agua	-	-	-	-	-	-
22	Agua/LiBr	-	-	-	-	-	-
23	Agua/LiBr	-	-	-	-	-	-
24	Agua/LiBr	-	-	-	-	-	-
25	Agua/LiBr	-	-	-	-	-	-
26	Agua/LiBr	-	-	-	-	-	-
27	Agua/LiBr	-	-	-	-	-	-
28	Glicol	85,00	1,00	0,50	269,70	24,70	12,35
29	Glicol	104,40	1,00	0,50	342,90	48,04	24,02
30	R245fa	89,61	10,00	0,30	337,40	16,74	5,02
31	R245fa	38,79	1,09	0,30	322,80	2,15	0,64
32	R245fa	17,00	1,09	0,30	221,90	0,08	0,02
33	R245fa	17,34	10,00	0,30	222,70	0,80	0,24

Tabla 14. Modelo Valores Termodinámicos

El coste de la inversión de los esquemas A y esquema B se calcula en una hoja de Excel al conocer los equipos necesarios, sus tamaños y cantidad según cada subsistema. El tiempo de retorno de la inversión para la instalación se obtiene por la inversión y el costo que se ahorraría anualmente en la producción.

Metodología

Por último, los esquemas diseñados se comparan calculando los costes nivelados para el agua, calefacción, refrigeración y electricidad. Los costes nivelados nos dan a conocer el coste de producción según la tecnología utilizada, para estos costes se consideró el equipo involucrado en la producción de la energía final y su generación.

Por las iniciales en inglés LCOE Levelized cost of energy, se subdividió en cuatro costes nivelados para conocer su coste de producción para el esquema A y esquema B. Los valores finales se encuentran en los *anexos: Coste de la instalación*.

- LCOW: Costes nivelados del agua
- LCOH: Costes nivelados de calefacción
- LCOC: Costes nivelados de refrigeración
- LCOE: Costes nivelados de electricidad

Finalmente, el cálculo de los costes nivelados ha sido en función de la producción de la energía. Para ello, se llevó a cabo un análisis de sensibilidad variando la tasa de descuento, para así conocer la tendencia de cada tecnología. Los valores se agrupan en tablas de Excel y se muestran en las gráficas para poder compararlos.

## 6. Discusión de los resultados

En este sexto capítulo se presentan los resultados obtenidos a lo largo del proceso para el análisis comparativo de dos esquemas de poligeneración doméstico en una vivienda aislada unifamiliar.

En el capítulo anterior se ha explicado la metodología aplicada en este trabajo de fin de máster para obtener los resultados y poder realizar las comparaciones de los esquemas de poligeneración doméstico.

El diseño de los dos esquemas de poligeneración es para valores promedios de un día de mes en particular. Los rendimientos globales energéticos y exergéticos y los costes de la instalación han sido analizados para cuatro fechas siendo:

- Invierno: Enero
- Primavera: Abril
- Verano: Julio
- Otoño: Octubre

Toda la información aquí presentada ha sido obtenida de la resolución de ecuaciones en el EES y recopilada en el Excel para realizar un mejor análisis. El esquema final A, se ha modificado del diseño original para poder llegar al resultado final, que son los utilizados en la comparación de ambos esquemas. Además de los tamaños de los equipos, se han realizados varios resultados de los esquemas para obtener los óptimos y poder realizar las comparaciones.

A continuación, se muestra la comparación por cobertura de la demanda, eficiencia energética, eficiencia exergética y costes nivelados de cada esquema de las cuatro fechas analizadas.

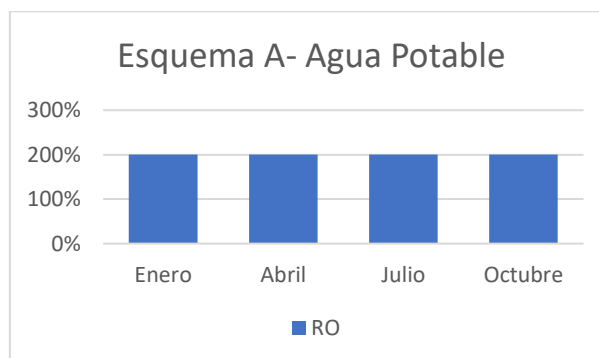


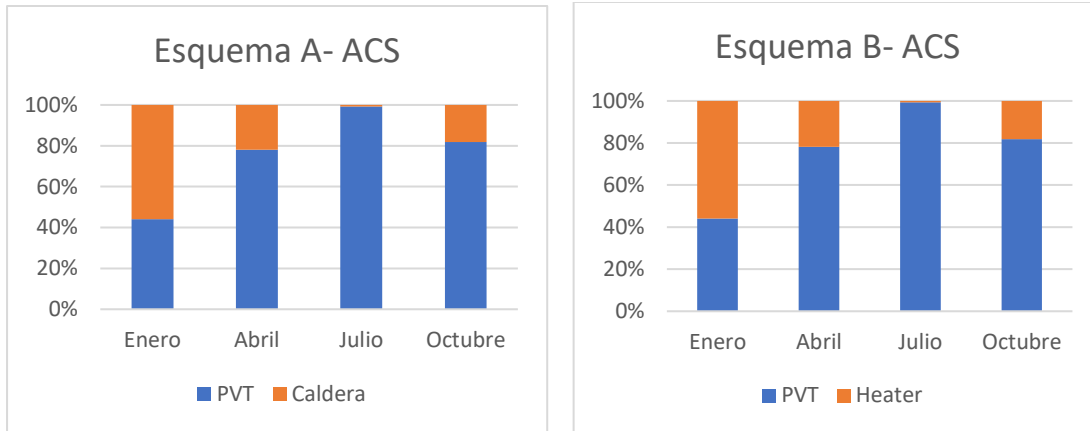
Gráfico 2. Cobertura Agua Potable. Esquema A

En el Gráfico 2, se muestra el subsistema de agua potable. Como en ambos esquemas es igual, se ha optado por representar solamente uno. Como criterio en el diseño se realizó para una reserva de 2 días por ser en una zona aislada, esto implica que en los resultados la cobertura sea mayor que la demanda de agua potable. El objetivo de cubrir 100% de la demanda se ha logrado.

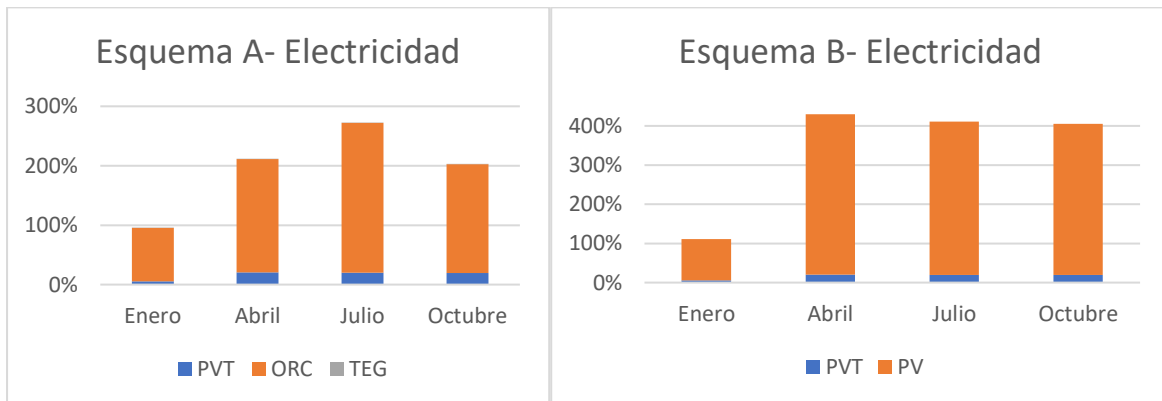
La membrana de ósmosis inversa tiene factor de recuperación de 10% por ser a pequeña escala, causando que tenga que funcionar más horas para producir la cantidad de agua potable necesaria en el sistema. Actualmente las membranas de ósmosis inversa a mayor

Discusión de los resultados

escala su factor de recuperación es de 45 a 50% y su producción es mayor con menor tiempo de consumo eléctrico.



En cuanto al subsistema de agua caliente sanitaria, y tomando los esquemas A y B para la cobertura de ACS se puede observar que ambos diseños cubren al 100% de la demanda en ambos esquemas en todos los meses, a excepción de verano que no necesitan de un apoyo auxiliar. El esquema A utiliza caldera como auxiliar de los paneles PVT y el esquema B un calentador eléctrico. La cobertura total solar de los paneles es de un 74%, diseñarla para cubrir 100% por los PVT todos los meses causaría daño en los equipos por alta energía térmica.

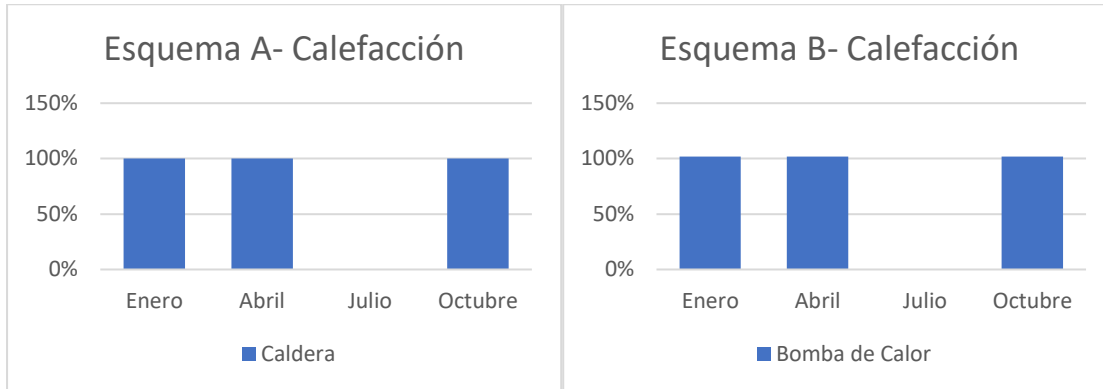


El subsistema eléctrico, con respecto a la cobertura total eléctrica de cada esquema se puede observar que para un mes de invierno ambos cubren el 100% de la demanda. Como criterio se ha optado por un diseño eléctrico que cubra la demanda de invierno, debido a que es un mes donde menos irradiación se tiene para la producción de la energía eléctrica.

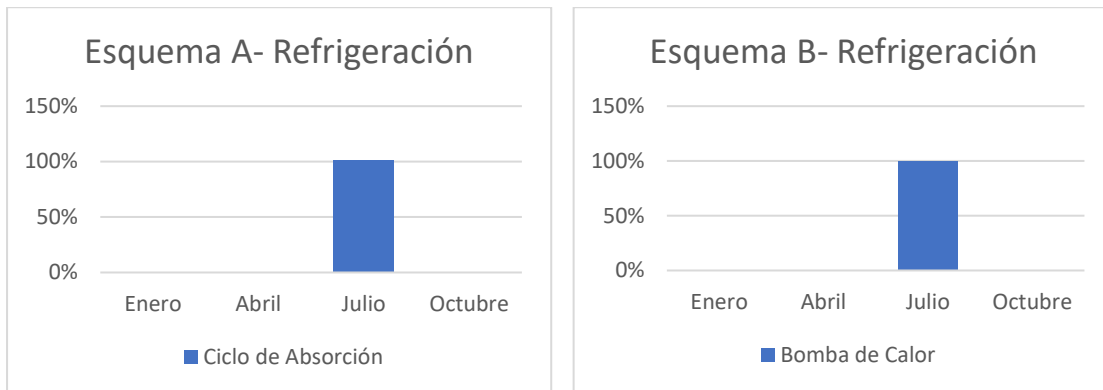
Cubriendo la demanda en el considerado peor mes resuelve que los demás meses estarán cubiertos, a pesar de causar por ello un exceso en la producción. Los esquemas A y B en los meses de primavera, otoño y verano presentan un exceso en el que se considerarían las pérdidas de energía eléctrica. El esquema B, siendo el que mayor energía solar recibe, presenta una producción mayor en los meses de verano, una solución a esta situación es

Discusión de los resultados

utilizar los excesos eléctricos en elevación de agua, o venderla para no considerarla como pérdidas en el sistema.



El subsistema de calefacción en el esquema A presentamos como la caldera aporta el calor para las zonas a calefactar, esta caldera consume pellets. En el esquema B eléctrico, la bomba de calor aporta el calor pero consumiendo energía eléctrica. La demanda de calefacción en el esquema A cubre el 100% mientras que en el esquema B es del 102%. En el diseño del esquema B por decimales o redondeos en el EES y Excel, y debido a entradas y salidas del sistema la cobertura de este esquema da un exceso de 2%.



Para el caso de refrigeración, el subsistema muestra que en el esquema A se utiliza un equipo de ciclo de absorción, el cual depende del calor aportado por la caldera, y en el esquema B se opta por una bomba de calor que consume energía eléctrica para su funcionamiento. Ambos esquemas cubren el 100% de la demanda de refrigeración para la vivienda unifamiliar aislada.

## Discusión de los resultados

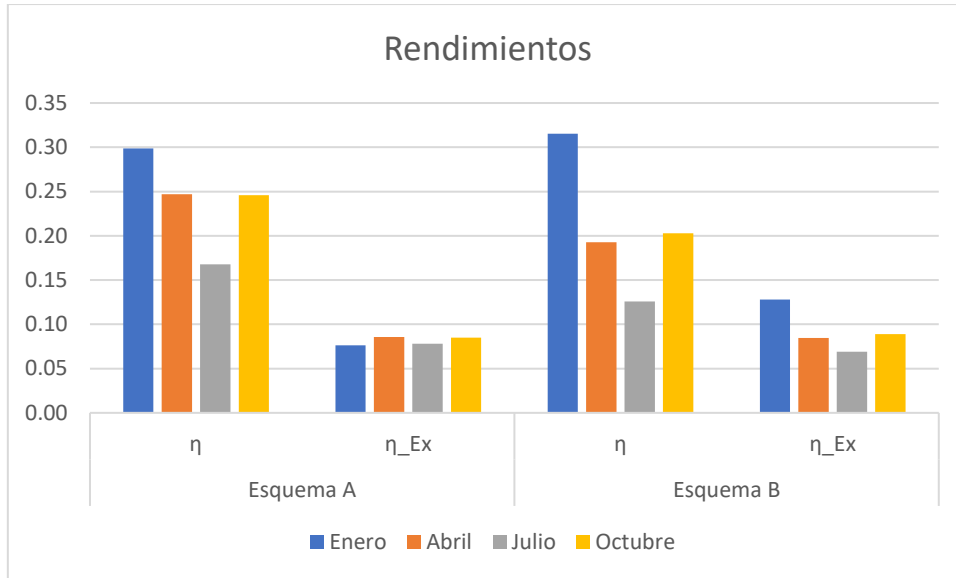


Gráfico 3. Rendimientos globales de los esquemas

Finalmente, con las propiedades termodinámicas calculadas de cada esquema, se puede conocer los rendimientos de ambos esquemas. Los valores de entradas y salidas calculados se muestran en los anexos. En el Gráfico 3 se han colocado valores (Tabla 15) de los rendimientos energéticos y exergéticos de los esquema A y B, para un día promedio de invierno (enero), primavera (abril), verano (julio) y otoño (octubre). Estos valores de rendimientos son con respecto a la demanda del sistema de poligeneración doméstico.

Los rendimientos de invierno (enero) muestra un valor mayor, si se compara con los demás meses. La cobertura en las demandas se ha mantenido casi constante para todos los meses pero los recursos para la producción varían según el mes. En el caso del esquema A, que utiliza energía solar y biomasa, aprovecha la irradiación y la cantidad necesaria de biomasa para los procesos. El esquema B es totalmente solar, y las horas solares al ser pocas en ese mes, las utiliza para suplir las demandas necesarias siendo uno de los meses que menos irradiación solar tiene a lo largo del año.

Los rendimientos de primavera (abril) y otoño (octubre) son muy parecidos al esquema A y esquema B, pero presentan menor rendimiento que en invierno. El esquema B presenta menor rendimiento comparado al esquema A, esto es debido a que la irradiación solar es más alta que en invierno, y el sistema mantiene constante las demanda, por lo que tendrá más recursos pero no se aprovechan al mantener constante las salidas.

En el caso de verano (julio) ambos esquemas presentan los más bajos rendimientos en el sistema. Los recursos para ambos esquemas son mayores debido a la cantidad de horas de sol al que están expuestos los sistemas. Al mantener constantes las demandas (salidas del sistema) disminuyen los rendimientos. En el caso del esquema A basado en energía solar y biomasa, para los paneles PVT y colectores solares hay mayor exposición de horas solares, y el consumo de biomasa en el verano es menor. El esquema B al ser totalmente solar utilizando PVT y PV reciben mucha más energía por su área de captación. Al comparar ambos esquemas el rendimiento más bajo es para el Esquema B, por lo que capta mucha más energía solar.

Los rendimientos exergéticos para los dos esquemas son bastante bajos. En estos rendimientos se pueden observar que la calidad mejor aprovechada es por el esquema B

## Discusión de los resultados

para un día de invierno, el cual indica que dentro de los procesos los equipos destruyen menos exergía comparado al esquema A. Los meses de primavera y otoño disminuyen los rendimientos exergéticos, debido a que ha aumentado la cantidad de exergía de entrada y la de salida se mantiene constante. En verano se presenta la menor exergía debido a que la mayor exergía proveniente del sol es en el verano y las demandas al mantenerlas constante no utiliza toda la exergía en la entrada, además de las pérdidas que ocurren en el proceso.

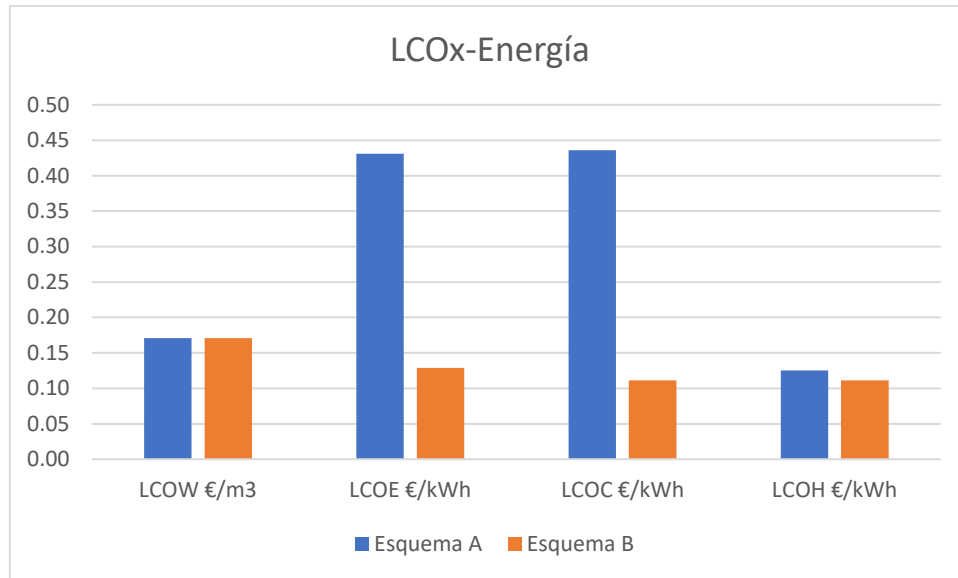


Gráfico 4. Costes Nivelados de los esquemas

La cantidad de equipos necesarios en cada esquema nos ayuda a saber el coste de inversión que tendremos. Con los cálculos realizados sabremos la producción anual por energía de cada subsistema. Estos valores son utilizados para el cálculo de los costes nivelados. El coste nivelado de energía es una herramienta útil para la comparación de los costos unitarios de diferentes tecnologías, representa un costo constante por unidad de generación.

En el Gráfico 4 se han agrupado los costes nivelados de las demandas en el sistema, cuyos valores pueden comprobarse en la Tabla 16. A continuación veremos la comparación de los dos esquemas, así conocer el coste de la generación de cada tecnología utilizada. El valor de la generación por tecnología ha sido basado en la producción total.

Para el coste nivelado del agua (LCOW) al ser el mismo sistema en ambos esquemas la producción a lo largo de su ciclo de vida es igual.

Para el caso del coste nivelado de la electricidad (LCOE) la generación eléctrica en el esquema A es cuatro veces más alta con respecto al esquema B, esto es debido a que el sistema A transforma la energía solar a térmica y luego pasa por el ciclo orgánico a energía mecánica para obtener la eléctrica, comparado con el esquema B que transforma la energía solar a eléctrica por los paneles fotovoltaicos.

Los costes nivelados de refrigeración (LCOC) en el esquema A es cuatro veces mayor que en el caso del esquema B. El esquema A requiere mayor inversión en los equipos para obtener frío, el proceso de transformación de la energía térmica de la caldera y transferencia al ciclo de absorción tiene costes en la caldera y su consumo de pellets. En el esquema B se utiliza una bomba de calor el cual su coste es repartido con la generación de calefacción, y utiliza la energía eléctrica que es transformada en térmica el cual el proceso es más económico.

Los costes nivelados de calefacción (LCOH), en ambos esquemas muestran valores similares. En el esquema A, la calefacción proviene de la caldera y su gasto es en combustible. En el esquema B, la calefacción utiliza una bomba de calor, a pesar de que el precio del equipo de la bomba de calor es mayor pero acorde a su tiempo de vida y al no usar combustible sale más económico generar la calefacción con esta tecnología.

En el esquema A y esquema B, se ha realizado un análisis de sensibilidad variando la tasa de descuento a 2%, 8%, 10% y 12%, los detalles de los valores pueden verse en los anexos. Este resultado muestra que el esquema B, suele mantenerse bastante constante comparado al A, y el coste de generación del esquema B es más económico con respecto al A. El esquema B es de esperarse muestre mejores valores ya que el transforma directamente la energía del sol en eléctrica siendo esta de mejor calidad, y el esquema A que debe pasar por varios procesos haciendo estos más costosos al final.

La ventaja de estos esquemas de poligeneración es de proporcionar a una vivienda aislada la suficiente energía para vivir en un confort al cubrir sus utilidades. Otra ventaja en estos diseños es al utilizar recursos renovables que no destruyen el medio ambiente. Ayudan a reducir las emisiones de los gases de efecto invernadero.

Una de las desventajas es el alto coste de inversión que requiere para la construcción de este diseño. Otra desventaja de estos sistemas es su tiempo de retorno, siendo 22 años para el esquema A y 23 años para el esquema B, debería tener ayudas económicas para hacer rentable estos esquemas a una vivienda unifamiliar.

Comparación de Rendimientos				
	Esquema A		Esquema B	
	$\eta$	$\eta_{Ex}$	H	$\eta_{Ex}$
<b>Enero</b>	0,30	0,08	0,32	0,13
<b>Abril</b>	0,25	0,09	0,19	0,08
<b>Julio</b>	0,17	0,08	0,13	0,07
<b>Octubre</b>	0,25	0,08	0,20	0,09

Tabla 15. Valores Globales de rendimientos

Comparación de LCOE		
	Esquema A	Esquema B
<b>LCOW</b> €/m <sup>3</sup>	0,17	0,17
<b>LCOE</b> €/kWh	0,43	0,13
<b>LCOC</b> €/kWh	0,44	0,11
<b>LCOH</b> €/kWh	0,13	0,11

Tabla 16. Valores Globales de LCOE



## 7. Conclusiones

Los sistemas de poligeneración son una gran alternativa para la generación de energía. Estas nuevas alternativas utilizando energías renovables crean un impacto positivo al medio ambiente y reducen las emisiones de los gases del efecto invernadero.

Los sistemas de poligeneración que sean eficientes y económicos siguen siendo un desafío, especialmente a pequeña escala. Existen esfuerzos para lograr mayores eficiencias, pero se centran exclusivamente en la producción térmica y eléctrica, mientras que pocos de ellos abarcan sistemas de poligeneración a pequeña escala.

En el proceso de la realización de este trabajo de fin de máster, la comparación de los subsistemas con otros trabajos ha sido de referencia para validar los valores obtenidos, ya que siendo un esquema nuevo no hay referencia del valor final para cada esquema, pero en los subsistemas si existen sistemas parecidos.

En la realización de este trabajo, una de las cosas más útiles puedo decir, es haber trabajado los subsistemas de manera modular, ya que a pesar de su integración, siendo entradas y salidas, trabajarlo individualmente para luego analizarlo daba más facilidad al momento de cambiar parámetros o encontrar errores en las ecuaciones para poder solucionarlas.

Una de las dificultades ha sido la búsqueda individual de cada subsistema para poder comparar con los esquemas, ya que muchos parámetros eran distintos con respecto a los utilizados y con otros enfoques.

He aprendido en esta realización de este trabajo, la variedad de tecnologías existentes, y las posibilidades de utilizar distintos recursos para obtener utilidades básicas. Las aplicaciones que encuentro en este proyecto son de dar mejor calidad de vida a las personas con las utilidades de electricidad, agua potable, agua caliente sanitaria, calefacción y refrigeración.

En el esquema A se podrían aplicar optimizaciones para mejorar el diseño y así es más rentable en su tiempo de vida. En el caso del sistema de generación de agua potable una opción es colocar un recuperador de energía en el rechazo de la membrana el cual aportaría energía al agua de mar y así sería menor la presión que necesita para el proceso de ósmosis inversa, ocasionando poder usar una bomba de menor presión y por ende menor consumo. Otra opción es que al ser la membrana de pequeña escala y su factor de recuperación 10% debido a la cantidad de permeado utilizado, sería almacenar agua de mar en un tanque para residencia haciendo así mayor su caudal y poder utilizar una membrana de mayor tamaño para el permeado con mayor recuperación y menor uso de la bomba por la energía eléctrica que utiliza para el proceso.

El sistema orgánico Rankine actualmente utiliza colectores solares de placa plana, su energía térmica actúa en el generador para cambio de fase del refrigerante y así generar la energía eléctrica pero una de las mejoras es utilizar colectores de concentradores el cual generarían mayor calor con menos cantidad de paneles. También utilizar el calor del condensador del ciclo para calentar previamente el agua de ACS, haciendo que la aportación de la caldera de pellets sea menor, al hacer menor uso auxiliar de la caldera se podría instalar una de menor potencia.

El modelo actual del TEG su configuración es de 4 módulos, ha sido incluido para conocer la influencia que tiene en aportar energía eléctrica al sistema, una optimización y aumentando

Conclusiones

la cantidad de módulos sigue siendo una opción de investigación y desarrollo, para este esquema no es rentable, por su contribución es muy pequeña comparada a los otros equipos.

La bomba de alta presión de ósmosis inversa consume una gran parte de energía eléctrica del sistema, si se disminuye su consumo también podría disminuir la cantidad de baterías instaladas y el precio de inversión del diseño disminuiría. Ya que el precio de almacenamiento de la energía eléctrica sigue siendo elevado.

En el caso del esquema B si se realiza la optimización con la bomba de calor y consume menos energía eléctrica, la cantidad de paneles fotovoltaicos sería menor y menor baterías, causando así una disminución en el coste de la instalación.

Ambos esquemas cumplen con el objetivo de cubrir 100% las demandas, pero en el caso de las demandas eléctricas, el sistema eléctrico esta descompensado esto ocurre por el criterio de diseño del mes peor. Una opción para no considerar como perdidas estos excesos es hacer sistemas de cultivo y riego con bombas, vender la electricidad y utilizarlo para elevación de agua.

En este trabajo final de máster se han calculado las corrientes exergéticas, pero a modo de conocer los equipos que nos producen las mayores pérdidas y corregirlos es realizando un análisis de la exergía destruida.

Los costes nivelados presentados podrían disminuir ya que hay equipos como las baterías que al momento de realizar su reemplazo el costo actual utilizado no será el mismo dentro de 10 años. Los costes nivelados (LCOx) presentados ha sido basado en su producción y no en la demanda en el análisis.

Este sistema de poligeneración por su alto coste de inversión necesitaría ayuda de subsidios para que sea viable a personas que vivan en zonas aisladas y el acceso a la red sea escaso.

Me ha parecido fascinante trabajar en este proyecto, ya que ahora conozco otras maneras de utilizar la energía renovable y como un proceso le ayuda al otro para cumplir con una función específica en este caso cubrir las demandas.

## 8. Bibliografía

- [1] İ. Dinçer and M. Rosen, *Exergy: energy, environment, and sustainable development*, 2nd ed. Oxford, UK ; Amsterdam, Netherlands ; Waltham, MA: Elsevier, 2013.
- [2] O. OCDE, *World Energy Outlook 2015*. OECD Publishing, 2015.
- [3] European Commission and European Strategy and Policy Analysis System, *Tendencias mundiales hasta 2030: ¿puede la Unión Europea hacer frente a los retos que tiene por delante?*. Luxembourg: Publications Office, 2015.
- [4] World Wildlife Fund, “Informe Planeta Vivo,” 2006. [Online]. Available: [https://d2ouvy59p0dg6k.cloudfront.net/downloads/lpr\\_2006\\_spanish.pdf](https://d2ouvy59p0dg6k.cloudfront.net/downloads/lpr_2006_spanish.pdf). [Accessed: 14-Jun-2019].
- [5] L. M. Serra, M.-A. Lozano, J. Ramos, A. V. Ensinas, and S. A. Nebra, “Polygeneration and efficient use of natural resources,” *Energy*, vol. 34, no. 5, pp. 575–586, May 2009.
- [6] L. Serra and J. Ramos, “Poligeneración: hacia una utilización sostenible de los recursos naturales,” p. 9.
- [7] G. Chicco and P. Mancarella, “Distributed multi-generation: A comprehensive view,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 13, no. 3, pp. 535–551, Apr. 2009.
- [8] K. Jana, A. Ray, M. M. Majoumerd, M. Assadi, and S. De, “Polygeneration as a future sustainable energy solution – A comprehensive review,” *Appl. Energy*, vol. 202, pp. 88–111, Sep. 2017.
- [9] P. J. Axaopoulos and E. D. Fylladitakis, “Performance and economic evaluation of a hybrid photovoltaic/thermal solar system for residential applications,” *Energy Build.*, vol. 65, pp. 488–496, Oct. 2013.
- [10] F. Calise, M. Dentice d’Accadia, and A. Piacentino, “A novel solar trigeneration system integrating PVT (photovoltaic/thermal collectors) and SW (seawater) desalination: Dynamic simulation and economic assessment,” *Energy*, vol. 67, pp. 129–148, Apr. 2014.
- [11] A. Buonomano, F. Calise, G. Ferruzzi, and L. Vanoli, “A novel renewable polygeneration system for hospital buildings: Design, simulation and thermo-economic optimization,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 67, no. 1–2, pp. 43–60, Jun. 2014.
- [12] F. Calise, M. Dentice d’Accadia, and A. Piacentino, “Exergetic and exergoeconomic analysis of a renewable polygeneration system and viability study for small isolated communities,” *Energy*, vol. 92, pp. 290–307, Dec. 2015.
- [13] S. Soutullo *et al.*, “Energy performance assessment of a polygeneration plant in different weather conditions through simulation tools,” *Energy Build.*, vol. 124, pp. 7–18, Jul. 2016.
- [14] G. Mohan, U. Kumar, M. K. Pokhrel, and A. Martin, “A novel solar thermal polygeneration system for sustainable production of cooling, clean water and domestic hot water in United Arab Emirates: Dynamic simulation and economic evaluation,” *Appl. Energy*, vol. 167, pp. 173–188, Apr. 2016.
- [15] F. Calise, M. Dentice d’Accadia, R. D. Figaj, and L. Vanoli, “A novel solar-assisted heat pump driven by photovoltaic/thermal collectors: Dynamic simulation and thermoeconomic optimization,” *Energy*, vol. 95, pp. 346–366, Jan. 2016.
- [16] L. Cioccolanti, M. Villarini, R. Tascioni, and E. Bocci, “Performance assessment of a solar trigeneration system for residential applications by means of a modelling study,” *Energy Procedia*, vol. 126, pp. 445–452, Sep. 2017.
- [17] CTE, “Documento Básico HE Ahorro de energía.” 2017.
- [18] Instituto Nacional de Estadística (INE), “España en cifras.” 2017.
- [19] E. IDAE, “Consumos del Sector Residencial en España.”
- [20] I. Secretaría General, “Análisis del consumo energético del sector residencial en España.” 16-Jul-2011.
- [21] H. T. El-Dessouky and H. M. Ettouney, *Fundamentals of salt water desalination*, 1st ed. Amsterdam ; New York: Elsevier, 2002.
- [22] A. Al-Zahrani, J. Orfi, Z. Al-Suhaibani, B. Salim, and H. Al-Ansary, “Thermodynamic Analysis of a Reverse Osmosis Desalination Unit with Energy Recovery System,” *Procedia Eng.*, vol. 33, pp. 404–414, 2012.

## Bibliografía

- [23] D. Herold, V. Horstmann, A. Neskakis, J. Plettner-Marliani, G. Piernavieja, and R. Calero, "Small scale photovoltaic desalination for rural water supply - demonstration plant in Gran Canaria," *Renew. Energy*, vol. 14, no. 1–4, pp. 293–298, May 1998.
- [24] A. Al-Karaghoul and L. L. Kazmerski, "Energy consumption and water production cost of conventional and renewable-energy-powered desalination processes," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 24, pp. 343–356, Aug. 2013.
- [25] IDAE, "TABLAS PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE INSTALACIONES SOLARES TÉRMICAS." .
- [26] S. A. Kalogirou and Y. Tripanagnostopoulos, "Hybrid PV/T solar systems for domestic hot water and electricity production," *Energy Convers. Manag.*, vol. 47, no. 18–19, pp. 3368–3382, Nov. 2006.
- [27] F. Sobhnamayan, F. Sarhaddi, M. A. Alavi, S. Farahat, and J. Yazdanpanahi, "Optimization of a solar photovoltaic thermal (PV/T) water collector based on exergy concept," *Renew. Energy*, vol. 68, pp. 356–365, Aug. 2014.
- [28] J. A. A. Lorenzo, "Manual para instalaciones fotovoltaicas autónomas," *SunFields Eur.*
- [29] L. Grosu, A. Marin, A. Dobrovicescu, and D. Queiros-Conde, "Exergy analysis of a solar combined cycle: organic Rankine cycle and absorption cooling system," *Int. J. Energy Environ. Eng.*, vol. 7, no. 4, pp. 449–459, Dec. 2016.
- [30] I. Garcia-Saez, J. Méndez, C. Ortiz, D. Loncar, J. A. Becerra, and R. Chacartegui, "Energy and economic assessment of solar Organic Rankine Cycle for combined heat and power generation in residential applications," *Renew. Energy*, vol. 140, pp. 461–476, Sep. 2019.
- [31] P. J. Mago, K. K. Srinivasan, L. M. Chamra, and C. Somayaji, "An examination of exergy destruction in organic Rankine cycles," *Int. J. Energy Res.*, vol. 32, no. 10, pp. 926–938, Aug. 2008.
- [32] K. E. Herold, "Absorption Chillers and Heat Pumps," *HEAT PUMPS*, p. 386.
- [33] H. A. Patel, L. N. Patel, D. Jani, and A. Christian, "Energetic Analysis of Single Stage Lithium Bromide Water Absorption Refrigeration System," *Procedia Technol.*, vol. 23, pp. 488–495, 2016.
- [34] K. Wang, M. Masiol, D. Thimmaiah, Y. Zhang, and P. K. Hopke, "Performance Evaluation of Two 25 kW Residential Wood Pellet Boiler Heating Systems," *Energy Fuels*, vol. 31, no. 11, pp. 12174–12182, Nov. 2017.
- [35] V. K. Verma, S. Bram, F. Delattin, and J. De Ruyck, "Real life performance of domestic pellet boiler technologies as a function of operational loads: A case study of Belgium," *Appl. Energy*, vol. 101, pp. 357–362, Jan. 2013.
- [36] M. Brazdil and J. Pospisil, "Thermoelectric Power Generation Utilizing the Waste Heat from a Biomass Boiler," *J. Electron. Mater.*, vol. 42, no. 7, pp. 2198–2202, Jul. 2013.
- [37] B. Orr, B. Singh, L. Tan, and A. Akbarzadeh, "Electricity generation from an exhaust heat recovery system utilising thermoelectric cells and heat pipes," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 73, no. 1, pp. 588–597, Dec. 2014.
- [38] C. Liu, P. Chen, and K. Li, "A 500 W low-temperature thermoelectric generator: Design and experimental study," *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 39, no. 28, pp. 15497–15505, Sep. 2014.
- [39] K. Li, C. Liu, and P. Chen, "A 1 KW Thermoelectric Generator for Low-temperature Geothermal Resources," p. 12.
- [40] K. G. Nayar, M. H. Sharqawy, L. D. Banchik, and J. H. Lienhard V, "Thermophysical properties of seawater: A review and new correlations that include pressure dependence," *Desalination*, vol. 390, pp. 1–24, Jul. 2016.
- [41] Y. Cerci, "Exergy analysis of a reverse osmosis desalination plant in California," *Desalination*, vol. 142, no. 3, pp. 257–266, Mar. 2002.
- [42] H. Saitoh *et al.*, "Field experiments and analyses on a hybrid solar collector," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 23, no. 16, pp. 2089–2105, Nov. 2003.
- [43] S. N. Jahromi, A. Vadiiee, and M. Yaghoubi, "Exergy and Economic Evaluation of a Commercially Available PV/T Collector for Different Climates in Iran," *Energy Procedia*, vol. 75, pp. 444–456, Aug. 2015.

## Bibliografía

- [44] P. Dupeyrat, C. Ménézo, and S. Fortuin, "Study of the thermal and electrical performances of PVT solar hot water system," *Energy Build.*, vol. 68, pp. 751–755, Jan. 2014.
- [45] X. L. Ma, X. R. Meng, X. L. Wei, J. Chang, and H. Li, "Analysis and Optimization of ORC for Low-Temperature Waste Heat Power Generation," *Adv. Mater. Res.*, vol. 383–390, pp. 6614–6620, Nov. 2011.
- [46] J. Freeman, K. Hellgardt, and C. N. Markides, "An assessment of solar-powered organic Rankine cycle systems for combined heating and power in UK domestic applications," *Appl. Energy*, vol. 138, pp. 605–620, Jan. 2015.
- [47] A. Şencan, K. A. Yakut, and S. A. Kalogirou, "Exergy analysis of lithium bromide/water absorption systems," *Renew. Energy*, vol. 30, no. 5, pp. 645–657, Apr. 2005.
- [48] M. Kilic and O. Kaynakli, "Second law-based thermodynamic analysis of water-lithium bromide absorption refrigeration system," *Energy*, vol. 32, no. 8, pp. 1505–1512, Aug. 2007.
- [49] M. M. Joybari and F. Haghghat, "Exergy analysis of single effect absorption refrigeration systems: The heat exchange aspect," *Energy Convers. Manag.*, vol. 126, pp. 799–810, Oct. 2016.
- [50] E. Akrami, A. Chitsaz, H. Nami, and S. M. S. Mahmoudi, "Energetic and exergoeconomic assessment of a multi-generation energy system based on indirect use of geothermal energy," *Energy*, vol. 124, pp. 625–639, Apr. 2017.
- [51] K. J. Ptasiński, *Efficiency of biomass energy: an exergy approach to biofuels, power, and biorefineries*. Hoboken, New Jersey: AIChE the global home of chemical engineers: Wiley, John Wiley & Sons, Inc, 2013.
- [52] E. Açıkkalp, T. Zeng, A. Ortwein, H. Burkhardt, and W. Klenk, "Exergy, Exergoeconomic and Enviroeconomic Evaluation of a Biomass Boiler-Steam Engine Micro-CHP System," *Chem. Eng. Technol.*, vol. 41, no. 11, pp. 2141–2149, Nov. 2018.
- [53] S. C. Kamate and P. B. Gangavati, "Exergy analysis of cogeneration power plants in sugar industries," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 29, no. 5–6, pp. 1187–1194, Apr. 2009.
- [54] C. Li, C. Gillum, K. Toupin, and B. Donaldson, "Biomass boiler energy conversion system analysis with the aid of exergy-based methods," *Energy Convers. Manag.*, vol. 103, pp. 665–673, Oct. 2015.
- [55] M. E. Demir and I. Dincer, "Development of an integrated hybrid solar thermal power system with thermoelectric generator for desalination and power production," *Desalination*, vol. 404, pp. 59–71, Feb. 2017.
- [56] *Exergy Analysis of Heating, Refrigerating and Air Conditioning*. Elsevier, 2015.
- [57] M. R. Ally, J. D. Munk, V. D. Baxter, and A. C. Gehl, "Exergy and energy analysis of a ground-source heat pump for domestic water heating under simulated occupancy conditions," *Int. J. Refrig.*, vol. 36, no. 5, pp. 1417–1430, Aug. 2013.
- [58] L. Fei and H. Pingfang, "Energy and Exergy Analysis of a Ground Water Heat Pump System," *Phys. Procedia*, vol. 24, pp. 169–175, 2012.
- [59] E. Bilgen and H. Takahashi, "Exergy analysis and experimental study of heat pump systems," p. 7, 2002.
- [60] K. Hansen, "Decision-making based on energy costs: Comparing levelized cost of energy and energy system costs," *Energy Strategy Rev.*, vol. 24, pp. 68–82, Apr. 2019.
- [61] G. Fiorenza, V. K. Sharma, and G. Braccio, "Techno-economic evaluation of a solar powered water desalination plant," *Energy Convers. Manag.*, vol. 44, no. 14, pp. 2217–2240, Aug. 2003.
- [62] U. Atikol and H. S. Aybar, "Estimation of water production cost in the feasibility analysis of RO systems," *Desalination*, vol. 184, no. 1–3, pp. 253–258, Nov. 2005.