



Cobertura de la demanda doméstica de energía y agua mediante sistemas de poligeneración térmico-eléctrico

Domestic energy and water demand coverage through thermal- and electric-based polygeneration systems

Katherine Chung-Camargo^{1,2}, Javier Uche²*

¹ *Research Group Energy and Comfort in Bioclimatic Buildings (ECEB), Faculty of Mechanical Engineering, Universidad Tecnológica de Panamá, Panama City 0819-07289, Panama*

² *Department of Mechanical Engineering, University of Zaragoza, Calle de Pedro Cerbuna, 12, Zaragoza, Spain*

***Autor de correspondencia:** katherine.chung@utp.ac.pa

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 y residencial. 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 analiza la cobertura de las demandas domésticas (agua potable, calefacción, refrigeración, y electricidad) con sistemas de poligeneración en una vivienda en zona aislada como caso de estudio. Se proponen dos esquemas usando energías renovables, uno basado en energía solar y biomasa (térmico) y otro en energía solar (eléctrico). El caso de estudio está localizado en la zona del mediterráneo, Tarragona. La metodología de trabajo comienza con la revisión del estado del arte y estudio de los sistemas de poligeneración (configuraciones, tecnologías utilizadas y comparación de resultados). Después se realizaron dos modelos en el programa Engineer equation solver (EES). Este programa ha permitido calcular los resultados necesarios para la comparación de los dos sistemas. Los valores promedio para un día de invierno, primavera, verano y otoño han sido utilizados para la comparación relativa en el análisis de los resultados. Finalmente, para las demandas suplidas se realizó un análisis numérico para obtener el rendimiento energético. Este trabajo 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.

Palabras clave. Energías renovables, poligeneración, vivienda unifamiliar.

ABSTRACT. Final energy is used to develop any activity in different areas such as education, health, agriculture, food production, water supply, industry and residential. Therefore, the conversion of primary energy and the technology used for this purpose are key to future sustainability. That energy supply reaches all regions of the world, specifically in isolated areas, is an indicator of human development. This paper analyzes the coverage of domestic demands (drinking water, heating, cooling, and electricity) with polygeneration systems in a house in an isolated area as a case study. Two schemes using renewable energies are proposed, one based on solar energy and biomass (thermal) and the other on solar energy (electrical). The case study is located in the Mediterranean area, Tarragona. The work methodology begins with the review of the state of the art and study of polygeneration systems (configurations, technologies used and comparison of results). Then, two models were made in the Engineer equation solver (EES) program. This program made it possible to calculate the results necessary for the comparison of the two systems. The average values for a winter, spring, summer and autumn day were used for the relative comparison in the analysis of the results. Finally, for the demands supplied, a numerical analysis was performed to obtain the energy yield. This work can be interesting as a reference for future projects focused on supplying, on a small scale and with renewable energies in isolated areas, all the demands of an isolated single-family house.

Keywords. Renewable energy, polygeneration, single-family housing.

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 ido en aumento durante las últimas tres décadas y esta tendencia seguirá en el futuro [3]. Por todo ello, las centrales eléctricas han incrementado su producción 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 varios productos energéticos [5], [6]. 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. Además, se pueden usar varios combustibles alternativos para mejorar el uso de los recursos a través de un cambio adecuado de combustibles convencionales.

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

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 motiva a diseñar 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, este trabajo será con recursos de energía renovables. Por lo tanto, dos configuraciones fueron analizadas. En la primera, el recurso solar y biomasa se usa para suplir las necesidades de agua potable, agua caliente sanitaria (ACS), calefacción, refrigeración y electricidad. En la segunda, la energía solar es utilizada como único recurso para suplir las demandas de la vivienda unifamiliar aislada anteriormente mencionadas para el primer caso.

La mayoría de los estudios en la literatura tienen un enfoque para plantas de poligeneración de mediana o gran escala como se muestra en la tabla 1. Proyectos de poligeneración a pequeña escala que sean muy eficientes y económicos siguen siendo un reto. Dentro de este contexto, no se han presentado proyectos que comparen

dos esquemas de poligeneración en viviendas unifamiliares aisladas, donde un esquema este enfocado en energía térmica de solar y biomasa, y otro con un enfoque eléctrico, en energía solar fotovoltaica. Este trabajo diseña ambos esquemas y los compara para conocer el diseño óptimo por su rendimiento energético.

El objetivo de este trabajo 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 sistema de poligeneración térmico (SPT) es “todo térmico”, el sistema de poligeneración eléctrico (SPE) “todo eléctrico”; y 3) no está contabilizada la acumulación eléctrica.

Tabla 1. Síntesis de estudios previos relacionados con la temática.

Año	Recurso Natural	Tecnología Utilizada	Servicios energéticos o productos	Referencia
2014	Solar Agua	PVT (colectores solares fotovoltaicos/térmicos) MED (destilación de efectos múltiples) LiBr / H ₂ O (enfriador de absorción) AH (calentadores auxiliares)	Energía Eléctrica Energía Térmica Energía de refrigeración Agua domestica	[10]
2014	Solar	De concentración fotovoltaica / colectores térmicos (CPVT) Calefacción y refrigeración solar	Energía Eléctrica Energía Térmica Energía de refrigeración	[11]
2015	Solar	Colectores fotovoltaicos / térmicos parabólicos, un calentador de biomasa, un enfriador de absorción y una unidad de desalinización por destilación de efecto múltiple	Energía Eléctrica Energía Térmica Energía de refrigeración Agua domestica	[12]
2016	Solar	Colectores solares térmicos Turbina del ciclo orgánico Rankine Calderas de biomasa Paneles fotovoltaicos y turbinas eólicas Celdas de combustible	-	[13]
2016	Solar	Colectores solares Enfriadoras de absorción LiBr-H ₂ O Módulos de destilación de membrana (MD)	Refrigeración, agua limpia y agua caliente doméstica	[14]
2016	Solar	Bomba de calor Ciclo de adsorción Colectores solares	Calefacción refrigeración Electricidad Agua caliente doméstica	[15]
2017	Solar	Ciclo orgánico Rankine Ciclo de absorción	Calefacción Refrigeración Electricidad	[16]

2. Materiales y Métodos

2.1 Definición del caso de estudio

Se han diseñado dos esquemas de poligeneración para una vivienda unifamiliar aislada con un área de 100 m² localizada en la ciudad mediterránea de Tarragona. Ambos sistemas tienen como objetivo cubrir las demandas de agua potable, (ACS), calefacción, refrigeración y electricidad de la vivienda.

En cada país las demandas energéticas son diferentes. En este trabajo las demandas de la vivienda se han

obtenido por análisis estadísticos, informes de las demandas promedio obtenidas por mediciones o encuestas a los usuarios (figura 1).

- **Demanda de agua potable**

El Instituto Nacional de Estadística [17] proporciona los valores de demanda de agua potable para una vivienda unifamiliar de cuatro personas. El consumo por persona y día es de 132 litros. El agua potable se utiliza principalmente para consumo humano, preparación de

alimentos, otros usos y ACS. Estos datos se obtienen por el código técnico de edificación [18] que recomienda el consumo de ACS de 28 L/persona-día y para una vivienda 112 L/día. La cobertura del agua potable del

100% está basada en la producción mínima de 580.8 L/día.

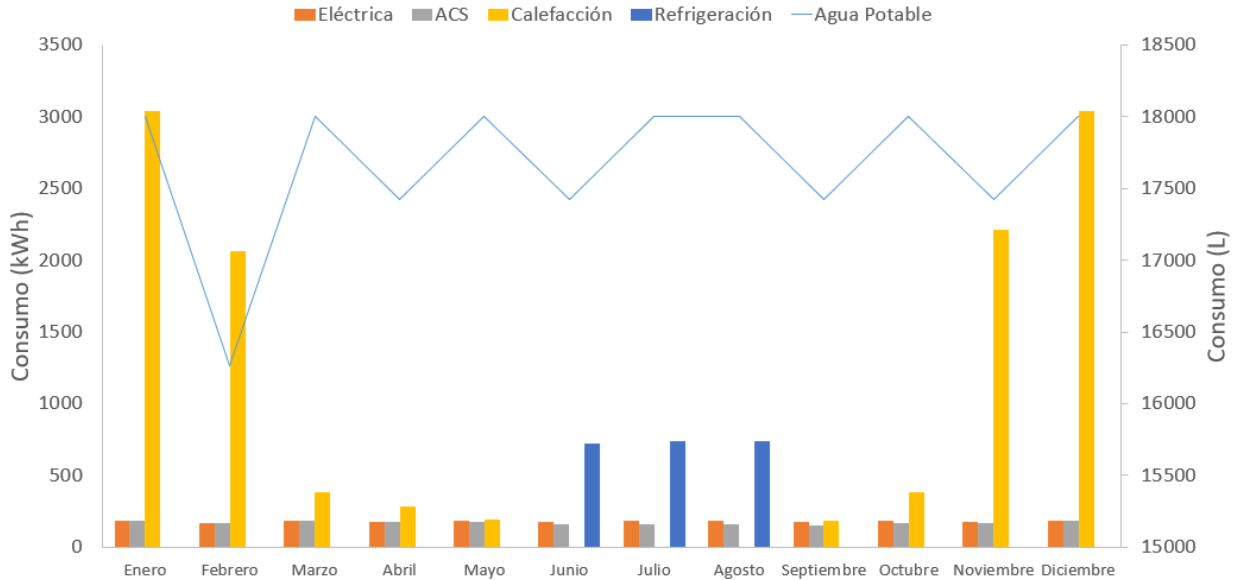


Figura 1. Demandas totales de la vivienda. Las líneas de barra pertenecen al eje izquierdo consumo (kWh), la gráfica de línea pertenece al eje derecho consumo (L)

• **Demanda de calefacción**

El consumo 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 Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) [18], [19]. El promedio de horas de calefacción de un hogar unifamiliar es de 960 h/año, equivalente a 11787.57 kWh/año. Se distribuyó esa cantidad de una manera mensual por día, dependiendo de los meses más fríos (enero y diciembre) con un consumo de 3045.44 kWh para cada mes y menos frío (septiembre) con 184.2 kWh.

• **Demanda de refrigeración**

La demanda de refrigeración se calcula por el método de grados/día de refrigeración. Los días que se utiliza la refrigeración son para los meses de verano (junio, julio, agosto). El método de grados/día para refrigeración se aproxima 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. Dando un total de 2208 kWh/año.

• **Demanda de electricidad**

La demanda eléctrica de la vivienda se obtiene de los porcentajes dados en el informe Proyecto SECH-

SPAHOUSEC. Utilizando 6 kWh/día [20] dando un total anual de 2190 kWh/año.

2.2 Descripción y análisis energético de los SPT y SPE

El sistema de poligeneración térmico (SPT) está basado en tecnologías que consumen calor para cubrir las demandas (figura 2). La fuente principal del esquema térmico es la energía solar y la biomasa. El sistema de poligeneración eléctrico (SPE) está basado en tecnologías que consumen electricidad para cubrir las demandas y la energía solar es la principal fuente del sistema eléctrico (figura 3 (verano) y 4 (invierno)).

Ambos sistemas 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: (1) Sistema de desalinización por ósmosis inversa, (2) sistema de captación solar, (3) sistema de agua caliente sanitaria, (4) sistema de calefacción, (5) sistema de refrigeración y (6) sistema eléctrico.

2.2.1 Dimensionamiento del sistema de Poligeneración térmico (SPT)

En la figura 2 se presentan 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 y las corrientes de flujos por números: I Panel fotovoltaico térmico, II Bomba 1, III Tanque Solar, IV Colector Solar, V Generador 1, VI Bomba 2, VII Turbina de Vapor, VIII Condensador 1, IX Bomba 3, X Membrana Ósmosis inversa, XI Tanque agua potable, XII Caldera de biomasa, XIII Termogenerador Eléctrico, XIV Generador 2, XV Condensador 2, XVI Válvula 1, XVII Evaporador 2, XVIII Absorbedor, XIX Bomba 4, XX Intercambiador, XXI Válvula 2 y XXII Batería.

- **Sistema de desalinización por ósmosis inversa**

El sistema de desalinización por ósmosis inversa (OI) es un proceso utilizado para obtener agua potable proveniente del agua de mar. En la ósmosis inversa la solución más concentrada (agua de mar) pasa por la membrana semipermeable (X) hacia el lado contrario. En el proceso solo se transfiere el agua, quedando fuera las sales. Este proceso requiere que la presión sea mayor a la presión osmótica que atraviesa la membrana [21]. La bomba a alta presión (IX) que proporciona la presión necesaria para el proceso [22], [23] está conectada al suministro eléctrico que la hace funcionar.

Las características de la membrana y la bomba de alta presión utilizadas para la producción de agua potable con una salinidad de 100 ppm son: Razón de Recuperación de la membrana (Y) 10%, Rechazo de sales 99.4, Máximo flujo de alimentación 6 gpm (1.4 m³/h), máximo flujo de permeado (qp1) 150 gpd (0.6 m³/d) y Potencia de la Bomba 2.2 kW, teniendo en cuenta que el agua de mar tiene una salinidad de 35 000 ppm y su temperatura cambia según la estación del año.

El criterio de diseño para la vivienda aislada en la producción de agua potable es para dos días. La producción del agua utiliza dos membranas semipermeables y para su reserva un tanque de almacenamiento (XI) de 1200 litros. El consumo eléctrico de la bomba es de 7.7 kWh. Al no tener recuperador de presión, la energía específica es de 6629 kWh/m³. Se estima que este resultado es algo elevado, esto se debe a que la capacidad de esta instalación es pequeña y su consumo es más alto [24], [25].

- **Sistema de captación solar**

El sistema de captación solar aprovecha la energía solar y la transforma en calor, y 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 [26]. Las características del panel utilizado son: un área total de 1.65 m², Rendimiento Óptico 0.59, Primer coeficiente Pérdidas Térmicas, 3.3 W/(m²K), Segundo coeficiente Pérdidas Térmicas, 0.018 W/(m²K), Potencial nominal (P_{Mpp}) 260 W, Corriente del módulo (I_{modMpp}) 8.59 A, Voltaje del módulo (V_{modMpp}) 31.44 V. El área total de captación es de 4.71 m² y su inclinación y orientación es 45° al sur. La eficiencia del colector es calculada aplicando [27].

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, este fluido por medio de un intercambiador de calor calienta el agua del tanque de acumulación solar (III) que será utilizada para ACS. Las horas de funcionamiento de este sistema es acorde a la cantidad promedio de sol en esa zona. La caldera de biomasa es auxiliar para cubrir la demanda de ACS ya que la cobertura solar de los colectores es de 74%. El rendimiento energético de la instalación se puede obtener mensual como anual aplicando la ecuación (1) [28],[29] en donde EU_{Solar,mes} es la energía útil mensual, EI_{Solar,mes} es la energía incidente y S_c es la superficie de captadores. El rendimiento eléctrico esta dado por la ecuación (2) [28] donde I y V son la corriente y la tensión del módulo que funciona a máxima potencia.

$$\eta_{termico} = \frac{EU_{Solar,mes}}{EI_{mes} * S_c} \quad (1)$$

$$\eta_{electrico} = \frac{I * V}{EI_{mes} * S_c} \quad (2)$$

- **Sistema de agua caliente sanitaria**

Al pasar por el proceso de desalinización y obtener agua potable, una fracción del agua será utilizada para ACS. Se estima una temperatura de 1°C mayor al 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 del 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, mientras que, en el caso de no llegar a la temperatura de demanda, el agua se

dirige a la caldera auxiliar (XII), que aportara el calor necesario.

- **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, el agua se calentará, y por medio de radiadores transportará el calor a los espacios requeridos. 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 para ACS. 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.

- **Sistema de refrigeración**

El equipo principal utilizado en el sistema de refrigeración es un ciclo de absorción de $\text{LiBr}\cdot\text{H}_2\text{O}$. 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 3.045 kW y en el generador de 4.2 kW, siendo un coeficiente de rendimiento (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. La caldera es una fuente renovable, ya que utiliza biomasa y no combustibles fósiles. El consumo eléctrico de la bomba (XIX), es menor a 0.5 kW.

- **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 m². 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 60 m². Este sistema

se enfoca en el mes de diciembre, considerado como el peor mes. 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 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 son 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.

2.2.2 Dimensionamiento del sistema de poligeneración eléctrico (SPE)

En las figuras 3 (para verano) y 4 (para invierno) se muestran los diagramas generales del SPE, basado en un sistema solar para producir agua potable, electricidad, ACS, calefacción y refrigeración de una vivienda unifamiliar aislada. Este SPE utiliza una bomba de calor reversible, que en invierno está en modo de calefacción y en verano en modo de refrigeración. Al igual que SPT, cada equipo está identificado por una enumeración romana y las corrientes de flujos por números: I Panel fotovoltaico térmico, II Bomba 1, III Tanque Solar, IV Panel Fotovoltaico, V Bomba 2, VI Membrana Ósmosis Inversa, VII Tanque agua potable, VIII Calentador eléctrico, IX Compresor, X Condensador, XI Válvula, XII Evaporador y XIII Batería.

- **Sistema de desalinización por ósmosis inversa**

Para este SPE, el sistema de desalinización por ósmosis inversa es igual al descrito en el SPT.

- **Sistema de captación solar**

El sistema de captación solar es igual al descrito en el SPT.

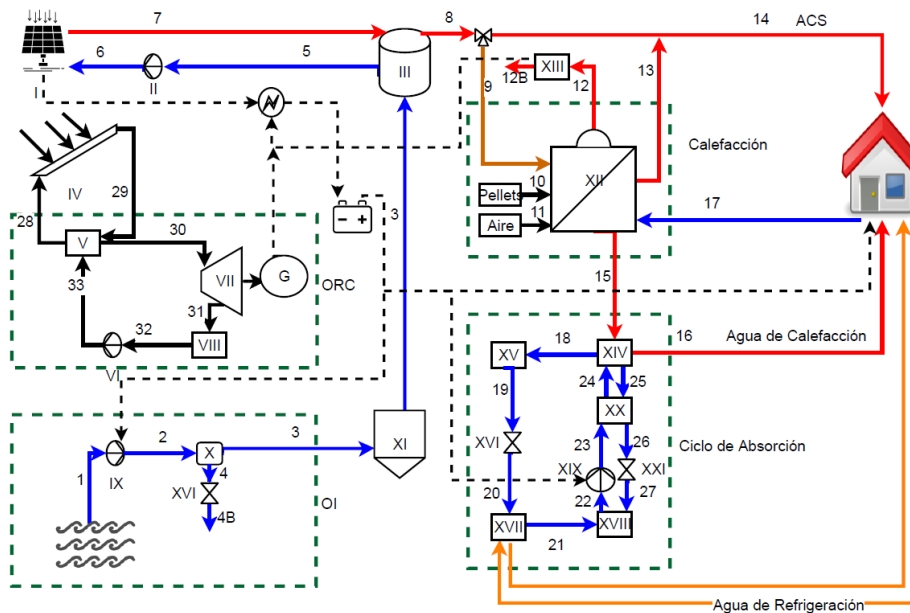


Figura 2. Esquema de Poligeneración térmico (SPT).

- **Sistema de agua caliente sanitaria**

El sistema de agua caliente sanitaria es muy parecido al SPT. 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.

En el caso de no llegar a la temperatura de demanda, se utiliza un calentador eléctrico (VIII) que aporta el calor necesario. 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 ACS en esos meses. La conexión eléctrica de la instalación es la fuente de energía para el funcionamiento del calentador.

- **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 calentar las zonas de la vivienda en los meses de invierno. La potencia calorífica o COP de este equipo es de 4.9, y el sistema eléctrico de la instalación en la vivienda aislada es la fuente de energía eléctrica. La bomba de calor tiene la configuración de agua/agua y su frecuencia de uso es

para todo el año, principalmente en invierno, ya que son los meses con mayor demanda para la calefacción.

- **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 COP de este equipo para modo verano es tres y el sistema eléctrico de la instalación en la vivienda aislada es la fuente de energía eléctrica.

- **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 m². Los paneles fotovoltaicos (PV) presentan una potencia pico de 13.82 kW y un área de captación de 94 m². Este sistema está enfocado al mes de diciembre, considerado el peor mes, con lo cual, si se cubre la demanda de ese mes se cubrirá el resto de 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 mayores 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 clasifican en demanda eléctrica de la vivienda, funcionamiento de la bomba de

ósmosis inversa, funcionamiento de la bomba de calor y funcionamiento del calentador eléctrico.

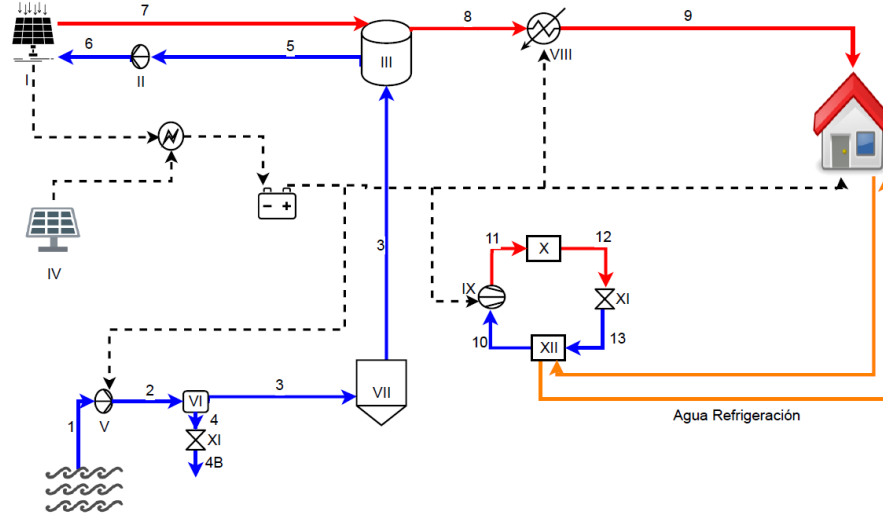


Figura 3. Esquema del sistema de poligeneración eléctrica (SPE) para verano.

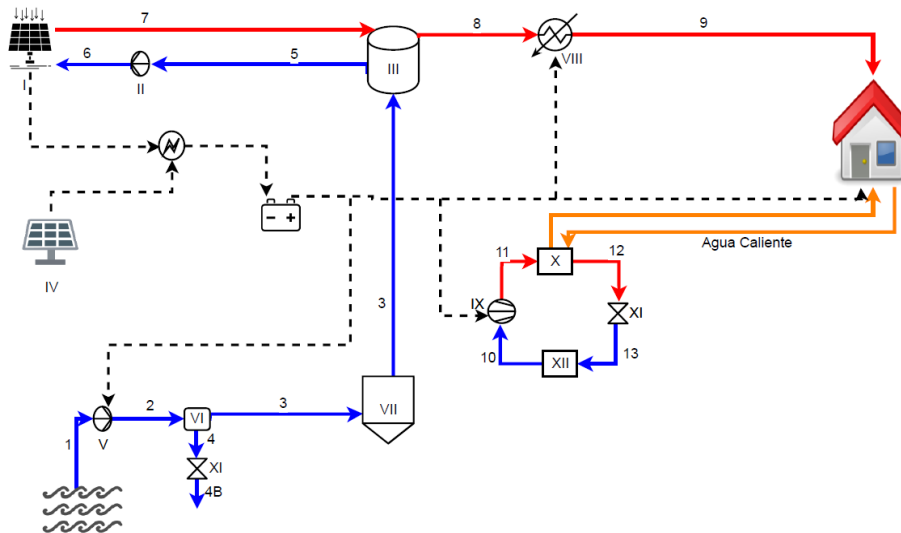


Figura 4. Esquema del sistema de poligeneración eléctrica (SPE) para invierno.

2.2.3 Procedimiento de cálculo energético

Se utilizó el EES [30] para resolver los balances energéticos en cada subsistema. Con esta herramienta se conocen los valores de producción y se analizan si se cubren las demandas en la vivienda. El procedimiento para el cálculo en los sistemas SPT y SPE 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. Cada subsistema tiene entradas y salidas, en algunos casos las salidas de uno se utilizan como entradas en el siguiente subsistema.

El diseño de ambos sistemas (SPT y SPE) 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 de 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.

EES tiene la ventaja 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.

3. Análisis de resultados y discusión

En esta sección, se presentan los resultados obtenidos a lo largo del proceso para el análisis comparativo de los sistemas de poligeneración.

El rendimiento global energético ha sido analizado 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 tabulada para realizar un mejor análisis. El SPT final, se ha modificado del diseño original para poder llegar al resultado final, que son los utilizados en la comparación de ambos sistemas de poligeneración. Además de los tamaños de los equipos, se realizaron varios análisis de los sistemas para obtener los óptimos y así hacer las comparaciones.

A continuación, se muestra la comparación por cobertura de la demanda y eficiencia energética de cada sistema de las cuatro fechas analizadas (SPT en la figura 5 y SPE en la figura 6).

- **Agua Potable**

Para el subsistema de agua potable, en ambos sistemas SPT y SPE es igual. Como criterio en el diseño se realizó para una reserva de dos 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.

Con respecto al proceso ósmosis inversa, la membrana 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 escala su factor de recuperación es de 45 a 50% y su producción es mayor con menor tiempo de consumo eléctrico.

- **ACS**

En cuanto al subsistema de agua caliente sanitaria, y tomando los sistemas SPT y SPE para la cobertura de ACS, se obtuvo que ambos diseños cubren al 100% de la demanda en ambos sistemas en todos los meses, a excepción de verano que no necesitan de un apoyo auxiliar. El SPT utiliza caldera como auxiliar de los paneles PVT y el SPE 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.

- **Eléctrica**

Con respecto a la cobertura total eléctrica de cada sistema, se observó 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.

Los sistemas SPT y SPE en los meses de primavera, otoño y verano presentan un exceso en el que se consideran las pérdidas de energía eléctrica. El SPE, presenta una producción mayor en los meses de verano debido a una mayor área de captación solar.

- **Calefacción**

El subsistema de calefacción en el SPT, la caldera de pellets aporta el calor para las zonas a calentar. En el SPE eléctrico, la bomba de calor aporta el calor, pero consumiendo energía eléctrica. La demanda de calefacción en el SPT cubre el 100% mientras que en el SPE es del 102%. En el diseño del SPE, la cobertura de este esquema da un exceso de 2%.

- **Refrigeración**

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

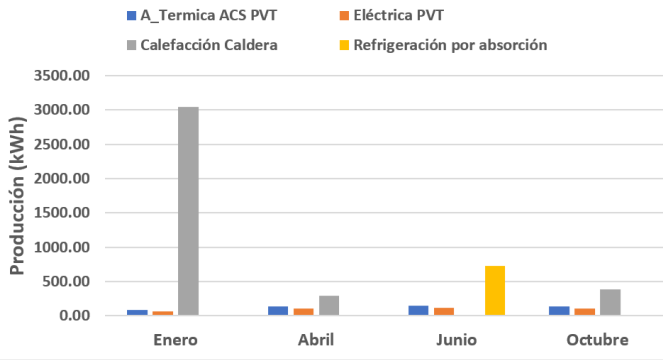


Figura 5. Producción mensual del SPT.

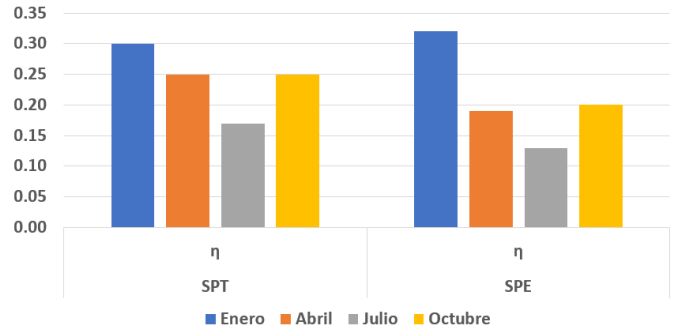


Figura 7. Rendimientos globales de los sistemas.

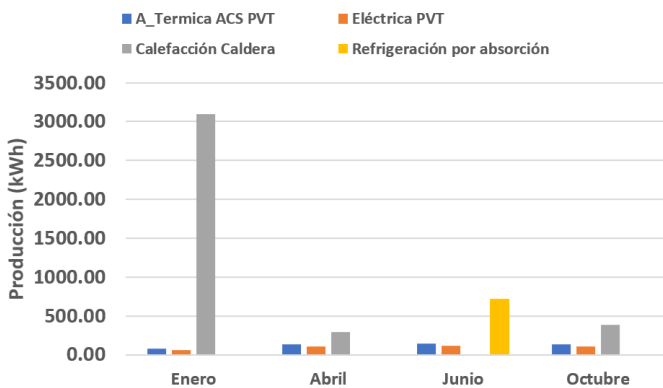


Figura 6. Producción mensual del SPE.

Rendimiento

Finalmente, con las propiedades termodinámicas calculadas de cada sistema, se pueden conocer sus rendimientos. Los valores de entradas y salidas calculados se muestran solo para invierno y verano por limitaciones de espacio en la tabla 2. En la figura 7 se han colocado valores del rendimiento energético de los sistemas SPT y SPE para un día promedio de invierno (enero), primavera (abril), verano (julio) y otoño (octubre).

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 SPT, que utiliza energía solar y biomasa, aprovecha la irradiación y la cantidad necesaria de biomasa para los procesos. El SPE 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 entre si (SPT y SPE). En invierno (enero), SPT presenta menor rendimiento comparado al SPE.

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 SPT 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 SPE 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 en verano es para el SPE, por lo que capta mucha más energía solar.

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. 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 diferentes enfoques.

Tabla 2. Valores de entrada y salida para SPT y SPE. Todos las unidades están en kW

	Entrada	SPT			Salida	SPT			
		Solar PVT	Solar ORC	Biomasa		Agua+ACS	Calefacción	Refrigeración	Eléctrica
Enero		6.31	53.99	16.63		8.04	12.28	-	2.65
Julio		13.90	97.08	4.66		8.22		3.04	8.16
		SPE				SPE			
		Solar PVT	Solar PV			Agua+ACS	Calefacción	Refrigeración	Eléctrica
Enero		6.31	80.85			8.04	12.50	-	6.95
Julio		13.90	172.60			8.22		4.00	11.25

4. 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 de 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.

El análisis realizado muestra que el SPT podría mejorar utilizando optimizaciones y así ser 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, ocasionando una menor presión para el proceso de ósmosis inversa, como resultado un menor de energía para la bomba. Otra opción debido a la membrana de pequeña escala y su factor de recuperación 10%, es 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 porcentaje de recuperación, y menor uso de la bomba por la energía eléctrica que utiliza para el proceso.

El ORC 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 el aporte de la caldera de pellets sea menor.

En el modelo actual del TEG, su configuración es de cuatro módulos. Este modelo ha sido incluido para conocer la influencia que tiene en aportar energía eléctrica al sistema, una optimización y aumentando la cantidad de módulos sigue siendo una opción de investigación y desarrollo, para este esquema no es rentable, ya que 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.

En el caso del SPE realizar optimización en la bomba de calor para consumir menos energía eléctrica, disminuiría el coste en la instalación.

Ambos sistemas SPT y SPE 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 peor mes. 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.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors thank the Research Group Energy and Comfort in Bioclimatic Buildings (ECEB) of the Faculty of Mechanical Engineering, together with the Department of Mechanical Engineer (<https://ingenieriamecanica.unizar.es/>) for their collaboration. This research was funded by Panamanian Institution Secretaria Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (SENACYT).

CONFLICTS OF INTEREST

The authors would declare no conflict of interests.

CONTRIBUTIONS AND APPROVAL OF THE AUTHORS

Original concept, J.U. formal analysis, and editing by K.C. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

REFERENCES

- [1] İ. Dincer 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. [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] Instituto Nacional de Estadística (INE), “España en cifras.” 2017.
- [18] CTE, “Documento Básico HE Ahorro de energía.” 2017.
- [19] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. 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.
- [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] Fchart, *Engineering Equation Solver (EES)*. 2018. [Online]. Available: <http://www.fchart.com/ees/> (accessed on: November 18, 2022)