



# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**TEMA: ANÁLISIS COMPARATIVO ENERGÉTICO, EXERGÉTICO Y  
ECONÓMICO DE SISTEMAS DE CALENTAMIENTO DE AGUA  
SANITARIA PARA VIVIENDAS UNIFAMILIARES EN QUITO**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERO MECÁNICO**

**DAVID WILLIAM TORRES CHULDE**  
david.torres@epn.edu.ec

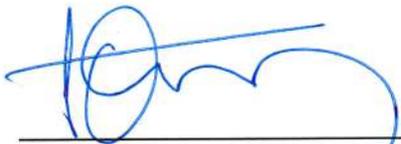
**DIRECTOR:**  
Ing. Freddy Ordóñez, Ph.D.  
freddy.ordonez@epn.edu.ec

**CODIRECTOR:**  
Ing. Carlos Naranjo Mendoza, Ph.D.  
carlos.naranjo@epn.edu.ec

**Enero, 2022**

## CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por **DAVID WILLIAM TORRES CHULDE**, bajo mi supervisión.



---

**Ing. Freddy Ordoñez, Ph.D.**  
**DIRECTOR DE PROYECTO**



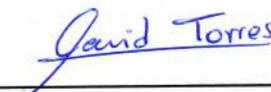
---

**Ing. Carlos Naranjo Mendoza, Ph.D.**  
**CODIRECTOR DE PROYECTO**

## DECLARACIÓN

Yo, **DAVID WILLIAM TORRES CHULDE**, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

  
\_\_\_\_\_  
David William Torres Chulde

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo a mi Madre Irina, mi padre Héctor, mis hermanas Johanna y Sarahí y a Wendy; quienes me han dado la motivación, ánimos y palabras de aliento en los momentos precisos. A ustedes con infinito cariño les dedico este trabajo.

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a mi madrecita Irina por estar siempre a mi lado, con vida, ella ha sido el motor de mi vida en gran parte de mi vida. Agradezco también a mi padre Héctor por poner el ejemplo en el hogar. A mis hermanas por estar dispuestas a ayudarme sin importar de que se trate. Agradezco también a Mónica por su ayuda, y por esos momentos en los que nos ha hecho reír hasta más no poder. Agradezco especialmente a Wendy simplemente por ser como es. Agradezco también por tener la suerte de haber contado con un compañero de tesis, Odín, quien siempre me acompañó al escribir cada párrafo contenido en este documento, este ser gatuno que siempre me saca una sonrisa y pone a prueba mi paciencia.

Agradezco a mi codirector, Carlos, por guiarme en las dudas que se fueron presentando a lo largo de este trabajo. Agradezco también a mi director, Freddy, por su paciencia y ayuda.

A todos ustedes les agradezco infinitamente.

# ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>Objetivo general</b> .....	3
<b>Objetivos específicos</b> .....	3
<b>Alcance</b> .....	3
<b>1. MARCO TEÓRICO</b> .....	4
1.1. Situación energética global y local.....	4
1.2. Energía y calidad de la energía .....	5
Energía.....	5
Exergía.....	6
Exergía, medio ambiente y desarrollo sostenible.....	7
Exergía y economía.....	8
1.3. Sistemas de agua caliente sanitaria.....	8
Sistemas solares .....	9
Bombas de calor.....	11
Sistemas eléctricos.....	12
Sistemas a gas (GLP).....	13
Sistemas de agua caliente sanitaria combinados.....	14
<b>2. METODOLOGÍA</b> .....	15
2.1. Perfil de demanda de agua caliente sanitaria .....	16
2.2. Datos climatológicos de Quito.....	18
2.3. Planteamiento energético de los sistemas ACS.....	19
2.4. Planteamiento exergético de los sistemas ACS .....	20
2.5. Análisis y diseño de los sistemas de ACS propuestos .....	21
Sistema de Colector Solar de placa plana con circulación forzada .....	22
Sistema de Bomba de calor con fuente de aire.....	25
Sistema de Calefón eléctrico .....	29

Sistema de Calefón a gas.....	31
2.6. Generalidades de los sistemas de ACS propuestos. ....	33
Volumen del tanque de acumulación de ACS.....	34
Balance energético del tanque de acumulación de ACS.....	34
Temperatura de los nodos en el tanque de acumulación de ACS.....	36
2.7. Análisis económico de los sistemas de ACS propuestos .....	38
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	39
3.1. Análisis del comportamiento de los sistemas de ACS.....	40
Sistema de calefón eléctrico .....	40
Sistema de calefón a gas.....	42
Sistema de bomba de calor .....	43
Sistema de colector solar.....	45
3.2. Análisis comparativo energético de los sistemas ACS .....	49
3.3. Análisis comparativo exergético de los sistemas ACS .....	50
3.4. Análisis comparativo económico de los sistemas ACS .....	53
Caso de Estudio 1 .....	54
Caso de Estudio 2 .....	56
4. CONCLUSIONES.....	61
<b>Referencias Bibliográficas .....</b>	<b>63</b>
<b>Anexos.....</b>	<b>69</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Emisión de gases de efecto invernadero por sector, año 2016. ....	4
Figura 1.2. Representación gráfica de la exergía.....	6
Figura 1.3. Triángulo interdisciplinario cubierto por el campo de análisis exergético .....	7
Figura 1.4. Ilustración cualitativa de la relación entre impacto económico, sostenibilidad y eficiencia exergética de un proceso .....	8
Figura 1.5. Tipos de colectores solares.....	9
Figura 1.6. Sistemas solares de circulación natural .....	10
Figura 1.7. Sistemas solares de circulación forzada .....	11
Figura 1.8. Esquema de una bomba de calor.....	12
Figura 1.9. Esquema de un Calefón eléctrico.....	13
Figura 1.10. Esquema de un calefón a gas.....	14
Figura 2.1. Flujo general de trabajo .....	15
Figura 2.2 Flujo de modelamiento energético y exergético de los sistemas de ACS propuestos.....	16
Figura 2.3. Demanda de agua caliente por horas .....	17
Figura 2.4. Demanda de agua caliente residencial para una familia de 4 miembros con residencia en Quito.....	17
Figura 2.5. Ilustración de sistema de colector solar de placa plana con circulación forzada.....	22
Figura 2.6. Ilustración del sistema de panel solar de placa plana con circulación forzada en TRNSYS .....	24
Figura 2.7. Ilustración de sistema de bomba de calor .....	25
Figura 2.8. Ilustración del sistema de bomba de calor en TRNSYS .....	28
Figura 2.9. Ilustración del esquema sistema de calefón eléctrico.....	29
Figura 2.10. Ilustración del sistema de calefón eléctrico en TRNSYS .....	30
Figura 2.11. Ilustración de sistema de calefón a gas.....	31
Figura 2.12. Ilustración del sistema de calefón a gas en TRNSYS.....	33
Figura 2.13. Tanque de acumulación de ACS.....	35

Figura 3.1. Perfil de demanda de ACS utilizado en la simulación de los sistemas propuestos.....	40
Figura 3.2. Potencia eléctrica y señal de control de funcionamiento del sistema de ACS – Calefón eléctrico – durante el día 181/365.....	41
Figura 3.3. Perfil de temperaturas en el Tanque de acumulación de ACS – Calefón eléctrico, durante un día típico .....	41
Figura 3.4. Potencia y señal de control de funcionamiento del sistema de ACS – Calefón a gas – durante un día típico.....	42
Figura 3.5. Perfil de temperaturas en el Tanque de acumulación de ACS – Calefón a gas .....	43
Figura 3.6. Potencia consumida por la bomba de calor y señal de control de funcionamiento del sistema de ACS – Bomba de calor – día típico.....	43
Figura 3.7. COP de la bomba de calor y temperatura del aire del sistema de ACS – Bomba de calor– día típico .....	44
Figura 3.8. Perfil de temperaturas en el Tanque de acumulación de ACS – Bomba de calor– día típico .....	45
Figura 3.9. Perfil de temperaturas en el Tanque de acumulación de ACS – Colector solar – semana poco favorable.....	46
Figura 3.10. Potencia útil del colector, potencia eléctrica del sistema auxiliar (resistencia eléctrica) e irradiación total sobre la superficie del colector solar, semana no favorable .....	47
Figura 3.11. Perfil de temperaturas en el Tanque de acumulación de ACS – Colector solar – semana favorable.....	48
Figura 3.12. Potencia útil del colector, potencia eléctrica del sistema auxiliar (resistencia eléctrica) e irradiación total sobre la superficie del colector solar, semana favorable ..	49
Figura 3.13. Consumo de energía anual de los sistemas de ACS propuestos .....	49
Figura 3.14. Exergía de cada fuente de energía y del producto de los sistemas de ACS propuestos.....	51
Figura 3.15. Exergía destruida en cada uno de los sistemas de ACS propuestos.....	52
Figura 3.16. Eficiencia exergética de transformación de los sistemas de ACS propuestos .....	53

Figura 3.17. CTP para cada uno de los sistemas de ACS propuestos, Caso de Estudio 1 .....	55
Figura 3.18. CTP para cada uno de los sistemas de ACS propuestos, Caso de Estudio 2 .....	56

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Ventajas y desventajas de sistemas de ACS con y sin acumulación.....	9
Tabla 2.1. Detalles del consumo de ACS.....	18
Tabla 2.2. Valores promedio diarios de las variables metrológicas utilizadas para la simulación (Año 2020) .....	18
Tabla 2.3. Parámetros de diseño del sistema de colector solar de placa plana con circulación forzada para simulación .....	24
Tabla 2.4. Parámetros de diseño del sistema de bomba de calor para simulación.....	28
Tabla 2.5. Parámetros de diseño del sistema de calefón eléctrico para simulación ....	30
Tabla 2.6. Parámetros de diseño del sistema de calefón a gas para simulación .....	33
Tabla 2.7. Parámetros de diseño del tanque de acumulación para simulación .....	37
Tabla 3.1. Detalles de costos de adquisición, operación y mantenimiento del calefón eléctrico, calefón a gas, bomba de calor y colector solar .....	54
Tabla 3.2. Costos de operación del calefón eléctrico, calefón a gas, bomba de calor y colector solar, caso de estudio 1 .....	55
Tabla 3.3. Costos de operación del calefón eléctrico, calefón a gas, bomba de calor y colector solar, caso de estudio 2.....	57
Tabla 3.4. Costo total de propiedad a 10 años del sistema de ACS de calefón a gas en función del costo del cilindro de 15 kg de GLP.....	57

## Nomenclatura

$\dot{E}_x$ :	<i>Flujo de exergía, [W]</i>
$e_x$ :	<i>exergía específica, [kJ. kg<sup>-1</sup>]</i>
$C_p$ :	<i>Calor específico del agua, [kJ. kg<sup>-1</sup>. K<sup>-1</sup>]</i>
$C_{tanque}$ :	<i>Capacidad termica del tanque de acumulación, [kJ. K<sup>-1</sup>]</i>
$\dot{E}$ :	<i>Flujo de energía, [W]</i>
$E_{VC}$ :	<i>Energía del volumen de control, [kJ]</i>
$G_{Tot}$ :	<i>Irradiancia total sobre la sup. del colector, [W. m<sup>-2</sup>]</i>
$\dot{Q}$ :	<i>Flujo de calor, [W]</i>
$T_a\sigma$ :	<i>Destrucción de exergía, [kJ]</i>
$\dot{W}$ :	<i>Potencia eléctrica, [W]</i>
$k_1$ :	<i>Coficiente lineal de pérdidas térmicas, [W. m<sup>-2</sup>. K<sup>-1</sup>]</i>
$k_2$ :	<i>Coficiente cuadrático de pérdidas térmicas, [W. m<sup>-2</sup>. K<sup>-2</sup>]</i>
$\dot{m}$ :	<i>flujo másico de agua, [kg . s<sup>-1</sup>]</i>
$\dot{m}$ :	<i>flujo volumétrico de agua, [kg . s<sup>-1</sup>]</i>
$n_o$ :	<i>rendimiento óptico del colector, [%]</i>
$n$ :	<i>Eficiencia energética, [%]</i>
$\psi$ :	<i>Eficiencia exergética, [%]</i>
$p_a$ :	<i>Presión ambiente, [kPa]</i>
$h$ :	<i>entalpía, [kJ]</i>
$A$ :	<i>Área, [ m<sup>2</sup>]</i>
$HHV$ :	<i>poder calórico superior, [kJ. m<sup>-3</sup>]</i>
$P$ :	<i>Potencia nominal, [W]</i>
$S$ :	<i>Entropía, [kJ. K<sup>-1</sup>]</i>
$T$ :	<i>Temperatura, [K]</i>
$U$ :	<i>Energía interna, [kJ]</i>
$U$ :	<i>coef. global de transferencia de calor global, [W. m<sup>-2</sup>. K<sup>-1</sup>]</i>
$V$ :	<i>volumen, [ m<sup>3</sup>]</i>
$s$ :	<i>entropía específica, [kJ. kg<sup>-1</sup>. K<sup>-1</sup>]</i>
$u$ :	<i>energía interna específica, [kJ. kg<sup>-1</sup>]</i>
$v$ :	<i>volumen específico, [ m<sup>3</sup>. kg<sup>-1</sup>]</i>
$Colec$ :	<i>Colector Solar</i>
$B. Calor$ :	<i>Bomba de Calor</i>
$C. Elec$ :	<i>Calefón Eléctrico</i>

<i>C. Gas :</i>	<i>Calefón a Gas</i>
<i>COP :</i>	<i>Coeficiente de desempeño de la bomba de calor</i>
<i>fe :</i>	<i>fuentes de exergía</i>
<i>p :</i>	<i>producto</i>
<i>u :</i>	<i>útil</i>
<i>a :</i>	<i>ambiente</i>
<i>aire :</i>	<i>aire ambiente</i>
<i>alm:</i>	<i>almacenada</i>
<i>aux :</i>	<i>auxiliar</i>
<i>bomb :</i>	<i>bomba de circulación</i>
<i>comp :</i>	<i>compresor</i>
<i>d:</i>	<i>destruida</i>
<i>fl :</i>	<i>fluido de trabajo (agua)</i>
<i>fuel :</i>	<i>combustible, GLP</i>
<i>g :</i>	<i>generada</i>
<i>in :</i>	<i>entrada</i>
<i>inter :</i>	<i>intercambiador de calor</i>
<i>net :</i>	<i>neto</i>
<i>out :</i>	<i>salida</i>
<i>per :</i>	<i>pérdida</i>
<i>r :</i>	<i>refrigerante R134a</i>
<i>red :</i>	<i>red de distribución de agua</i>
<i>res :</i>	<i>resistencia eléctrica</i>
<i>uso :</i>	<i>uso final</i>
<i>sun :</i>	<i>sol</i>
<i>vent :</i>	<i>ventilador</i>

## RESUMEN

En este trabajo se realizó un análisis comparativo de cuatro diferentes sistemas de producción de agua caliente sanitaria (ACS) desde los puntos de vista, energético, exergético y económico. Este análisis aporta un enfoque más holístico hacia el criterio de selección de sistemas de ACS. El modelamiento energético y exergético de este trabajo parten de la primera y segunda ley termodinámica aplicadas a un volumen de control en cada sistema energético de transformación de energía. El diseño y simulación de estos sistemas fue desarrollado en TRNSYS, una herramienta computacional, para resolver la parte transitoria. Se aplicaron condiciones generales de diseño a los todos los sistemas, como el tanque de acumulación, la temperatura mínima dentro del mismo, datos climatológicos de la ciudad de Quito, bajo las mismas condiciones los cuatro sistemas de ACS considerados. Una vez finalizada la simulación de estos sistemas, se procedió a analizarlos y comparar sus consumos de energía, eficiencias energéticas, la exergía de las fuentes de cada sistema, la exergía obtenida por el producto (agua caliente sanitaria), y consecuentemente sus eficiencias exergéticas de transformación de energía y de operación en la cual se toman en cuenta las pérdidas de energía debido al proceso y en el tanque de acumulación. Por último, se comparó los sistemas desde un enfoque económico a través del costo total de propiedad a un tiempo de 10 años. Se encontró que en el calefón eléctrico pese a que es altamente eficiente en el proceso de transformación de energía eléctrica en calor, es también el sistema en donde existe una de las mayores tasas de destrucción exergética de su fuente de energía, (95% de destrucción de su contenido exergético). También se encontró que; la bomba de calor y el colector solar además de aprovechar mejor el potencial exergético de sus fuentes de energía, son los que presentan el menor costo total de propiedad a largo plazo y están alineados dentro del marco de desarrollo sostenible y disponibilidad de recursos energéticos.

**Palabras clave:** Sistemas de agua caliente sanitaria, energía, exergía, desarrollo sostenible, impacto ambiental.

## ABSTRACT

This work is a comparative analysis on four different domestic hot water systems (DHW) from an energetic, exergetic and economic point of view. This analysis provides a more holistic complete approach to the selection process of DHW. The energetic and exergetic modeling comes from the first and second thermodynamics laws applied to a control volume on each DHW system. The design and simulation of these systems was performed on TRNSYS, a model computational tool, to account for the transitory part. General design conditions were applied to all the systems as the use of a storage tank, the lowest allowable temperature inside the tank and weather data from Quito, under the same conditions for the four considered DHW systems. Once the simulation of all energy systems was performed, the next step was to analyze them and compare their energy consumptions, energy efficiencies, exergy from source of each system, exergy gained by the product (domestic hot water), and consequently their exergy efficiencies on both energy transformation and operation, (including thermal losses in storage tank and due to the process). Finally, all these systems are compared to one another from an economic point of view through total cost of ownership in a lifespan of 10 years. It was found out that although the electric water heater system is highly efficient on electrical energy transformation into heat, it is also the system in which there is one of the highest exergy rate destructions (95% of its exergy content). It was also found that both, the solar thermal system and the heat pump system, not only seize much better the exergetic content of their energy sources, but also, they have the lowest total cost of ownership in the long term and at the same time contribute to sustainable development and efficient use of renewable resources.

**Keywords:** Domestic hot water systems, energy, exergy, sustainable development, environmental impact.

# **ANÁLISIS COMPARATIVO ENERGÉTICO, EXERGÉTICO Y ECONÓMICO DE SISTEMAS DE CALENTAMIENTO DE AGUA SANITARIA PARA VIVIENDAS UNIFAMILIARES EN QUITO.**

## **INTRODUCCIÓN**

A nivel mundial, entre 1971 y 2018, el consumo final de energía aumentó en un 230% alcanzando las 9 238 megatoneladas de barriles equivalentes de petróleo (MtBEP) [1]. Esto ha contribuido en el incremento de emisiones de carbono hacia la atmósfera y, en consecuencia, al calentamiento global y contaminación. Como producto de este incremento de emisiones, se están observando impactos en los sistemas naturales y humanos [2], [3]. A medida que este tipo de preocupaciones medio ambientales han incrementado en importancia, el vínculo entre el uso de energía y el contaminación ambiental ha ido reconociéndose cada vez más [4]. En este sentido, se ha visto necesario impulsar el desarrollo y uso de nuevas tecnologías que usen energías renovables para mitigar los efectos del uso de combustibles fósiles, así como lo menciona el séptimo objetivo de desarrollo sostenible (ODS) establecido por la ONU [5]. El progreso integral de una sociedad depende en gran medida de la relación que existe entre desarrollo sostenible y uso de recursos energéticos. Alcanzar el desarrollo sostenible precisa no solamente del uso de recursos energéticos renovables, sino también de si estos están siendo utilizados eficientemente [4], [6]. Los métodos exergéticos son utilizados con el fin de determinar cuan eficientemente están siendo utilizados los recursos energéticos. [4], [7]-[8].

De forma global, el sector residencial es el tercer sector de mayor consumo energético, alcanzando en el 2018 un total de 2 109 MtBEP, lo que conlleva la emisión de 2 033 mega toneladas de dióxido de carbono (MtCO<sub>2</sub>) [1]. Para el año 2050, se estima que el consumo de energía del sector residencial aumentará, siendo la energía eléctrica la que liderará este aumento [9]. Dentro del sector residencial, los dos tipos principales de uso de energía están destinados a calefacción y agua caliente sanitaria (ACS) [10], [11]. Globalmente, el uso de energía final destinado a calentamiento de agua doméstica alcanza entre el 30-40% del consumo anual de energía dentro del sector residencial y comercial [11], [12]. La mayor parte de sistemas para la producción de ACS en el sector residencial se encuentran basados en combustibles fósiles o calentamiento eléctrico debido a su facilidad de instalación y operación [13], [14]. No obstante, estos sistemas presentan un alto nivel de emisiones de gases de efecto invernadero y un alto consumo de energía primaria, respectivamente [14]. Por este motivo, es importante analizar los

sistemas de ACS de para saber si estos sistemas energéticos comúnmente utilizados y disponibles en el mercado están siendo utilizados eficientemente.

En Ecuador, de acuerdo al Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables (INER) [15], y a Guamán, J. [16], el consumo principal de energía dentro del sector residencial se debe al calentamiento de agua (cocción y ACS), climatización y refrigeración de alimentos, siendo los sistemas eléctricos (ducha eléctrica) y por combustión de GLP (calefón a gas) los sistemas de ACS tradicionalmente más utilizados para cubrir estos consumos.

Ecuador al estar geográficamente posicionado sobre la línea ecuatorial y presentar condiciones favorables como una irradiación solar promedio homogénea y condiciones climáticas relativamente estables, puede hacer uso de un gran potencial exergético sostenible. El sector residencial ecuatoriano es uno de los sectores clave para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y ahorro energético-económico a través de la implementación de sistemas energéticos de fuentes renovables. Por esta razón, es de particular y gran interés el análisis energético, exergético y económico de sistemas de ACS de fuentes de energía renovables como: colectores solares, bomba de calor, calefón eléctrico y calefón a gas para una vivienda unifamiliar en Quito. Este tipo de análisis puede ser una guía útil al momento de seleccionar unos de estos para ser implementado, ya que puede representar un potencial ahorro energético y, en consecuencia, económico, además del ambiental, directamente para el Estado, debido a los subsidios económicos, y a largo plazo para el usuario final al recuperar su inversión.

## **Objetivo general**

Realizar un análisis comparativo energético, exergético y económico de cuatro sistemas de calentamiento de agua sanitaria para viviendas unifamiliares en Quito.

## **Objetivos específicos**

- Estimar el perfil de consumo de ACS y la demanda energética para uso doméstico diario en una vivienda unifamiliar ubicada en Quito.
- Recolectar información sobre las condiciones meteorológicas de la ciudad de Quito.
- Diseñar 4 sistemas de ACS; bomba de calor, captador térmico, calefón eléctrico y calefón a gas.
- Analizar y comparar energética, exergética y económicamente los sistemas de ACS diseñados.

## **Alcance**

En este trabajo de titulación, se va a analizar y comparar termodinámica y económicamente cuatro sistemas de calentamiento de agua tradicionalmente utilizados y disponibles en el mercado local bajo las condiciones climáticas de Quito. Este análisis corresponde al proceso general de producción de agua caliente sanitaria y no profundiza en cada uno de los elementos o aspectos que componen cada proceso u otro tipo de tecnologías no mencionadas previamente. Adicionalmente sin importar el origen de la energía eléctrica, el contenido exergético de este tipo de fuente de energía será tomando en cuenta como la misma medida de su contenido energético. De esta forma, el producto de este trabajo será una comparación energética, exergética y económica del proceso general de producción de agua caliente en el sector residencial y aplicará únicamente para el contexto local y relacionado a una casa unifamiliar de 4 personas.

# 1. MARCO TEÓRICO

## 1.1. Situación energética global y local

A medida que la industrialización, la población y la urbanización van en aumento, sus necesidades energéticas también han aumentado. En consecuencia, la demanda mundial energética cada vez es mayor. Alrededor del 80% del consumo de energía es cubierta por combustibles fósiles, implicando una gran cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero hacia la atmósfera, y a su vez provocando impactos en los sistemas naturales y humanos [1]–[3], [6]. Estudios indican que el consumo de energía irá en aumento [9], [17], y, por ende, las emisiones contaminantes también. En este sentido, el uso de energías de aprovechamiento de fuentes renovables (solar, eólica, biomasa, geotérmica, entre otras), en conjunto con el uso eficiente de las mismas, son una solución viable al desarrollo sostenible entre la energía y la sociedad [5]. En el año 2016, alrededor del 11% de la energía primaria global provino del uso de tecnologías renovables [18].

El sector residencial es el tercer sector de mayor consumo energético, responsable del 27% del consumo total mundial de energía y de alrededor 10% de emisiones contaminantes [1], [19], como se muestra en la Figura 1.1.

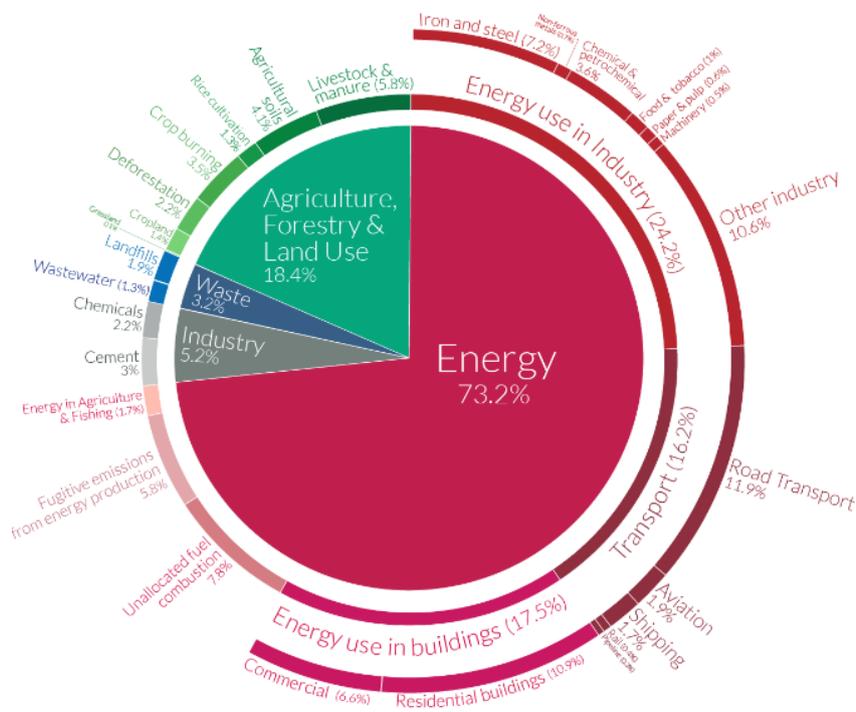


Figura 1.1. Emisión de gases de efecto invernadero por sector, año 2016. (Fuente: [19])

Dentro de este sector los principales consumos de energía son para acondicionamiento de espacios, agua caliente sanitaria (ACS), cocción de alimentos, iluminación y refrigeración [10], [17]. La producción de ACS es un importante factor de consumo de energía alrededor del mundo, alcanzando el 32% del consumo anual de energía en el sector de las edificaciones [12].

En Ecuador, de acuerdo al balance energético nacional del 2020 [20], el consumo de energía primaria de fuentes renovables tuvo una participación del 9.4%, siendo la energía hidroeléctrica la de mayor producción. Otras energías renovables como eólica, solar, biogás y biomasa, apenas y aportaron con el 0.11% del total de energía primaria producida. Por otro lado, alrededor del 70% del consumo de energía primaria provino de derivados del petróleo (Diésel, gasolinas, GLP). El sector residencial fue responsable del 15,6 % de la demanda de energía total consumida, y de esta, el 51,8% corresponde a GLP y el 38,4% a electricidad. Este sector depende altamente del GLP y electricidad para satisfacer su demanda energética. Por este motivo, existe un gran potencial de mejora en cuanto al uso de tecnologías de aprovechamiento de energías de fuentes renovables para satisfacer la demanda energética y usar eficientemente los recursos energéticos disponibles dentro de este sector.

## **1.2. Energía y calidad de la energía**

### **Energía**

La energía tiene un rol integral y significativo en el desarrollo de las civilizaciones a medida que influye en los aspectos sociales, económicos y políticos, y a su vez cubre las necesidades básicas humanas; calor, iluminación, manufactura de productos útiles, procesamiento de comida, transporte entre otros. Existen varias fuentes de energía no-renovable y renovable que se utilizan para satisfacer estas necesidades. Sin embargo, no todas son amigables con el medio ambiente [6]. Para poder satisfacer estas necesidades energéticas, a lo largo de la historia se han desarrollado varias tecnologías para cada uso específico. Con el fin de ser mejoradas, estas tecnologías han sido evaluadas en función de su consumo energético a través de la primera ley de la termodinámica. Sin embargo, raramente se habla de la calidad de la fuente de energía conocida como exergía.

## Exergía

La termodinámica permite describir el funcionamiento, comportamiento y la eficiencia de los sistemas de conversión de un tipo de energía a otra. El análisis termodinámico convencional (análisis energético) se encuentra basado en la primera ley de la termodinámica que trata sobre la conservación de la energía [4]. Este análisis es esencialmente un balance de energías a la entrada y salida de un sistema a partir del cual se puede establecer cuan eficiente es el proceso de transformación de un tipo de energía en otra. Sin embargo, este balance energético basado en la primera ley, no provee información sobre los aspectos irreversibles internos o externos del proceso termodinámico, no cuantifica la utilidad o calidad de las cantidades de energía o materia y no explica la degradación de la energía o recursos durante un proceso termodinámico [21]. Por un lado, la irreversibilidad de un proceso es una medida para saber si es posible regresar de un estado final al estado inicial del proceso obteniendo las mismas condiciones iniciales del proceso. Por otro lado, la exergía de una cantidad de energía es la medida de su utilidad, calidad o potencial que esta tiene para producir un cambio o transformación [4], en la Figura 1.2 se muestra una representación gráfica del concepto de exergía. En consecuencia, el análisis exergético permite superar las carencias que presenta el análisis energético al tomar en cuenta la irreversibilidad del proceso a través de la exergía.

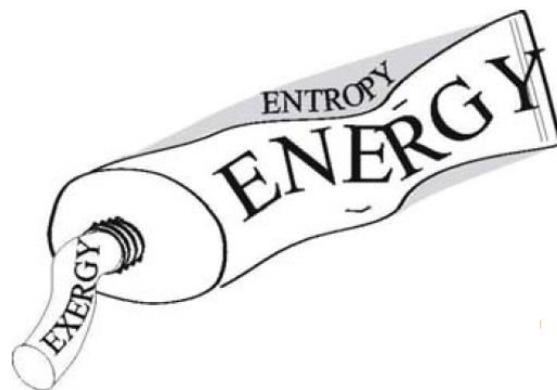


Figura 1.2. Representación gráfica de la exergía.  
(Fuente: [22])

El análisis exergético está basado en la segunda ley de la termodinámica, en la cual de acuerdo con el enunciado de la segunda ley por Kelvin-Planck y el de Clausius, dice que en un proceso termodinámico no es posible que todo el calor absorbido sea convertido en trabajo y, que su único resultado sea la extracción de calor de un cuerpo frío a otro más caliente. Por ende, el análisis exergético provee medios alternativos y esclarecedores para evaluar y comparar procesos y sistemas de forma racional y

significativa. Además, este análisis reconoce que, a pesar de que la energía no puede crearse o destruirse, esta sí puede degradarse en calidad, y eventualmente alcanzar un estado de equilibrio con sus alrededores y no ser más de utilidad [7]. Uno de los resultados particulares de este análisis es la eficiencia exergética de transformación de energía del proceso, la cual provee una medida de cuán cerca el rendimiento de un sistema se aproxima a su rendimiento ideal. Otro de los resultados de un análisis exergético detallado es que se puede identificar las causas y ubicaciones de las pérdidas termodinámicas más claramente que en un análisis energético. En consecuencia, este tipo de análisis exergético puede asistir en la mejora y optimización de diseños de sistemas energéticos [4], [8], [23].

### **Exergía, medio ambiente y desarrollo sostenible.**

Hoy en día es más claro que la exergía está directamente conectada con el medio ambiente, ya que el impacto medio ambiental de las emisiones puede ser reducido a través del aumento de la eficiencia exergética en la utilización del recurso energético de un proceso de transformación energética. De esta forma, las relaciones entre, exergía y energía, y, entre exergía y medio ambiente clarifican la relación entre la exergía y el desarrollo sostenible, representado por la Figura 1.3.

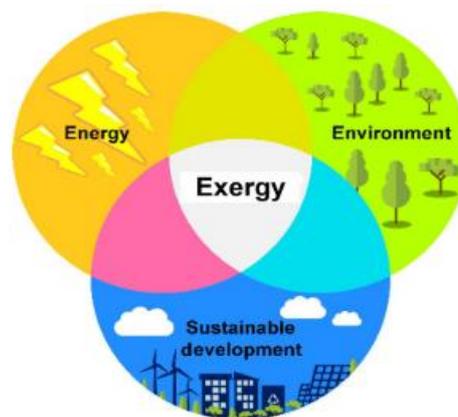


Figura 1.3. Triángulo interdisciplinario cubierto por el campo de análisis exergético.  
(Fuente: [4])

En este sentido, la relación entre exergía, sostenibilidad, e impacto medio ambiental se representa en la Figura 1.4, en donde se aprecia la influencia sobre la sostenibilidad e impacto ambiental generado por un cambio de eficiencia exergética. Es decir, que la exergía es el eje central para que proyecto de transformación de energía sea al mismo tiempo, rentable económicamente, amigable con el medio ambiente y que aporte al desarrollo sostenible de su entorno.

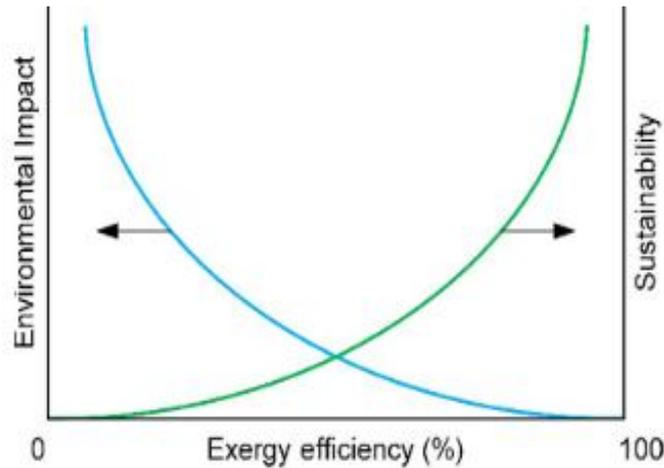


Figura 1.4. Ilustración cualitativa de la relación entre impacto económico, sostenibilidad y eficiencia exérgica de un proceso.  
(Fuente: [4])

## Exergía y economía

La exergía es un concepto bastante útil en economía. La exergía provee una forma de reducir el agotamiento de los recursos y la destrucción medioambiental a través de un impuesto exérgico desde una perspectiva macroeconómica. Por otro lado, desde una perspectiva microeconómica, la exergía ha sido combinada con el análisis de costo-beneficio para el mejoramiento de los diseños de forma exitosa. La exergía y la microeconomía forman la base de la termo-economía [24], [25].

### 1.3. Sistemas de agua caliente sanitaria

Los sistemas de agua caliente sanitaria son utilizados para elevar la temperatura del agua hasta las condiciones finales de uso [26]. Existen dos tipos de sistemas de ACS, los sistemas de calentamiento instantáneo, y los sistemas de calentamiento con acumulación. Los sistemas de calentamiento instantáneo no cuentan con un tanque de acumulación de agua caliente. La temperatura del agua a la salida de estos sistemas se encuentra en un rango de 35-45 °C [27], [28]. Estos sistemas están regularmente situados en el punto de uso final o cerca del mismo ya que el calentamiento del agua se produce al mismo momento de la demanda. Por otro lado, los sistemas de calentamiento con acumulación cuentan con tanque en el que se acumula el agua caliente producida o no al momento de la demanda. Estos sistemas cuentan con un control diferencial de temperatura que controla el encendido o apagado del sistema. Para aplicaciones domésticas de ACS de uso diario y exclusivo de vivienda y sin estanqueidad, no es necesario aplicar medidas de bioseguridad contra la legionela [29]–[31], sin embargo,

para aplicaciones como hoteles, edificios, piscinas o complejos, estas medidas son obligatorias. En la Tabla 1.1 se muestran las ventajas y desventajas de ambos sistemas.

Tabla 1.1. Ventajas y desventajas de sistemas de ACS con y sin acumulación.

Características	Con tanque de acumulación	Sin tanque de acumulación
Instalación	compleja	simple
Número de instalaciones	1	≥1
Demanda de espacio	alta	baja
Demanda de Potencia	baja	alta
Fuente de energía	variable	restrictivo
Tiempo de espera al encendido	Corto-instantáneo	Considerable

(Fuente: [32])

### Sistemas solares

Los sistemas solares son un tipo de intercambiador de calor en los cuales se transforma la energía radiante del sol en energía térmica (calor) la cual es transferida al fluido de trabajo o de uso por medio de un colector solar. Este calor transferido al fluido puede ser almacenado en un tanque de acumulación o utilizado directamente [33], [34]. Comercialmente los colectores solares para aplicaciones de ACS pueden ser de placa plana con o sin cubierta o de tubos al vacío. Estos están representados en la Figura 1.5.

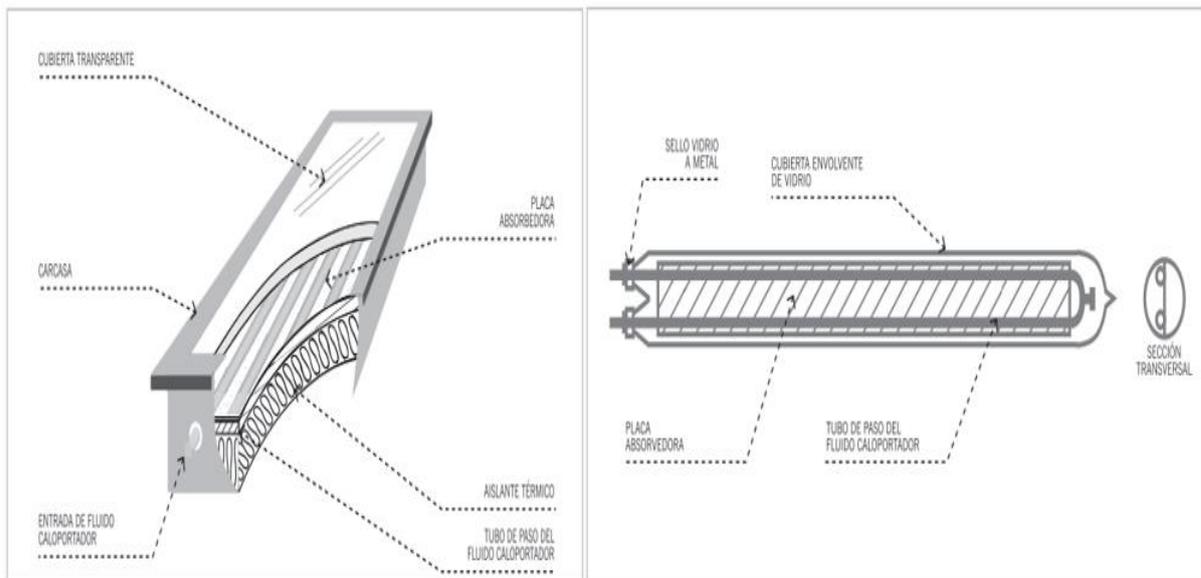


Figura 1.5. Tipos de colectores solares.

(Fuente: Adaptado [35])

Estos sistemas solares pueden ser clasificados respecto al fluido de transferencia de calor o al modo de transporte del fluido de transferencia de calor. Según el fluido de

transferencia de calor, estos sistemas pueden ser directo (circuito abierto) en donde el agua potable es calentada directamente en el colector solar; o indirecto (circuito cerrado) en donde el agua es calentada en un intercambiador de calor por el fluido de transferencia de calor que circula a través del colector. Por el lado del modo de transporte, estos sistemas pueden ser de circulación natural o de circulación forzada. La circulación natural ocurre por convección natural, en donde el agua asciende naturalmente por efecto termosifón. Este efecto termosifón ocurre por una disminución de la densidad del fluido de trabajo debido a un aumento en la temperatura. De esta forma, por la acción de la radiación solar absorbida, el agua calentada en el colector se expande y tiende a ascender hacia el tanque de acumulación, como se observa en la Figura 1.6. Por otro lado, la circulación forzada requiere de bombas de impulsión o ventiladores para hacer circular el fluido de transferencia de calor a través de colector solar, como se observa en la Figura 1.7.

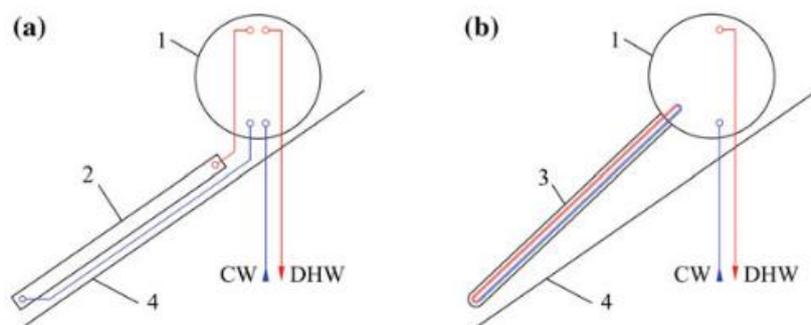


Figura 1.6. Sistemas solares de circulación natural: a) Colector de placa plana ; b) colector de tubos evacuados al vacío: Tanque de acumulación (1), colector solar de placa plana (2), colector solar de tubos evacuados al vacío (3), techo (4): agua fría (Cold Water-CW); agua caliente sanitaria (Domestic Hot Water-DHW).

(Fuente: [36])

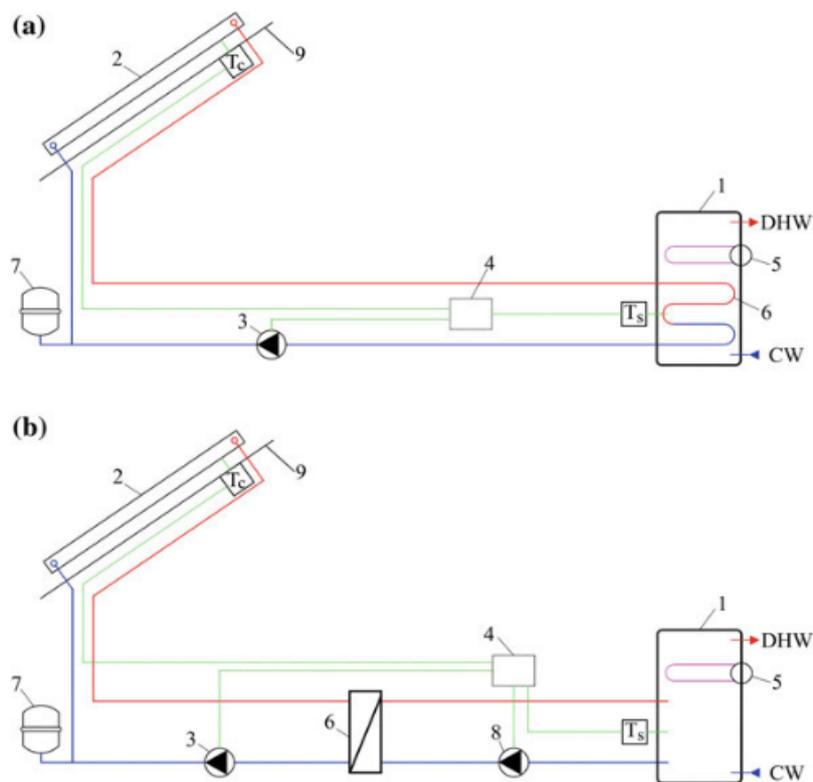


Figura 1.7. Sistemas solares de circulación forzada: a) Circuito cerrado; b) Circuito abierto: Tanque de acumulación (1), colector solar (2), bomba hidráulica (3), (8), controlador solar (4), calentador eléctrico auxiliar (5), intercambiador de calor interno/externo (6), recipiente de expansión (7), agua fría (Cold Water-CW); agua caliente sanitaria (Domestic Hot Water-DHW). (Fuente: [36])

## Bombas de calor

Las bombas de calor son sistemas energéticos que utilizan energía mecánica para transferir energía térmica (calor) desde una fuente de energía natural renovable -aire (aerotérmica), agua (hidrotérmica), tierra (geotérmica) o una fuente de calor de desecho- hacia el fluido de interés, como se muestra en la Figura 1.8 [34], [37]. Esta energía es transferida desde una fuente de temperatura baja hacia una de temperatura más alta. Las bombas de calor pueden ser clasificadas según el tipo de fuente de calor o por la configuración entre la fuente de calor y el destino de este [38].

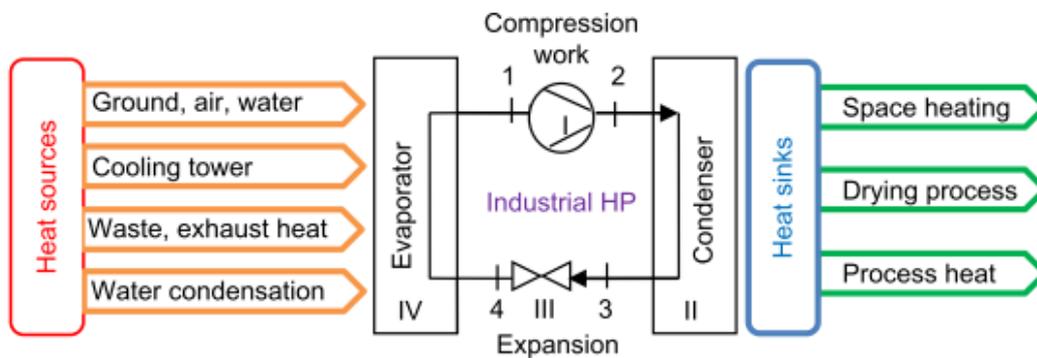


Figura 1.8. Esquema de una bomba de calor.  
(Fuente: [37])

Este tipo de sistemas están basados en el ciclo de refrigeración o compresión de vapor, en el cual el compresor es generalmente activado eléctricamente. Estos sistemas son utilizados en aplicaciones industriales y en aplicaciones residenciales como el acondicionamiento de espacios (calentamiento y enfriamiento), calentamiento de agua, entre otras [39].

Las bombas de calor se caracterizan por ser tener coeficientes de desempeño mayores a la unidad. El coeficiente de desempeño (COP, por sus siglas en inglés) de una bomba de calor es la relación entre la energía térmica producida y su consumo de energía eléctrica. De acuerdo a Oussama, I. [12], para la producción de ACS se deben instalar preferiblemente bombas de calor con fuente de aire en lugares en donde la temperatura ambiente esta sobre los 4.4 °C. Este tipo de bombas de calor tiene valores de coeficientes de desempeño típicos entre 2.5 y 3.5. Es decir, que, por cada unidad de consumo de energía eléctrica, se producen entre 2.5 y 3.5 unidades de energía térmica [40]–[42].

## Sistemas eléctricos

Los sistemas eléctricos son sistemas energéticos en donde se transforma la energía eléctrica en energía térmica en el resistor por medio del efecto Joule. El efecto Joule es el fenómeno en donde electrones en movimiento, debido una corriente eléctrica, impactan contra los átomos del material por el cual circulan (resistencia), de esta forma, su energía cinética se convierte en energía térmica elevando la temperatura del material conductor [43]. Esta energía térmica es transferida al fluido que circula a sus alrededores, como se muestra en la Figura 1.9. Estos dispositivos son activados por medio de un sensor de flujo que a su vez activa el presostato y permite el paso de

energía eléctrica a través de las resistencias. La potencia de estos sistemas varía en función del uso final.

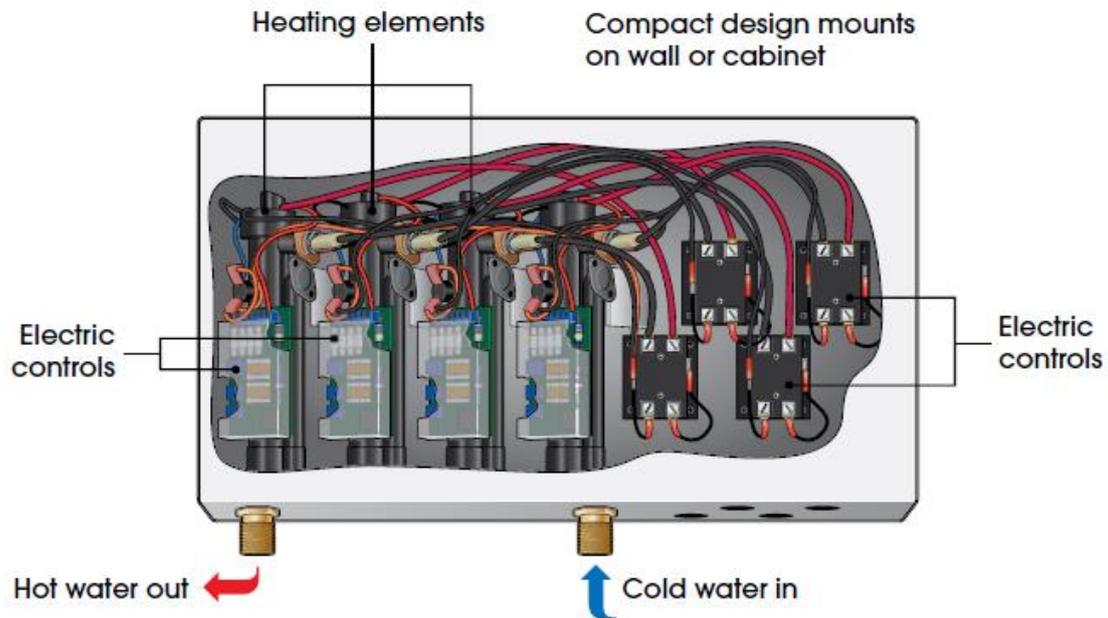


Figura 1.9. Esquema de un Calentador eléctrico.  
(Fuente: [44])

### Sistemas a gas (GLP)

Los sistemas a gas son sistemas energéticos en donde se transforma energía química, contenida en el gas licuado de petróleo (GLP) en energía térmica por medio de la combustión del GLP, y esta energía es transferida hacia el fluido de interés por medio de un intercambiador, como se muestra en la Figura 1.10 [45]. Existen dos tipos de sistemas a gas, con y sin condensamiento [46]. De acuerdo a Johnson, G. y Beausoleil-Morrison, I. [45], los calentadores a gas con condensamiento resultan ser el método convencional más eficiente para generar calor a partir de un gas.

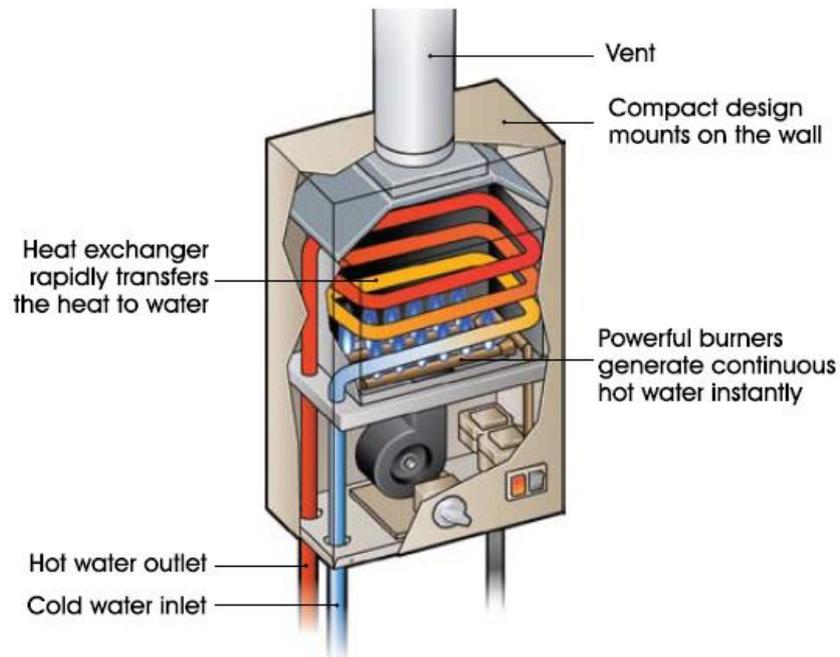


Figura 1.10. Esquema de un calefón a gas.  
(Fuente: [44])

### **Sistemas de agua caliente sanitaria combinados**

Hoy en día existen varias investigaciones y estudios sobre sistemas ACS combinados [47]–[50]. Estos pueden variar desde combinar la fuente de un sistema con la producción de energía de otro, como es el caso de las bombas de calor asistidas por paneles fotovoltaicos, o incluso quema de biomasa o biocombustible [11], [17], [51]. El objetivo es incrementar el uso de tecnologías de aprovechamiento de fuentes renovables y reducir la dependencia de las fuentes de combustibles fósiles y electricidad proveniente del sistema de distribución de energía eléctrica [52], [53].

## 2. METODOLOGÍA

En el presente capítulo se expone y desarrolla la metodología del presente trabajo, consideraciones generales y particulares del diseño, planteamiento, simulación, análisis energético, exergético y económico de los cuatro sistemas de ACS propuestos. El presente trabajo se desarrolló y ejecutó en base al flujo de trabajo representado en la Figura 2.1. Para este trabajo, el diseño y simulación de los sistemas de ACS propuestos se lo realizará a través del uso del software TRNSYS, el cual es un ambiente de simulación completo y extensible para simulación y diseño de sistemas transitorios, y ampliamente utilizado para sistemas de ACS, energías alternativas, ventilación, entre otros [54]–[56].

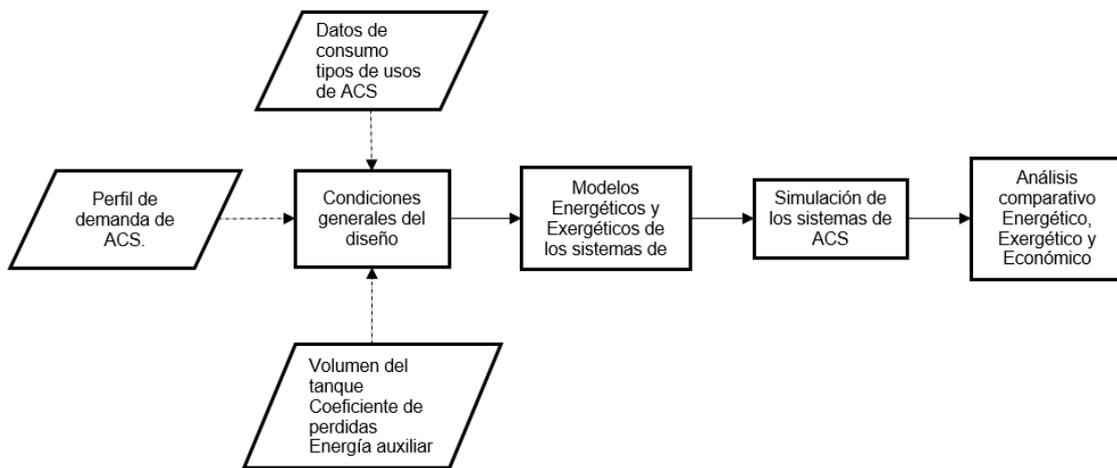


Figura 2.1. Flujo general de trabajo.  
(Fuente: Propia)

Del flujo general de trabajo, se detalla el proceso de planteamiento energético y exergético de los sistemas de ACS que se proponen representado por la Figura 2.2.

## Modelamiento Energético y Exergético de los sistemas de ACS

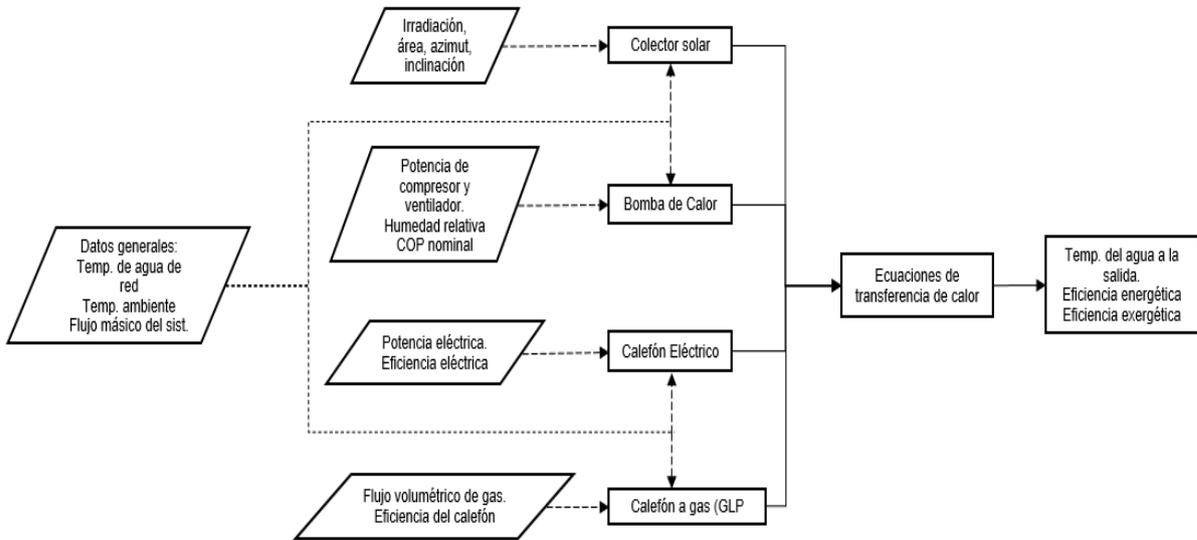


Figura 2.2 Flujo de modelamiento energético y exergético de los sistemas de ACS propuestos. (Fuente: Propia)

### 2.1. Perfil de demanda de agua caliente sanitaria

La diversidad de la demanda de ACS presenta cierta dificultad en el diseño de los sistemas de ACS. Existen perfiles de demanda de ACS promedio, como el perfil de demanda de ACS propuesto por ASHRAE en su manual HVAC Applications de ASHRAE capítulo 51 [57] representado en la Figura 2.3. Este tipo de perfiles pueden ser considerados como casos base para el diseño de sistemas de ACS. Sin embargo, factores como el estilo de vida, ubicación geográfica, número de habitantes, composición familiar, hábitos, entre otros, generan cambios en los patrones de los perfiles estándar [57]–[60]. Por esta razón, y para el presente caso de estudio, se construye un perfil de demanda de ACS, representado en la Figura 2.4, para una familia compuesta por 4 miembros con residencia en Quito a través de una encuesta online sobre los tipos de usos de ACS y sus hábitos. Esta encuesta fue respondida por 88 familias de Quito, la descripción de la encuesta y sus resultados obtenidos se observan en el Anexo A.

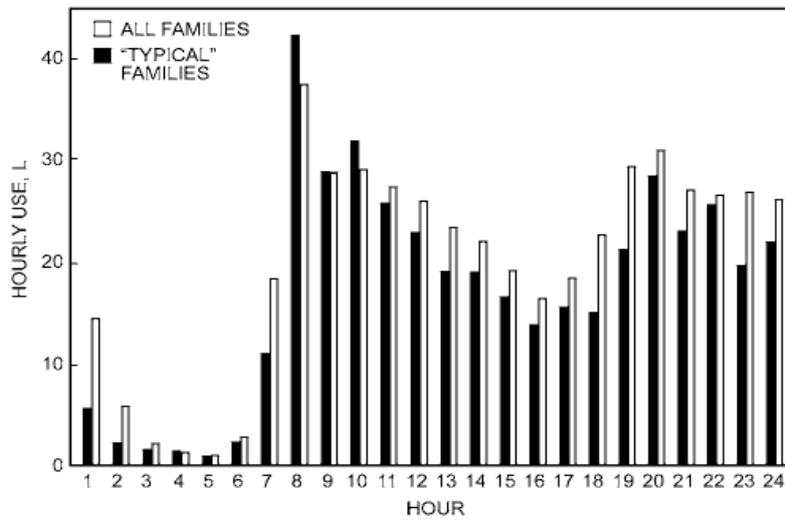


Figura 2.3. Demanda de agua caliente por horas.  
(Fuente: [57])

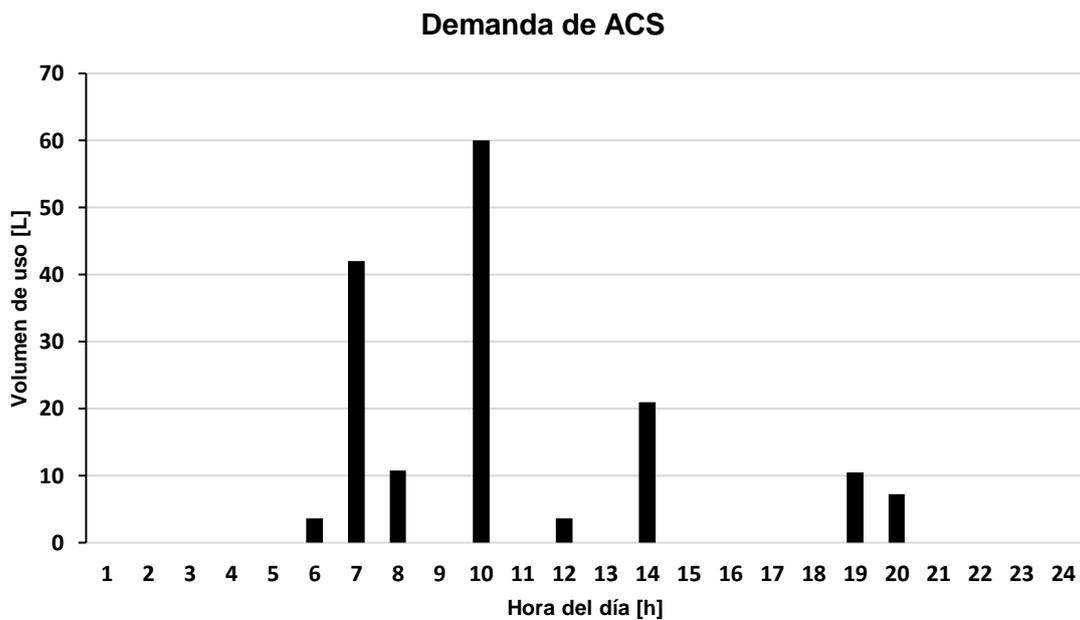


Figura 2.4. Demanda de agua caliente residencial para una familia de 4 miembros con residencia en Quito.  
(Fuente: Propia)

Los detalles del tipo de uso de ACS y el tiempo promedio de duración se encuentran descritos en la Tabla 2.1. Los caudales mínimos de ACS para cada aparato descritos en [61] y [62] son usados para este caso de estudio.

Tabla 2.1. Detalles del consumo de ACS.

Tipo de consumo de ACS	Hora real	Caudal [L/min]	Tiempo de uso [min]	Uso de ACS [L]
Aseo personal	6:01 - 6:02	1.8	2	3.6
Baño 1	7:15 - 7:23	6	7	42
Lavado platos desayuno	8:25 - 8:31	2.1	6	12.6
Baño 2	10:35 - 10:45	6	10	60
Aseo-Cocina	12:50 - 12:52	1.8	2	3.6
Lavado de platos almuerzo	14:05 - 14:15	2.1	10	21
Lavado de platos merienda	19:45 - 19:50	2.1	5	10.5
Aseo-personal	20:10 - 20:14	1.8	4	7.2
<b>Total</b>				<b>158.7</b>

(Fuente: Propia)

De la tabla se observa que el volumen total diario de ACS es casi 160 L/día, las horas de demanda pico son de 07-08h y de 10-11h con un consumo de 42 y 60L, respectivamente.

## 2.2. Datos climatológicos de Quito

Los datos climatológicos horarios necesarios para el diseño y simulación de los sistemas de ACS son: Irradiación global, irradiación difusa, temperatura ambiente, humedad relativa y temperatura de agua de red. Estos datos han sido obtenidos de la base de NSRDB-NREL (National Solar Radiation Database – Renewable Energy Laboratory) [63] y de la EPMAPS [64]. En la Tabla 2.2, se describen los valores promedio diarios de los datos climatológicos obtenidos.

Tabla 2.2. Valores promedio diarios de las variables metrológicas utilizadas para la simulación (Año 2020)

Parámetros del clima de Quito		
Parámetro	Valor	Unidad
Radiación solar global anual	5.26	$\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \text{ día}}$
Temperatura ambiente	11.09	°C
Humedad relativa	68	%
Temperatura promedio de agua de red	14.6	°C

(Fuente: [63], [64])

### 2.3. Planteamiento energético de los sistemas ACS.

Partiendo desde el punto de vista energético, los sistemas de ACS son modelados desde un volumen de control (VC) como un sistema abierto de flujo estacionario representado por la ecuación de balance de flujo de energía (2.1) [67].

$$\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} = \frac{dE_{VC}}{dt} \quad (2.1)$$

En donde  $\dot{E}_{in}$  es el flujo de energía que ingresa al VC,  $\dot{E}_{out}$  es el flujo de energía que sale del volumen de control y  $\frac{dE_{VC}}{dt}$  es la variación de energía en el VC. En este tipo de sistemas abiertos de flujo estacionario ninguna propiedad dentro o en la frontera del VC cambia con el tiempo, en consecuencia, la variación de energía dentro del sistema en estado estacionario es igual a cero ( $\frac{dE_{VC}}{dt} = 0$ ) [67].

En este sentido, la ecuación (2.1) se puede expresar en función de entradas y salidas de flujos de calor y trabajos como se muestra a continuación.

$$\dot{Q}_{in} + \dot{W}_{in} + \dot{m}_{fl,ACS,in} h_{fl,in} = \dot{Q}_{out} + \dot{W}_{out} + \dot{m}_{fl,ACS,out} h_{fl,out} \quad (2.2)$$

En donde en el lado izquierdo de la ecuación (2.1),  $\dot{Q}_{in}$ ,  $\dot{W}_{in}$ ,  $\dot{m}_{fl,ACS,in}$ ,  $h_{fl,in}$  son el flujo de calor, trabajo, flujo másico y entalpía del fluido, respetivamente, que ingresan al VC. Por el lado derecho de la ecuación (2.1),  $\dot{Q}_{out}$ ,  $\dot{W}_{out}$ ,  $\dot{m}_{fl,ACS,out}$ ,  $h_{fl,out}$  son el flujo de calor, trabajo, flujo másico y entalpía del fluido, respetivamente, que salen del VC. Adicionalmente, el flujo másico de agua a la entrada y salida del sistema de ACS es el mismo ( $\dot{m}_{fl,ACS,in} = \dot{m}_{fl,ACS,out} = \dot{m}_{fl,ACS}$ )

La eficiencia energetica del sistema de ACS es la relación entre el flujo de energía útil, el cual es transferido hacia el fluido, y el flujo de energía suministrada al VC como se muestra en la ecuación (2.3).

$$n = \frac{\dot{E}_u}{\dot{E}_s} \quad (2.3)$$

En donde  $\dot{E}_u$  es el flujo de energía útil transferido al fluido, y  $\dot{E}_s$  es el flujo de energía suministrado al VC. La energía útil adquirida por el fluido al pasar por el VC del sistema de ACS puede ser expresada como se muestra en la ecuación (2.4).

$$\dot{E}_u = \dot{m}_{fl,ACS}(h_{fl,out} - h_{fl,in}) \quad (2.4)$$

En donde  $h_{fl,out}$  y  $h_{fl,in}$  son las entalpías específicas del fluido a la salida y entrada, respectivamente. Como se mencionó previamente, al no existir variación de volumen por parte del fluido de trabajo al pasar por el VC de todos los sistemas de ACS, la ecuación (2.4) puede ser expresada como se muestra a continuación.

$$\dot{E}_u = \dot{m}_{fl,ACS}(h_{fl,out} - h_{fl,in}) = \dot{m}_{fl,ACS}C_p(T_{fl,out} - T_{fl,in}) \quad (2.5)$$

En donde  $C_p$  es el calor específico del agua a presión constante,  $T_{fl,out}$  y  $T_{fl,in}$  son las temperaturas del fluido a la salida y entrada del volumen de control del sistema de ACS, respectivamente.

El análisis de la energía suministrada al VC depende de cada sistema de ACS.

## 2.4. Planteamiento exergético de los sistemas ACS

Desde el punto de vista exergético, los sistemas de ACS también son modelados partiendo desde un volumen de control (VC) como un sistema abierto de flujo estacionario representado de acuerdo a la ecuación de balance de flujo de exergía (2.6) [67].

$$\begin{aligned} \frac{dE_{xCV}}{dt} = & \sum_j \left(1 - \frac{T_a}{T_j}\right) \dot{Q}_j - \left[\dot{W} - p_a \left(\frac{dV_{CV}}{dt}\right)\right] + \sum_{in} \dot{m}_{fl,ACS,in} e_{xfl,in} \\ & - \sum_{out} \dot{m}_{fl,ACS,out} e_{xfl,out} - \dot{E}_{xd} \end{aligned} \quad (2.6)$$

En donde  $\frac{dE_{xCV}}{dt}$  es el cambio de exergía en el VC de cada sistema de ACS,  $T_j$  y  $\dot{Q}_j$  son la temperatura y el flujo de calor de la fuente de exergía, respectivamente,  $\dot{W}$  es el flujo de trabajo,  $p_a$  es la presión ambiente,  $\frac{dV_{CV}}{dt}$  es el cambio de volumen del VC,  $e_{xfl,in}$  y  $e_{xfl,out}$  es la exergía específica del fluido de trabajo a la entrada y salida del VC, respectivamente, y finalmente  $\dot{E}_{xd}$  es el flujo de exergía destruida en el proceso [67]. Adicionalmente, para este análisis se toman en cuenta las consideraciones del VC previamente mencionadas del volumen de control y se aplican al planteamiento exergético,  $\left(\frac{dE_{xCV}}{dt} = 0, \dot{m}_{fl,ACS,in} = \dot{m}_{fl,ACS,out} = \dot{m}_{fl,ACS}\right)$ .

La eficiencia exergética del sistema de ACS es la relación entre la exergía del producto y la exergía de la fuente como se muestra en la ecuación (2.7) [70].

$$\psi = \frac{\sum \dot{E}_{xp}}{\sum \dot{E}_{xfe}} \quad (2.7)$$

En donde  $\dot{E}_{xp}$  es el flujo de exergía del producto y  $\dot{E}_{xfe}$  es el flujo de exergía de la fuente.

Para el presente caso de estudio, el flujo de exergía del producto corresponde al flujo de exergía ganada por el fluido al pasar a través del VC de cada sistema de ACS.

La ganancia de exergía por parte del fluido se ve en el cambio de exergía entre la salida y la entrada del VC de cada sistema de ACS y se representa por la ecuación (2.8) [71].

$$\sum \dot{E}_{xfl,ACS} = \sum \dot{E}_{xfl,ACS,out} - \sum \dot{E}_{xfl,ACS,in} \quad (2.8)$$

La ecuación (2.8) puede ser expresada y evaluada en función de las exergías específicas a la entrada y salida del VC y sus respectivos flujos másicos como se muestra a continuación.

$$\sum \dot{E}_{xfl,ACS} = \sum_{out} \dot{m}_{fl,ACS,out} e_{xfl,out} - \sum_{in} \dot{m}_{fl,ACS,in} e_{xfl,in} \quad (2.9)$$

La solución a la ganancia de exergía por parte del fluido en función de la temperatura del fluido, a la salida y entrada, y la temperatura ambiente se representan de acuerdo a la ecuación (2.10) [72].

$$\sum \dot{E}_{xfl} = \dot{m}_{fl,ACS} C_p \left[ (T_{fl,out} - T_{fl,in}) - T_a \left( \ln \frac{T_{fl,out}}{T_{fl,in}} \right) \right] \quad (2.2)$$

El análisis de exergía de la fuente depende de cada sistema de ACS.

## 2.5. Análisis y diseño de los sistemas de ACS propuestos

Tomando como punto de partida el modelamiento energético y exergético general de los sistemas de ACS propuestos previamente mencionados, se procede a presentar las ecuaciones de cada caso según corresponda y modelar los sistemas en TRNSYS.

Los sistemas de ACS a ser estudiados son: Sistema de colector solar de placa plana con circulación forzada, sistema de bomba de calor con fuente de aire, sistema de calefón eléctrico y sistema de calefón GLP.

## Sistema de Colector Solar de placa plana con circulación forzada

El sistema de colector solar tiene un sistema auxiliar eléctrico para asegurar la continuidad del servicio de agua caliente sanitaria en caso de que el recurso solar sea insuficiente. El funcionamiento del sistema de colector solar de placa plana con circulación forzada se ilustra en la Figura 2.5.

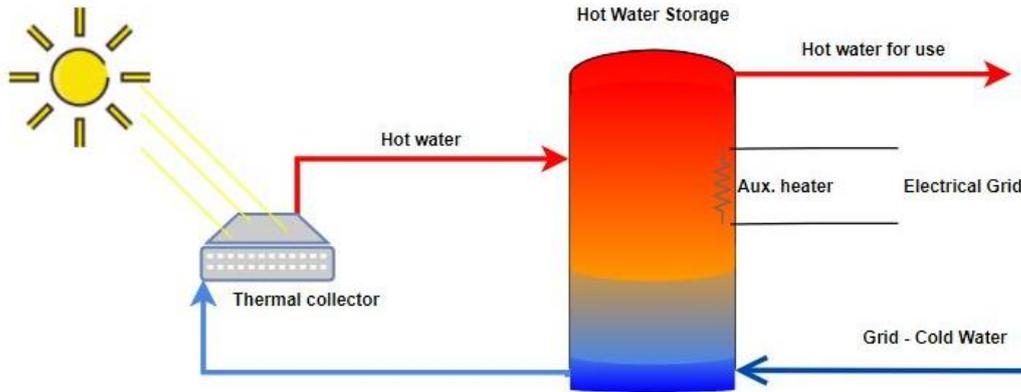


Figura 2.5. Ilustración de sistema de colector solar de placa plana con circulación forzada. (Fuente: Propia)

Tomando en cuenta las consideraciones generales previamente mencionadas, se añade que en este sistema no existe trabajo a la entrada o salida del VC ( $\dot{W}_{in} = \dot{W}_{out} = 0$ ). El flujo de energía útil es el flujo de calor útil,  $\dot{Q}_u$ , el cual puede ser expresado en términos del fluido de trabajo o en función de la irradiación total en la superficie del colector y de el flujo de calor debido a pérdidas como se representa de acuerdo con la ecuación (2.11) [33], [73], [74].

$$\dot{Q}_u = \dot{m}_{fl} C_p (T_{fl,out} - T_{fl,in}) = G_{Tot} A_{Colec} - U_{Colec} A_{Colec} (T_{fl,out} - T_a) \quad (2.11)$$

En donde  $G_{Tot}$  es la irradiación total sobre la superficie del colector,  $A_{Colec}$  es el área de recepción del colector y  $U_{Colec}$  es el coeficiente global de pérdidas térmicas del colector solar.

Siendo conocidos los términos  $n_o$ ,  $k_1$  y  $k_2$ , la eficiencia energética del colector solar puede ser evaluada su ecuación de eficiencia cuadrática de acuerdo con la ecuación (2.12) [75].

$$n_{Colec} = n_o - k_1 \left( \frac{T_{fl,in} - T_a}{G_{Tot}} \right) - k_2 \left( \frac{T_{fl,in} - T_a}{G_{Tot}} \right)^2 \quad (2.12)$$

La ecuación de eficiencia del colector solar de placa plana también puede ser escrita como la relación del flujo de calor o energía útil transferido al fluido, sobre el flujo de

calor o energía recibida la cual se representa de acuerdo con la ecuación (2.13) [33], [34].

$$n_{colec} = \frac{\dot{Q}_u}{\dot{Q}_s} \quad (2.13)$$

En donde  $\dot{Q}_s$  es el flujo de calor de la fuente, en otras palabras, es la irradiación total sobre el área de recepción del colector.

En este sentido al reemplazar el flujo de calor útil y el flujo de calor suministrado al colector, la ecuación de eficiencia del colector solar de placa plana se representa de acuerdo con la ecuación (2.14) [34], [76].

$$n_{colec} = \frac{\dot{m}_{fl} C_p (T_{fl,out} - T_{fl,in})}{G_{Tot} A_{Colec}} \quad (2.14)$$

Desde el punto de vista exergético, el flujo de exergía ganado por el fluido al pasar por el VC del colector solar se representa por la ecuación (2.2). Por otro lado, el flujo de exergía de la fuente analizado y descrito en [72] es utilizado para el presente caso de estudio y se representa por la ecuación (2.15) que se muestra a continuación.

$$\sum \dot{E}_{xfe} = \sum G_{Tot} A_{Colec} \left[ 1 - \frac{4}{3} \left( \frac{T_a}{T_{sun}} \right) + \frac{1}{3} \left( \frac{T_a}{T_{sun}} \right)^4 \right] \quad (2.15)$$

En donde  $T_{sun}$  es la temperatura del sol considerado como cuerpo negro. En este sentido, al reemplazar la ecuación (2.2) y (2.15) en la ecuación (2.7), se obtiene la expresión de eficiencia exergética del colector solar de placa plana que se muestra a continuación.

$$\psi_{colec} = \frac{\dot{m}_{fl} C_p \left[ (T_{fl,out} - T_{fl,in}) - T_a \left( \ln \frac{T_{fl,out}}{T_{fl,in}} \right) \right]}{G_{Tot} A_{Colec} \left[ 1 - \frac{4}{3} \left( \frac{T_a}{T_{sun}} \right) + \frac{1}{3} \left( \frac{T_a}{T_{sun}} \right)^4 \right]} \quad (2.16)$$

El diseño del sistema de colector solar de placa plana con circulación forzada se lo realizó en TRNSYS y esta ilustrado por la Figura 2.6.

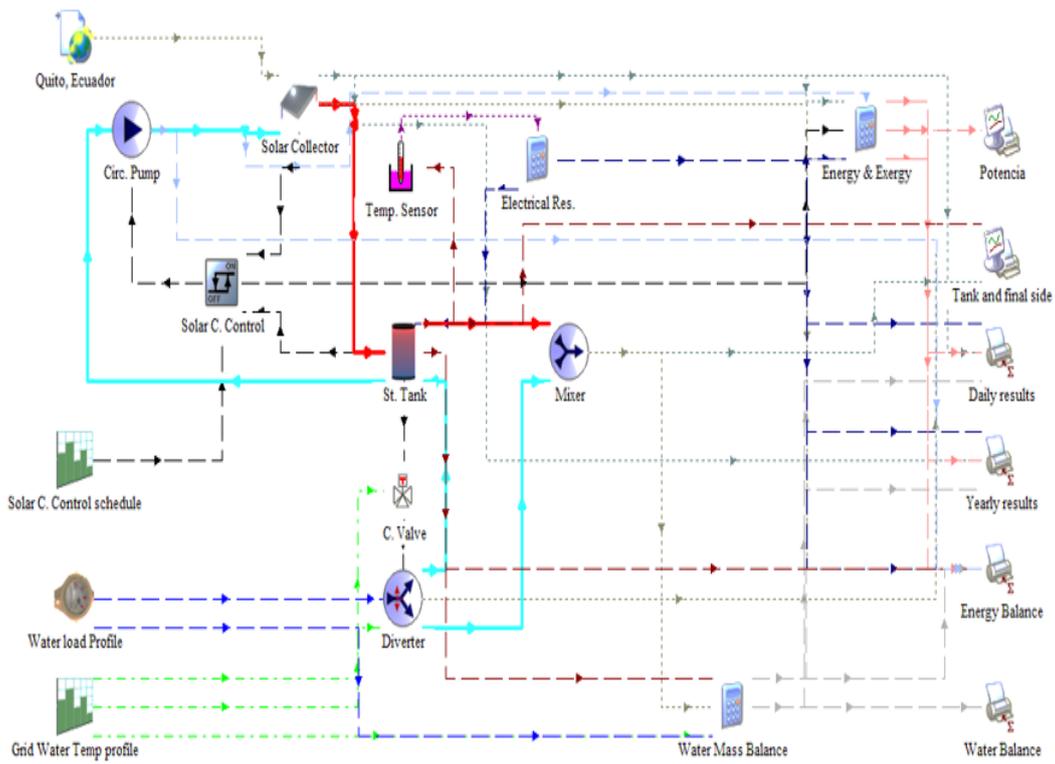


Figura 2.6. Ilustración del sistema de panel solar de placa plana con circulación forzada en TRNSYS.  
(Fuente: Propia)

Los parámetros de simulación del sistema de Colector solar de placa plana con circulación forzada se especifican en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Parámetros de diseño del sistema de colector solar de placa plana con circulación forzada para simulación.

Parámetros del colector solar		
Parámetro	Valor	Unidad
Área del colector	4.01	m <sup>2</sup>
Rendimiento óptico del colector - $n_o$	0.839	-
Coefficiente lineal de pérdidas térmicas - $k_1$	3.47	$\frac{W}{m^2 \cdot k}$
Coefficiente cuadrático de pérdidas térmicas - $k_2$	0.0106	$\frac{W}{m^2 \cdot k^2}$
Flujo másico	0.005	$\frac{L}{s}$

(Fuente: [77])

## Sistema de Bomba de calor con fuente de aire

La bomba de calor es modelada como un ciclo. Para el presente caso de estudio, se emplea el análisis energético de una bomba de calor descrito en [38], [70]. El funcionamiento del sistema de bomba de calor con fuente de aire se ilustra en la Figura 2.7.

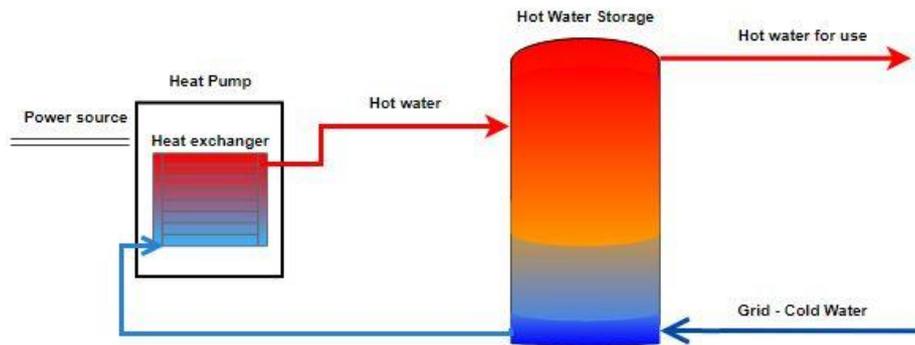


Figura 2.7. Ilustración de sistema de bomba de calor.  
(Fuente: Propia)

Desde el punto de vista energético, el objetivo de una bomba de calor como sistema de ACS es entregar la energía adquirida a través del evaporador y compresor hacia el agua circulando por el condensador como se representa por la ecuación (2.17).

$$\dot{Q}_{out} = \dot{Q}_{in} + \dot{W}_{net} \quad (2.17)$$

En donde el flujo de calor a la entrada ocurre en el evaporador por transferencia de calor del ambiente (aire) hacia el refrigerante y, esta representado de acuerdo a la ecuación (2.18).

$$\dot{Q}_{in} = \dot{m}_r(h_{r,1} - h_{r,4}) \quad (2.18)$$

En donde  $\dot{m}_r$  es el flujo másico de refrigerante que circula en el ciclo cerrado,  $h_{r,1}$  y  $h_{r,4}$  son las entalpías del refrigerante a la salida y entrada del evaporador, respectivamente.

El flujo de trabajo neto hacia la bomba es la suma del flujo de trabajo del compresor y ventilador como se representan en las ecuaciones (2.19), (2.3) y (2.4).

$$\dot{W}_{net} = \dot{W}_{comp} + \dot{W}_{vent} \quad (2.19)$$

$$\dot{W}_{comp} = P_{comp} n_{comp} \quad (2.3)$$

$$\dot{W}_{vent} = P_{vent} n_{vent} \quad (2.4)$$

En donde  $P_{comp}$  y  $P_{vent}$  son las potencias nominales del compresor y ventilador respectivamente,  $n_{comp}$  y  $n_{vent}$  son las eficiencias del compresor y ventilador, respectivamente. Estos datos son parámetros de simulación y son proporcionados por cada fabricante.

El flujo de calor a la salida del condensador, conocido como capacidad de calentamiento, es el flujo de calor transferido hacia el fluido de interés y se lo relaciona de acuerdo a la ecuación (2.5) [38]

$$\dot{Q}_{out} = \dot{Q}_{calentamiento} = \dot{m}_{fl} C_p (T_{fl,out} - T_{fl,in}) \quad (2.5)$$

Respecto a la eficiencia energética, el coeficiente de desempeño energético de la bomba de calor,  $COP_{en}$ , es el indicador de eficiencia energética de una bomba de calor. Este coeficiente de desempeño es la relación entre la capacidad de calentamiento y la potencia eléctrica de entrada a la bomba de calor por parte del compresor y ventilador y se la representa por la ecuación (2.26) [41].

$$COP_{en} = \frac{\dot{Q}_{out}}{\dot{W}_{net}} \quad (2.26)$$

Desde el punto de vista exergético, el flujo de exergía ganado por el fluido al pasar por el condensador de la bomba de calor igualmente representado por la ecuación (2.2). Por otro lado, de acuerdo a [78], la exergía de la fuente en este sistema de bomba de calor es la suma de la exergía del aire y de la potencia eléctrica del compresor y ventilador representada por la ecuación (2.24).

$$\dot{E}_{xfe} = \dot{E}_{x_{aire}} + \dot{W}_{comp,vent} \quad (2.24)$$

La eficiencia exergética previamente definida por la ecuación (2.7), aplicada al sistema de ACS por bomba de calor se representa por la ecuación (2.25).

$$\psi_{B.Calor} = \frac{\sum \dot{E}_{xfl,out} - \sum \dot{E}_{xfl,in}}{\dot{E}_{xaire} + \dot{W}_{comp,vent}} \quad (2.25)$$

La solución a la ecuación (2.25) está en función del COP energético se utiliza en el presente caso de estudio y es representada por la ecuación a continuación.

$$\psi_{B.Calor} = \frac{COP \left( 1 - \frac{T_a}{T_{fl,out,bomba}} \right)}{1 + (COP - 1) \left( \frac{T_a}{T_{aire}} \right) + W_{comp,vent}} \quad (2.26)$$

Adicionalmente, otro parámetro de eficiencia exergética es el COP exergético [70]. El cual es definido como la eficiencia exergética del ciclo operado en modo de calentamiento y representado por la ecuación a continuación [37].

$$\psi = COP_{ex} = \frac{\dot{Q}_H \left( 1 - \frac{T_a}{T_{out}} \right)}{\dot{W}_{net}} = \frac{\dot{W}_{min}}{\dot{W}_{net}} = \frac{COP_{en}}{COP_{carnot}} \quad (2.27)$$

En donde el  $\dot{Q}_H$  es la capacidad de calentamiento,  $\dot{W}_{min}$  es la mínima potencia mecánica requerida e igual a la capacidad de calentamiento de la bomba cuando la destrucción de exergía es igual a 0,  $COP_{carnot}$  es el coeficiente de desempeño máximo de un ciclo de bomba de calor operando entre los límites de temperatura baja (temperatura ambiente) y de temperatura alta (temperatura máxima de salida del fluido) representado en la ecuación (2.28).

$$COP_{carnot} = \left( \frac{T_{out}}{T_{out} - T_a} \right) \quad (2.28)$$

En este sentido el COP exergético empleado en este análisis se representa por la ecuación a continuación.

$$COP_{ex} = \frac{\dot{Q}_{out}}{\dot{W}_{net}} \left( 1 - \frac{T_a}{T_{out}} \right) = COP_{en} \left( 1 - \frac{T_a}{T_{out}} \right) \quad (2.29)$$

El diseño del sistema de bomba de calor se lo realizó en TRNSYS y está ilustrado por la Figura 2.8.

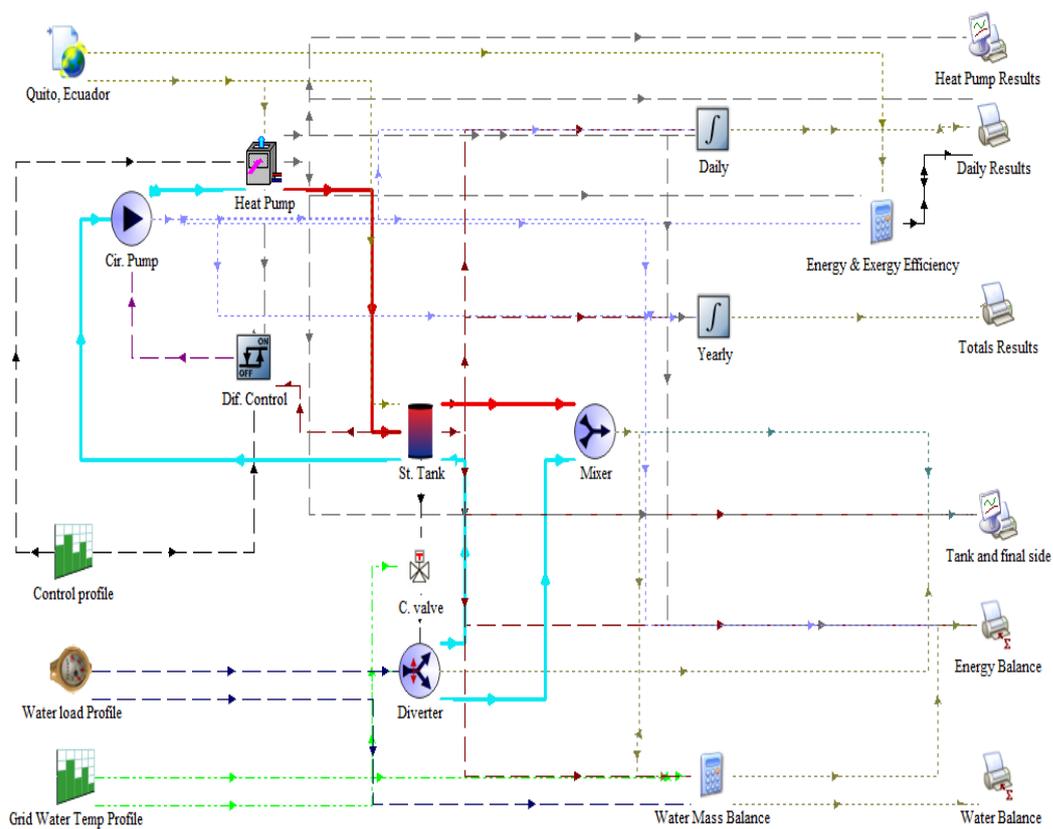


Figura 2.8. Ilustración del sistema de bomba de calor en TRNSYS.  
(Fuente: Propia)

Los parámetros de simulación del sistema de bomba de calor se especifican en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4. Parámetros de diseño del sistema de bomba de calor para simulación.

Parámetros de la bomba de calor		
Parámetro	Valor	Unidad
COP nominal	3.6	-
Potencia nominal del compresor	2.4	kW
Capacidad de calentamiento	8	kW

(Fuente:[79])

## Sistema de Calefón eléctrico

El esquema de funcionamiento del sistema de calefón eléctrico se ilustra en la Figura 2.9.

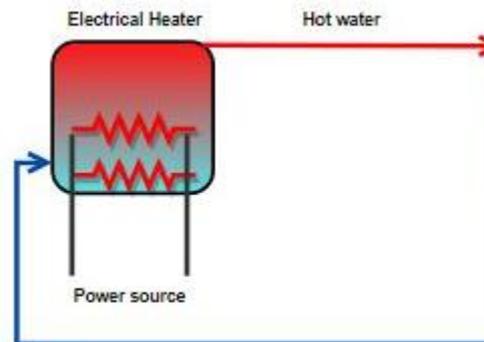


Figura 2.9. Ilustración del esquema sistema de calefón eléctrico.  
(Fuente: Propia)

Partiendo del planteamiento energético y de las consideraciones de volumen de control previamente mencionadas, en la ecuación (2.1), para este caso, se asume que no existe calor de salida, ( $\dot{Q}_{out} = 0$ ) y que el calor de entrada necesario para calentar el agua es el trabajo eléctrico transformado en calor representado por la ecuación (2.7)

$$\dot{Q}_{in} = \dot{W}_{in,res} n_{C.Elec} \quad (2.7)$$

En donde  $n_{C.Elec}$  es la eficiencia de transformación de electricidad en calor. Adicionalmente, este flujo de calor de entrada es el calor útil transferido al agua y representado por la ecuación (2.4) previamente mencionada.

De esta forma, la eficiencia energética del sistema de calefón eléctrico es como se muestra en la ecuación (2.31).

$$n_{C.Elec} = \frac{\dot{m}_{fl} C_p (T_{fl,out} - T_{fl,in})}{\dot{W}_{in,res}} \quad (2.8)$$

Desde el punto de vista exergético, el flujo de exergía ganado por el fluido al pasar por el VC del calefón eléctrico también es descrito por la ecuación (2.2). Por otro lado, el flujo de exergía asociada con la electricidad es igual al flujo de energía eléctrica como se muestra en la ecuación (2.32).

$$\dot{E}_{x_{fe}} = \dot{W}_{elec} \quad (2.9)$$

En este sentido, la eficiencia exergética del sistema de calefón eléctrico esta representado por la ecuación (2.33).

$$\psi_{C.Elec} = \frac{\dot{m}_{fl,ACS} C_p \left[ (T_{fl,out} - T_{fl,in}) - T_a \left( \ln \frac{T_{fl,out}}{T_{fl,in}} \right) \right]}{W_{elec}} \quad (2.33)$$

En el caso de que no exista demanda y las resistencias eléctricas se encuentren inmersas dentro del tanque, estas se activarán para mantener un nivel de temperatura. Por lo tanto, se propone un análisis energético y exergético de sistema cerrado detallado en el Anexo B.

El diseño del sistema calefón eléctrico se lo realizó en TRNSYS y esta ilustrado por la Figura 2.10.

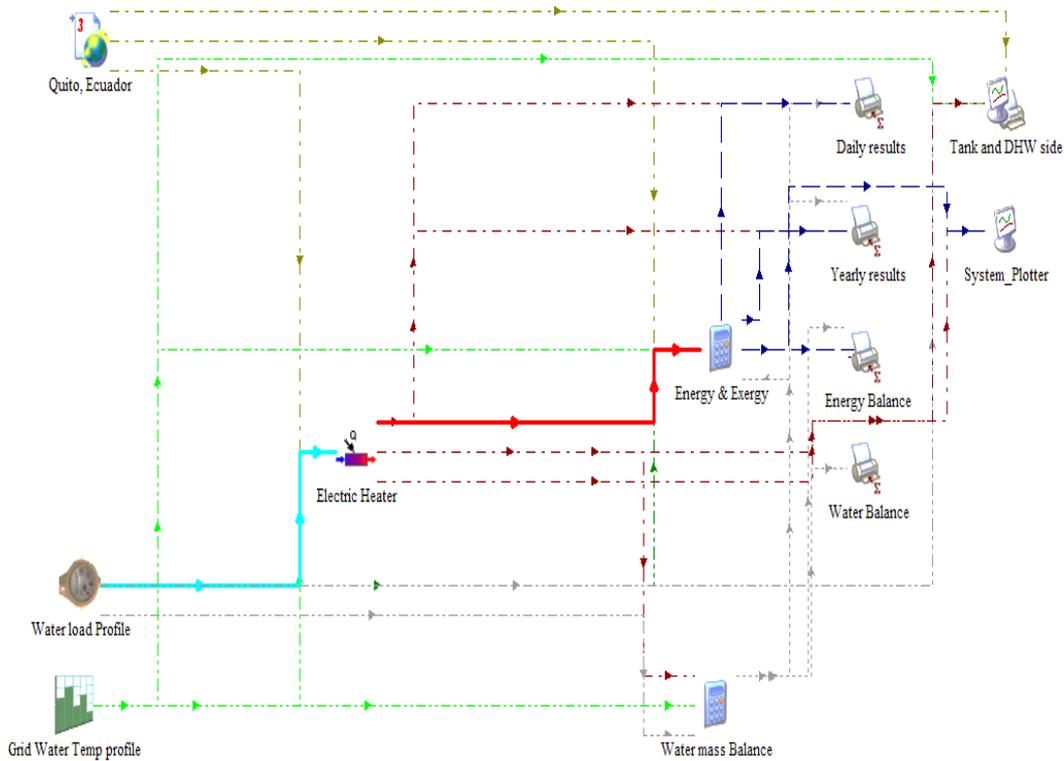


Figura 2.10. Ilustración del sistema de calefón eléctrico en TRNSYS.  
(Fuente: Propia)

Los parámetros de simulación del sistema de calefón eléctrico se especifican en la Tabla 2.5.

Tabla 2.5. Parámetros de diseño del sistema de calefón eléctrico para simulación.

Parámetros del calefón eléctrico		
Parámetro	Valor	Unidad
Eficiencia global	90	%
Potencia de calentamiento	13.5	kW

(Fuente: [80])

## Sistema de Calefón a gas

El funcionamiento del sistema de calefón a gas se ilustra en la Figura 2.11.

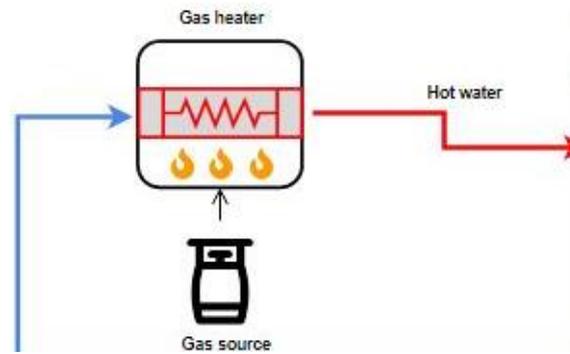


Figura 2.11. Ilustración de sistema de calefón a gas.  
(Fuente: Propia)

Partiendo del planteamiento energético y de las consideraciones de volumen de control previamente mencionadas, para el VC del calefón a gas se considera que no existe trabajo a la entrada o salida del del mismo ( $\dot{W}_{in} = \dot{W}_{out} = 0$ ). El flujo de calor de entrada al VC del calefón a gas representado en la ecuación (2.1) es el flujo de calor producido por la combustión del GLP descrito en la ecuación (2.310) [45].

$$\dot{Q}_{in} = \dot{V}_{fuel}HHV \quad (2.310)$$

En donde  $\dot{V}_{fuel}$  es el flujo volumetrico de GLP a ser quemado y  $HHV$  es el poder calórico superior del GLP.

Por otro lado, el flujo de calor que sale del VC del calefón a gas es el flujo calor debido a pérdidas ( $\dot{Q}_{out} = \dot{Q}_{perd}$ ), el cual esta representado por la ecuación (2.35) [81].

$$\dot{Q}_{perd} = U_{C.gas}A_{C.gas}(T_{out} - T_a) \quad (2.35)$$

En donde  $U_{C.gas}$  y  $A_{C.gas}$  es el coeficiente global de pérdidas térmicas y el área del calefón a gas, respectivamente.

En este sentido el calor útil transferido al flujo de agua que entra al VC del calefón a gas se expresa mediante la ecuación (2.11) [45].

$$\dot{m}_{fl}C_p(T_{fl,out} - T_{fl,in}) = \dot{V}_{fuel}HHV - UA_{C.gas}(T_{fl,out} - T_a) \quad (2.11)$$

Consecuentemente, la eficiencia del calefón a gas se representa por la ecuación (2.37).

$$n_{C.Gas} = \frac{\dot{m}_{fl} C_p (T_{fl,out} - T_{fl,in})}{\dot{V}_{fuel} HHV} \quad (2.37)$$

Para el balance del flujo de exergía, se parte desde el planteamiento exergético descrito por la ecuación (2.6) previamente mencionada, la cual aplicada al VC del calefón a gas se obtiene la expresión a continuación.

$$\left(1 - \frac{T_a}{T_{fe}}\right) \dot{Q}_{fe} = \sum \dot{E}_{x_{fl,out}} - \sum \dot{E}_{x_{fl,in}} + \dot{E}_{x_d} \quad (2.38)$$

El flujo de exergía ganado por el fluido al pasar por el VC del calefón a gas de igual forma es descrito por la ecuación (2.2). Por otro lado, el flujo de exergía asociada con la fuente se representa por la ecuación a continuación [82].

$$\dot{E}_{x_{fe}} = \left(1 - \frac{T_a}{T_{fe}}\right) \dot{V}_{fuel} HHV \quad (2.39)$$

En este sentido, la eficiencia exergética asociada al sistema de ACS de calefón a gas se representa por la ecuación (2.40).

$$\psi_{C.Gas} = \frac{\dot{m}_{fl,ACS} C_p \left[ (T_{fl,out} - T_{fl,in}) - T_a \left( \ln \frac{T_{fl,out}}{T_{fl,in}} \right) \right]}{\left(1 - \frac{T_a}{T_{fe}}\right) \dot{V}_{fuel} HHV} \quad (2.40)$$

El diseño del sistema calefón a gas se lo realizó en TRNSYS y esta ilustrado por la Figura 2.12.

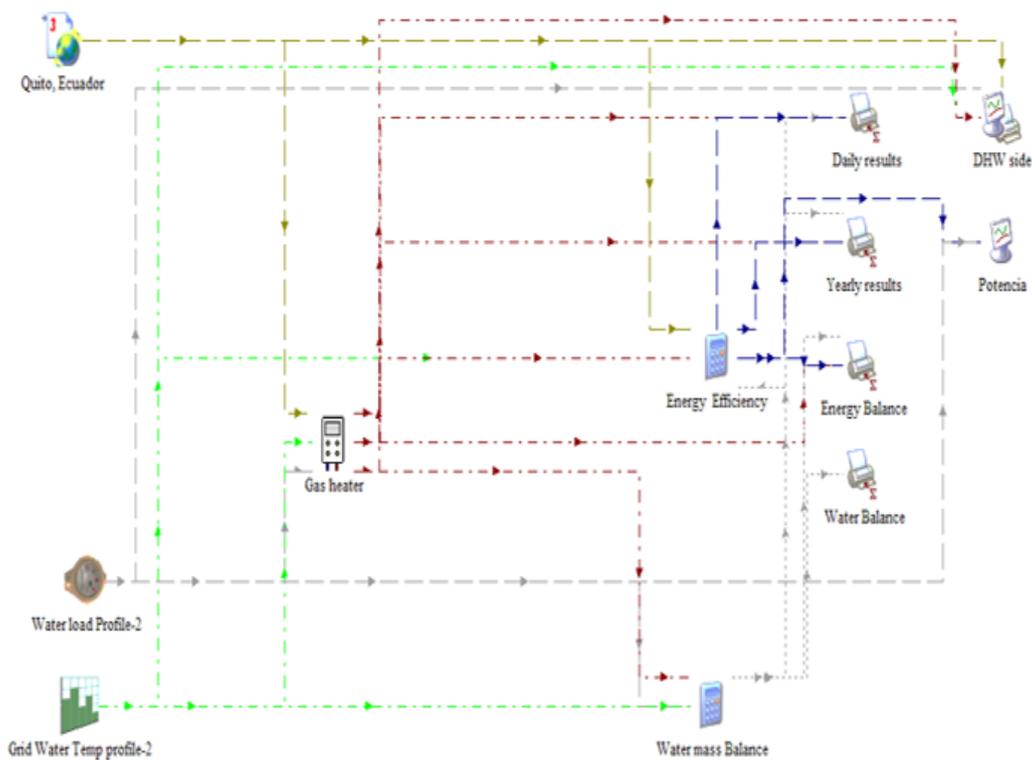


Figura 2.12. Ilustración del sistema de calefón a gas en TRNSYS.  
(Fuente: Propia)

Los parámetros de simulación del sistema de calefón a gas se especifican en la Tabla 2.6.

Tabla 2.6. Parámetros de diseño del sistema de calefón a gas para simulación.

Parámetros del calefón a gas		
Parámetro	Valor	Unidad
Eficiencia global	60	%
Capacidad de calentamiento	21	kW

(Fuente: [80])

## 2.6. Generalidades de los sistemas de ACS propuestos.

Tanto para el diseño como para el planteamiento energético y exergético y la simulación de los cuatro sistemas de ACS propuestos, se toman en cuenta condiciones generales como la temperatura de entrada del agua de red, temperatura de uso final, temperatura ambiente y caudales máxicos de agua en función del tipo de uso final. Adicionalmente, el cambio de energía y exergía debido a la variación cinética y potencial se desprecian en los análisis y simulación.

Para los sistemas con acumulación de ACS; sistema de colector solar y bomba de calor, se analizan parámetros como el volumen del tanque, balance energético y temperatura de los nodos verticales del tanque.

### **Volumen del tanque de acumulación de ACS**

El cálculo del volumen del tanque de acumulación está basado en las recomendaciones propuestas por [57] y [62], en las cuales se indica que entre el 60-80% del agua caliente en el tanque se asume como utilizable antes de que la dilución por agua fría reduzca la temperatura por debajo de niveles aceptables. Tomando en cuenta que la demanda pico más alta del perfil de ACS sería similar al posible evento de dos baños simultáneos de igual duración, el 80% de agua caliente utilizable deberá cubrir esta demanda y/o posible evento. De esta forma, la cantidad de agua caliente utilizable en el tanque se representa de acuerdo con la ecuación (2.412) [57].

$$V_{tanque} = Rd + MS_t \quad (2.412)$$

En donde el término  $R$  es la tasa de recuperación de agua caliente a una temperatura requerida, la cual para el caso de estudio es 0. El término  $d$  es la duración de la demanda pico, el término  $M$  es el porcentaje de agua caliente utilizable, el término  $S_t$  representa la capacidad total de agua acumulada en el tanque y el término  $V_{tanque}$  es la cantidad de agua caliente utilizable en el tanque. En consecuencia, con un 80% de agua caliente utilizable en el tanque de acumulación, la capacidad total de agua en el tanque para el caso de estudio está representada por la expresión que se muestra en la ecuación (2.413)

$$S_t = \frac{V_{tanque}}{M} \quad (2.413)$$

$$S_t = 200 [L]$$

### **Balance energético del tanque de acumulación de ACS**

A través del modelo descrito en TRNSYS de balance de energía de un volumen de control representado por la ecuación (2.414) [66] el cual es aplicado al tanque, se identifican los tipos de energía que interactúan a la entrada, salida y alrededores del tanque representado en la Figura 2.13.

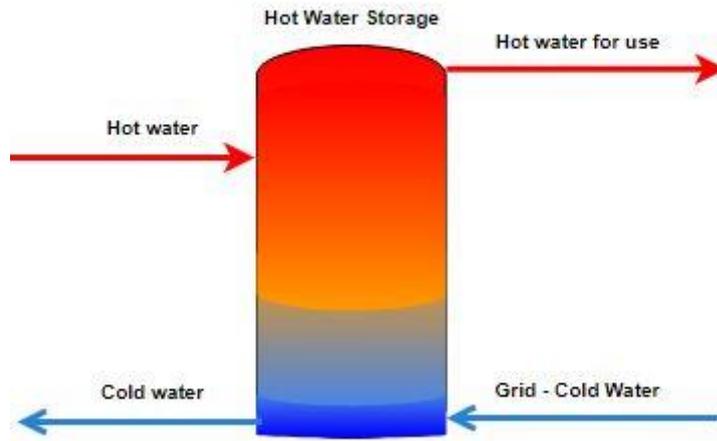


Figura 2.13. Tanque de acumulación de ACS.  
(Fuente: Propia)

$$E_{in} + E_g = E_{out} + E_{alm} \quad (2.414)$$

En donde  $E_{in}$  es la energía que ingresa al tanque,  $E_g$  es la energía generada,  $E_{out}$  es la energía que sale del tanque y  $E_{alm}$  es la energía almacenada por el fluido dentro del tanque de acumulación.

La ecuación (2.414) se puede expresar como flujos en función del tiempo como se muestra a continuación.

$$\dot{E}_{in} + \dot{E}_g = \dot{E}_{out} + \dot{E}_{alm} \quad (2.43)$$

El flujo de energía que ingresa al tanque varía en función del dispositivo de calentamiento, y se representa por la ecuación (2.415) [67].

$$\dot{E}_{in} = \dot{m}_{fl,ACS}(h_{fl,out} - h_{fl,in}) \quad (2.415)$$

En donde  $\dot{m}_{fl,ACS}$  es el flujo másico de agua que pasa por el sistema de ACS,  $h_{fl,out}$  y  $h_{fl,in}$  son la entalpía específica del fluido a la salida y entrada del sistema de ACS, respectivamente. Al no existir variación de volumen por parte del fluido de trabajo al pasar por los diferentes sistemas de ACS, la ecuación (2.415) puede ser expresada como se muestra a continuación [67].

$$\dot{E}_{in} = \dot{m}_{fl,ACS}(h_{fl,out} - h_{fl,in}) = \dot{m}_{fl,ACS}C_p(T_{fl,out} - T_{fl,in}) \quad (2.45)$$

En donde  $C_p$  es el calor específico del agua a presión constante,  $T_{fl,out}$  y  $T_{fl,in}$  son la temperatura de salida y entrada del agua en el sistema de ACS, respectivamente.

Dentro del tanque no existe generación de energía, por lo tanto el término  $\dot{E}_g$  es igual a 0. Por otro lado, el flujo de energía que sale del tanque es el flujo de energía de uso más el flujo de energía por pérdidas por convección con el ambiente representadas por las ecuaciones (2.416), (2.417) y (2.418) que se muestran a continuación.

$$\dot{E}_{out} = \dot{E}_{uso} + \dot{E}_{perd} \quad (2.416)$$

$$\dot{E}_{uso} = \dot{m}_{fl,out} C_p (T_{fl,use} - T_{fl,red}) \quad (2.417)$$

$$\dot{E}_{perd} = U_{tanque} A_{tanque} (T_{fl,j} - T_a) \quad (2.418)$$

En donde  $\dot{E}_{uso}$  y  $\dot{E}_{perd}$  son los flujos de energía de uso y pérdidas respectivamente,  $\dot{m}_{fl,out}$  es el flujo másico de agua caliente que sale del tanque,  $T_{fl,use}$ ,  $T_{fl,red}$ ,  $T_{fl,j}$  son la temperatura del fluido de uso, de red y del nodo j en el tanque respectivamente, y  $T_a$  es la temperatura ambiente,  $U_{tanque}$  y  $A_{tanque}$  son el coeficiente global de pérdidas térmicas y el área total del tanque, respectivamente.

En este sentido, la energía almacenada dentro del tanque de acumulación de ACS se puede expresar como se muestra en la ecuación (2.419) a continuación.

$$\begin{aligned} \dot{E}_{alm} = \dot{m}_{fl,ACS} C_p (T_{fl,ACS,out} - T_{fl,ACS,in}) - \dot{m}_{fl,out} C_p (T_{fl,out} - T_{fl,red}) \\ - U_{tanque} A_{tanque} (T_{fl,j} - T_a) \end{aligned} \quad (2.419)$$

## Temperatura de los nodos en el tanque de acumulación de ACS

Se considera que la variación de temperatura dentro del tanque ocurre únicamente de forma vertical, de esta forma el tanque es dividido en 6 nodos verticales para simular el fenómeno de estratificación [33]. La temperatura del agua dentro del tanque de acumulación de ACS representada por la ecuación (2.420) y descrita en la documentación de TRNSYS [68], es utilizada para el presente caso de estudio.

$$\frac{dT_{tanque,j}}{dt} = \frac{Q_{in,tanque,j} - Q_{out,tanque,j}}{C_{tanque,j}} \quad (2.420)$$

En donde  $T_{tanque,j}$  es la temperatura del nodo j dentro del tanque,  $Q_{in,tanque,j}$  y  $Q_{out,tanque,j}$  son el calor que ingresa o sale del tanque en el nodo j, respectivamente, y  $C_{tanque,j}$  es la capacitancia térmica del tanque en el nodo j. Esta ecuación es resuelta de forma analítica reescribiendola de la forma que se muestra a continuación.

$$\frac{dT}{dt} = aT + b \quad (2.50)$$

En donde el término  $a$  es una constante y el término  $b$  puede ser una función del tiempo o variable dependiente o un valor promedio utilizada en cada paso de tiempo.

De acuerdo a la documentación de TRNSYS, este modelo del tanque de acumulación de ACS contempla algunos mecanismos de transferencia de calor como pérdidas térmicas hacia el ambiente a través de la parte superior, inferior y laterales del tanque, conducción entre nodos adyacentes del tanque, mezcla entre nodos para estabilidad térmica y debido al flujo a través del tanque y la entrada de calor auxiliar en el tanque.

El tanque cuenta con un aislamiento térmico para reducir las pérdidas térmicas y su coeficiente global de pérdidas es un parámetro proporcionado en el catálogo de cada fabricante del mercado disponible.

En el presente trabajo se considera que la temperatura final de uso del agua caliente sanitaria es de 45°C [61], [62], [69], tomando en cuenta una pérdida de 2-3 °C en las tuberías [57], [60]. Para asegurar esta temperatura, a la salida de cada sistema se coloca un sensor de temperatura y una válvula de control, la cual determina el porcentaje de agua caliente del tanque y fría de la red para alcanzar la temperatura final de uso.

Los parámetros generales de diseño del tanque de acumulación están descritos en la Tabla 2.7.

Tabla 2.7. Parámetros de diseño del tanque de acumulación para simulación.

<b>Parámetros del tanque de acumulación</b>		
Parámetro	Valor	Unidad
Volumen	0.200	m <sup>3</sup>
Altura	1.26	m
# de nodos	6	-
Coefficiente de pérdida de calor (parte superior, inferior y lateral)	1.12	$\frac{W}{m^2 \cdot K}$
Calor específico del agua	4.19	$\frac{kJ}{kg \cdot K}$
Densidad del fluido	997	$\frac{kg}{m^3}$

(Fuente: Propia)

## 2.7. Análisis económico de los sistemas de ACS propuestos

Partiendo del hecho de que el servicio que proveen todos los sistemas es un flujo de egresos continuos sin ningún flujo de ingreso de efectivo, para analizar y comparar económicamente a los cuatro sistemas de ACS de forma integral, se propone el análisis y comparación de los sistemas a través del costo total de la propiedad CTP en el periodo de estudio llevado a tiempo presente. El CTP es la suma de todos los costos directos e indirectos restado el valor de venta o rescate al final del periodo de estudio como se muestra a continuación.

$$CTP = \text{Costos directos} + \text{Costos indirectos} - \text{Valor de rescate} \quad (2.21)$$

Los costos directos implican los costos de adquisición de los sistemas e instalación de los mismo, mientras que los costos indirectos son aquellos costos de operación, mantenimiento y reemplazo en caso de ser necesario como se muestra a continuación.

$$CTP = [C. Adq + C. Inst] + [C. Op + C. Mant + C. Ree] - V. Rescate \quad (2.22)$$

De acuerdo a este indicador económico, el sistema con un menor costo total de propiedad en el periodo de estudio sería el sistema más rentable de todos.

Para llevar los flujos de egresos de operación, mantenimiento y reemplazo al tiempo presente, se usa valor actual (VA) o conocido como valor presente (VP), el cual trae todos los flujos de caja de cada año descontados a una tasa de interés o descuento de un proyecto en un tiempo de estudio determinado llamado presente como se representa en la ecuación (2.52).

$$VA = \sum_{t=0}^n \frac{FE_t}{(1+i)^t} \quad (2.52)$$

En donde  $t$  representa el periodo anual,  $n$  el número de años del análisis,  $FE_t$  el flujo neto de efectivo en el periodo anual  $t$ ,  $i$  es la tasa de interés o descuento, para el presente caso de estudio se utilizará la tasa pasiva del Banco Central del Ecuador [83].

Además, se considera que la inversión inicial se realiza al tiempo  $t = 0$ , en donde el flujo neto de efectivo es el costo de adquisición e instalación.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la presente sección se presentan los resultados obtenidos del diseño y simulación del análisis energético, exergético y económico de los cuatro sistemas de ACS propuestos anteriormente. Se establece como objetivo principal de los sistemas de ACS el cubrir la demanda diaria de ACS. Una vez realizadas las simulaciones en el software TRNSYS, se analiza el comportamiento de los 4 sistemas de ACS propuestos. Para este análisis, por el lado de los sistemas de calentamiento de paso (calefón eléctrico y calefón a gas), se toman en cuenta la temperatura del agua a la salida de estos sistemas, la cual es la temperatura de uso (45°C). Por otro lado, para los sistemas de acumulación (colector solar y bomba de calor), se toman en cuenta 2 de los 6 nodos en los que fue dividido el tanque de acumulación de agua caliente. Los nodos que fueron seleccionados a ser graficados se alinean al análisis del tanque de acumulación dividido en 2 partes; superior e inferior. De esta forma, el nodo superior (T\_nodo\_superior) representa la temperatura del agua que ocupa alrededor del 20% de la parte más alta del tanque. Por último, el nodo inferior (T\_nodo\_inferior) representa la temperatura del agua que ocupa alrededor del 20% de la parte más baja del tanque.

Con la finalidad de poder comparar el comportamiento de los sistemas durante el año de simulación, se presentan gráficas de operación diaria para sistemas cuyo comportamiento diario no varía significativamente de un día a otro, entre ellos el sistema de calefón de eléctrico, sistema de calefón a gas y el sistema de bomba de calor. En la misma línea de análisis de comportamiento y con la finalidad de que cada sistema opere en su escenario más favorable --menor consumo de energía representando un menor gasto de operación--, para el sistema de la bomba de calor se presenta el tiempo mínimo promedio necesario de funcionamiento continuo para cubrir la demanda de ACS diaria. A diferencia de los sistemas anteriores, para el sistema de colector solar se presentan dos gráficas de operación; en donde una de estas gráficas representa la semana más favorable en términos de menor consumo de energía por parte del sistema auxiliar (resistencia eléctrica), es decir la semana con mayor aprovechamiento del recurso solar y producción de energía térmica destinada al producto final (agua caliente sanitaria), y otra gráfica representando la semana menos favorable en términos de un mayor consumo de energía eléctrica por parte del sistema auxiliar, consecuencia de un bajo aprovechamiento del recurso solar o falta de este. Seguidamente, se analizan energéticamente los sistemas a través de sus consumos anuales de energía para proceder con el análisis exergético en el cual se muestra la exergía por año por cada sistema de ACS, la exergía que fue transferida al producto (agua caliente), la exergía destruida, y la eficiencia exergética de transformación de energía. Finalmente, se

continúa con el análisis económico; para el cual se calcula el CTP de cada uno de los sistemas propuestos utilizando su valor actual VA para sus flujos de egresos por operación y mantenimiento.

### 3.1. Análisis del comportamiento de los sistemas de ACS

La Figura 3.1 representa el perfil de consumo promedio diario del flujo de agua caliente sanitaria a lo largo del día para cada tipo de uso (aseo personal, ducha, lavado de platos etc.) de una familia de cuatro personas utilizado en la simulación de los sistemas de ACS propuestos.

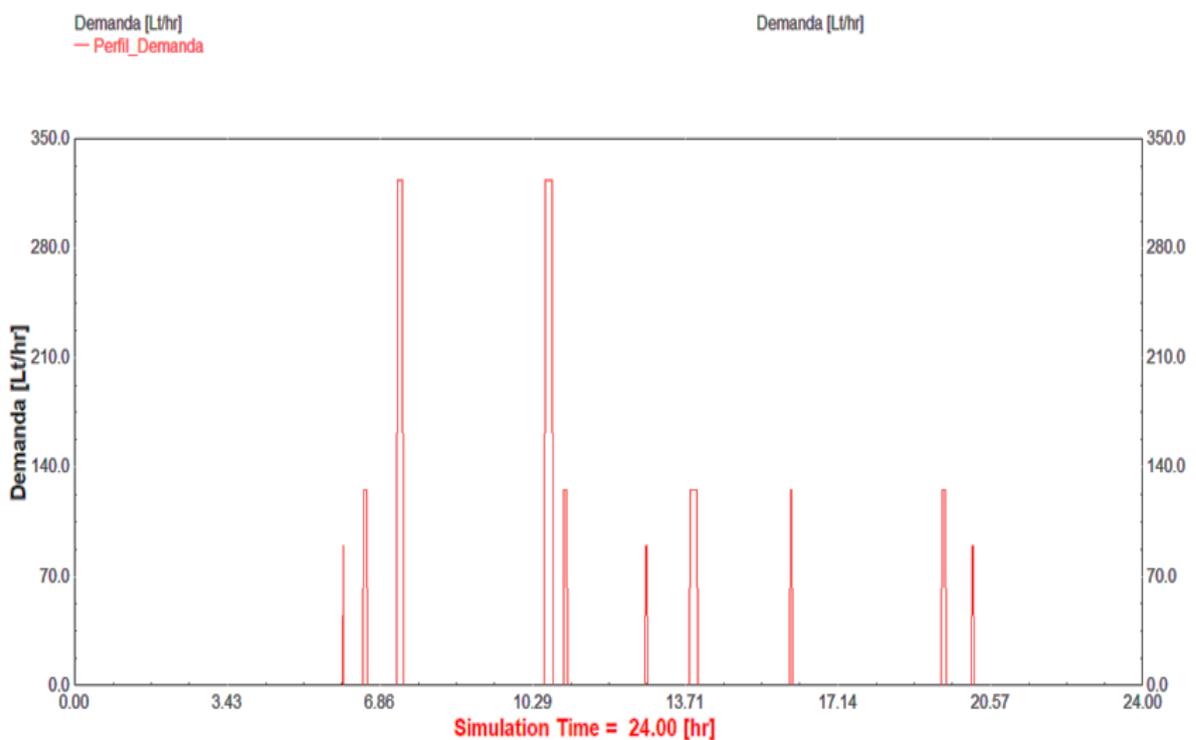


Figura 3.1. Perfil de demanda de ACS utilizado en la simulación de los sistemas propuestos. (Fuente: TRNSYS).

#### Sistema de calefón eléctrico

El horario de funcionamiento del sistema de calefón eléctrico se encuentra en función de la demanda de ACS diaria. El sistema cuenta con una potencia nominal de 13.5 kW y 90% de eficiencia. En la Figura 3.2 se observa que la menor potencia requerida es de alrededor de 4 kW para cubrir el flujo de 0.035 lt/s de agua caliente para el aseo personal (lavado de manos/cara o dientes). Por otro lado, la mayor potencia requerida es de alrededor de 13 kW para cubrir el flujo de 0.1 lt/s de agua caliente (45°C) para tomar un baño durante un día típico.

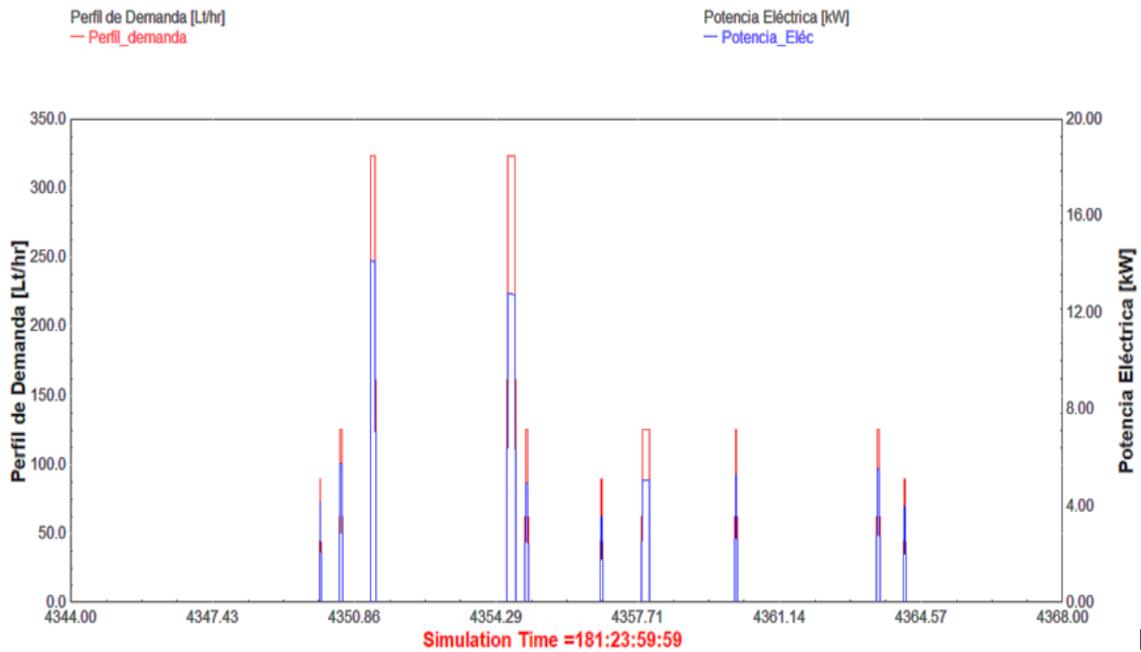


Figura 3.2. Potencia eléctrica y señal de control de funcionamiento del sistema de ACS – Calefón eléctrico – durante el día 181/365.  
(Fuente: TRNSYS)

En la Figura 3.3 la variable T\_outlet\_water muestra el perfil de temperatura de uso final en función de la demanda diaria de ACS a ser cubierta por el calefón eléctrico. La temperatura del agua de uso final saldrá siempre a 45°C cubriendo el 100% de la demanda de ACS diaria. Este perfil de temperatura es idéntico en todos los días del año con ligeras variaciones en la temperatura ambiente y temperatura del agua de red.

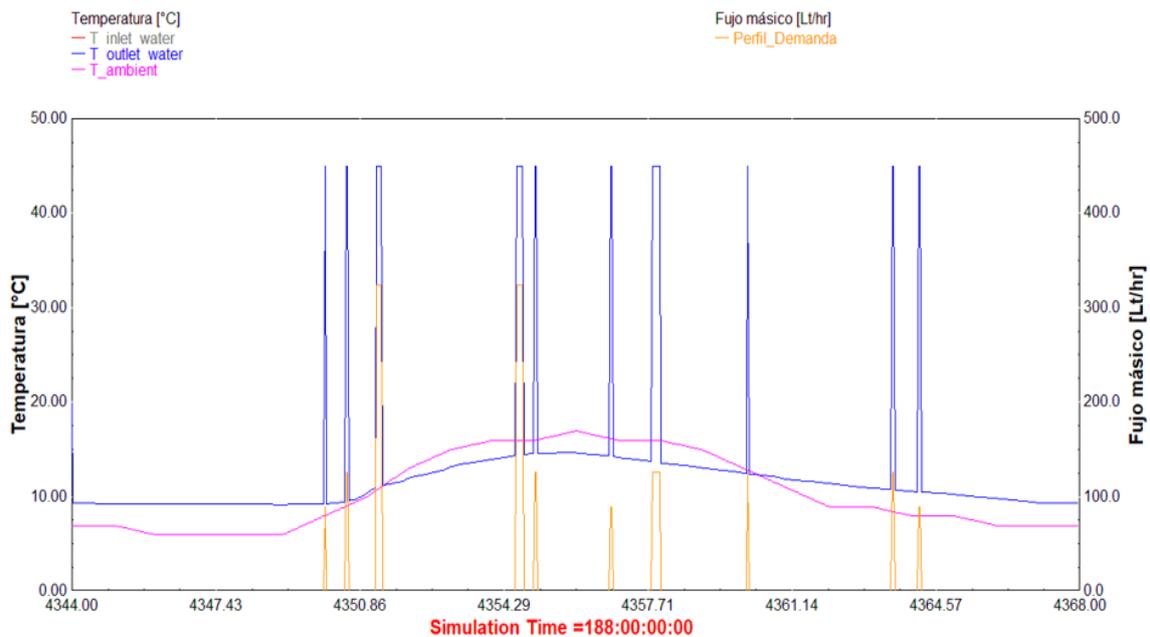


Figura 3.3. Perfil de temperaturas en el Tanque de acumulación de ACS – Calefón eléctrico, durante un día típico.  
(Fuente: TRNSYS)

## Sistema de calefón a gas

El horario de funcionamiento del sistema de calefón a gas se encuentra también en función de la demanda de ACS diaria. El sistema cuenta con una potencia nominal de 21 kW con una eficiencia 60%, en la Figura 3.4 se observa que la menor potencia requerida es de alrededor de 7 kW para cubrir el flujo de 0.035 lt/s de agua caliente para el aseo personal (lavado de manos/cara o dientes). Por otro lado, la mayor potencia requerida es de alrededor de 21 kW para cubrir el flujo de 0.1 lt/s de agua caliente para tomar un baño durante un día típico.

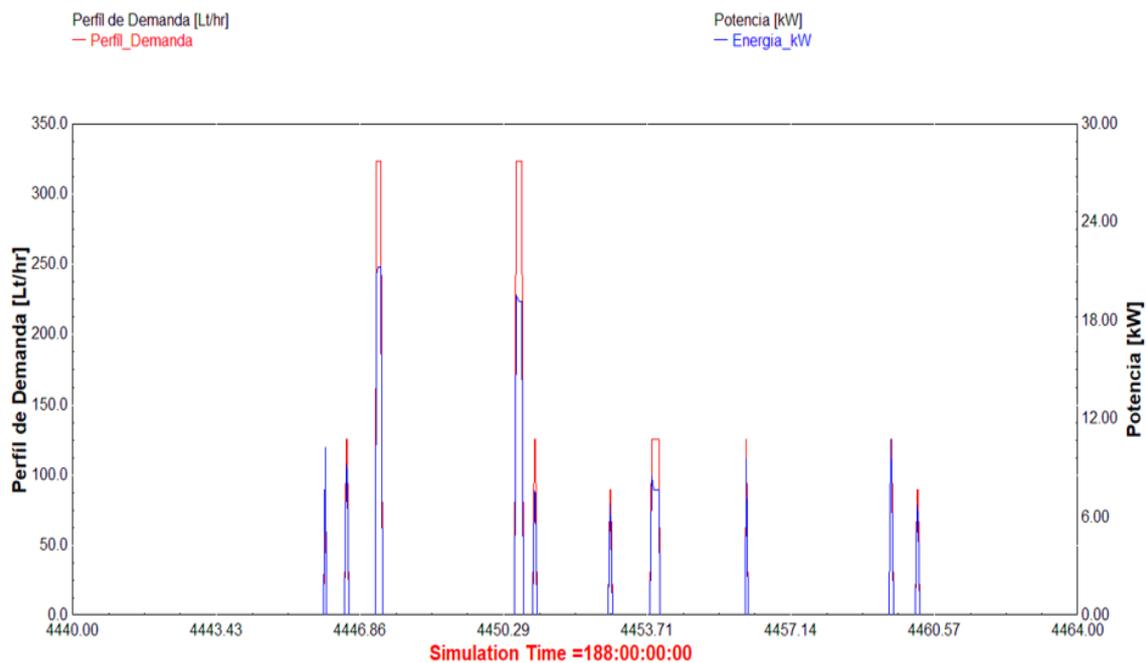


Figura 3.4. Potencia y señal de control de funcionamiento del sistema de ACS – Calefón a gas – durante un día típico. (Fuente: TRNSYS)

En la Figura 3.5 la variable T\_outlet\_water muestra el perfil de temperatura de uso final en función de la demanda diaria de ACS a ser cubierta por el calefón a gas. La temperatura del agua de uso final saldrá siempre a 45°C cubriendo el 100% de la demanda de ACS diaria. Este perfil de temperatura es idéntico en todos los días del año con ligeras variaciones en la temperatura ambiente y temperatura del agua de red.

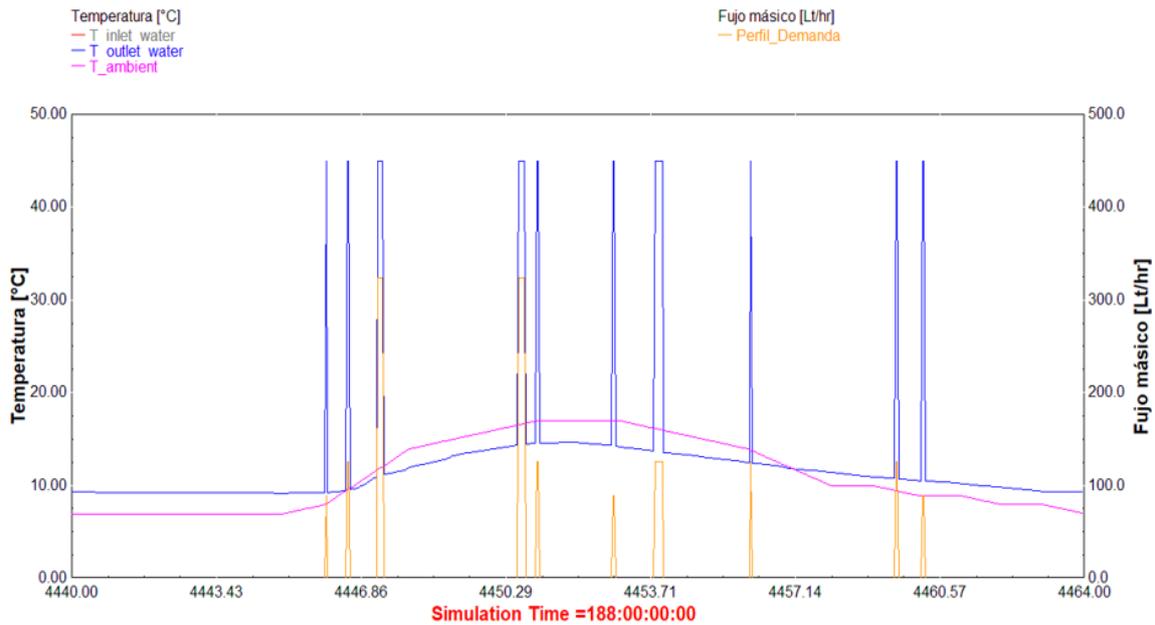


Figura 3.5. Perfil de temperaturas en el Tanque de acumulación de ACS – Calefón a gas.  
(Fuente: TRNSYS)

### Sistema de bomba de calor

El horario de funcionamiento del sistema de la bomba de calor es de 11:30 a 12:30 a.m., el sistema se mantiene en funcionamiento continuo cada día alrededor de 44 minutos en promedio con una potencia de consumo promedio de 2.15 kW. En la Figura 3.6 se muestra la potencia consumida por la bomba de calor y la señal de control diaria para el funcionamiento del sistema durante un día típico.

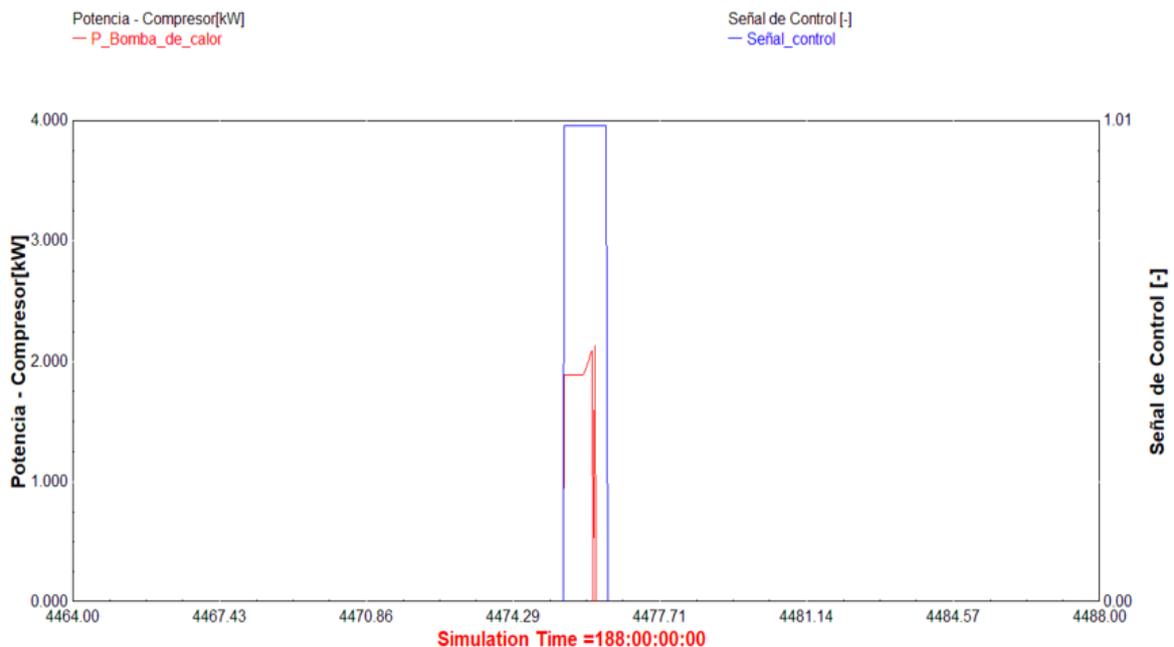


Figura 3.6. Potencia consumida por la bomba de calor y señal de control de funcionamiento del sistema de ACS – Bomba de calor – día típico.  
(Fuente: TRNSYS).

En la Figura 3.7 en el eje izquierdo se muestra el coeficiente de desempeño de la bomba durante su tiempo de funcionamiento continuo, mientras que en el eje derecho se muestra la variación de la temperatura ambiente. Esta es la temperatura a la cual se encuentra el aire que circula a través del evaporador de la bomba de calor intercambiando energía calórica del aire hacia el fluido refrigerante antes de entrar al compresor. Se observa que el horario de funcionamiento de la bomba de calor es el horario en el cual la temperatura ambiente es la más alta registrada con un valor promedio de 15°C. El COP máximo alcanzado en funcionamiento es de 3.8 durante los primeros 20 minutos, mientras que en los siguientes 24 minutos este va decreciendo hasta llegar a 3.2, obteniéndose un COP promedio de funcionamiento de 3.5.

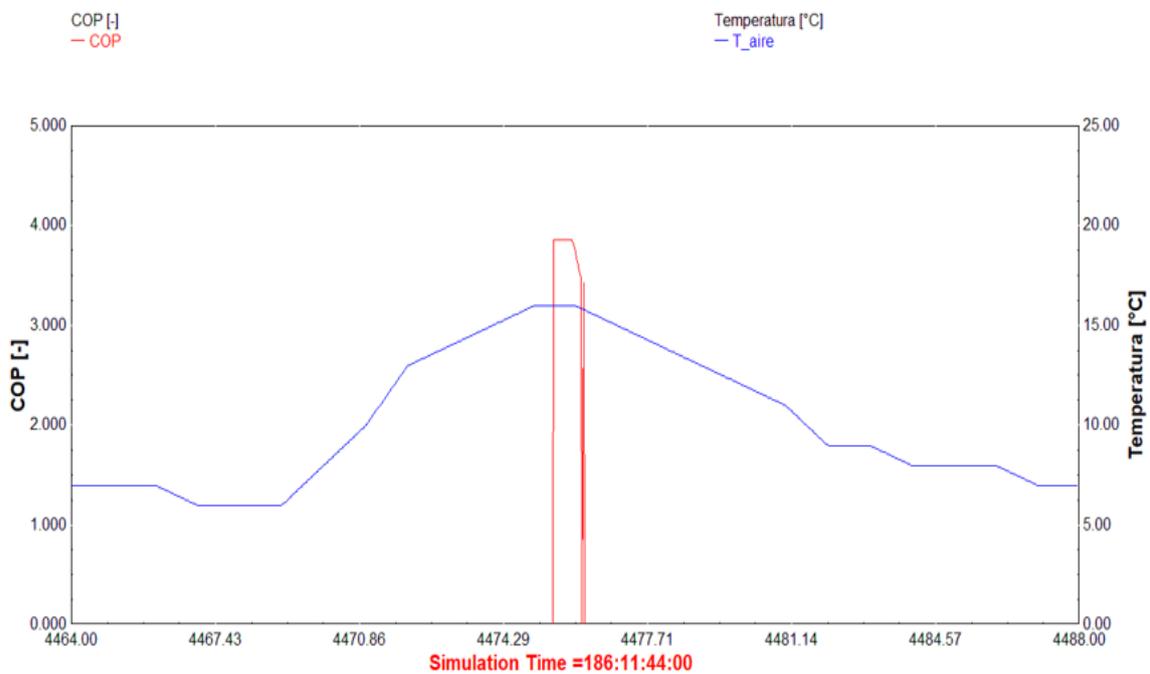


Figura 3.7. COP de la bomba de calor y temperatura del aire del sistema de ACS – Bomba de calor– día típico.  
(Fuente: TRNSYS)

En la Figura 3.8 se observa el perfil de temperaturas del tanque de acumulación asistido por bomba de calor en un día de operación típico, en este perfil se observa que; la temperatura de todos los nodos desciende uniformemente, de esta forma se puede observar claramente el fenómeno de estratificación de la temperatura del agua dentro del tanque, la temperatura máxima del agua del tercio superior dentro del tanque alcanza los 56°C y desciende a 51.5°C antes del primer uso de ACS del siguiente día, es decir 18 horas después del tiempo de funcionamiento de la bomba de calor, la temperatura de agua del tercio medio dentro del tanque de acumulación alcanza los 53°C en promedio y desciende a 45°C en promedio durante 18 horas después del tiempo de funcionamiento de la bomba de calor, mientras que la temperatura mínima

del tercio inferior del tanque desciende de 31.5°C a 23°C en promedio durante estas 18 horas posteriores al funcionamiento de la bomba de calor, adicionalmente la temperatura del nodo inferior desciende hasta alrededor de los 15°C justo antes de que la bomba de calor se encuentre nuevamente en funcionamiento. En esta gráfica de operación de un día típico del sistema de ACS asistido por bomba de calor y tanque de acumulación se observa que el 85% del agua caliente contenida dentro del tanque de acumulación cubre el 100% de la demanda de ACS requerida a 45°C diariamente. Mientras que el 15% de agua caliente contenida dentro del tanque quedaría para el uso de un evento no considerado dentro del perfil diario, como un baño extra etc.

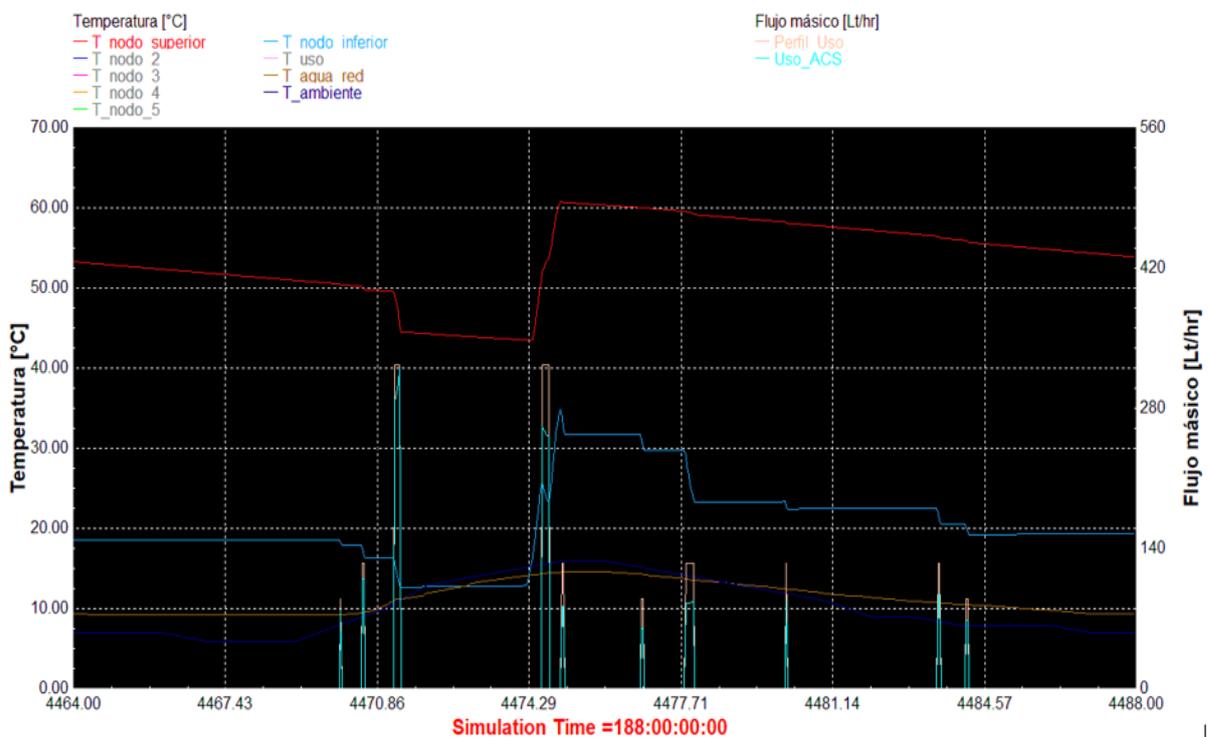


Figura 3.8. Perfil de temperaturas en el Tanque de acumulación de ACS – Bomba de calor– día típico.  
(Fuente: TRNSYS)

## Sistema de colector solar

El horario de funcionamiento del sistema de colector solar en la ciudad de Quito es de 6:15 am a 6:15 pm, el sistema se mantiene en funcionamiento continuo siempre y cuando la temperatura de salida del agua a la salida del colector sea al menos 10°C mayor a la temperatura del nodo inferior hasta que; el nodo superior alcance los 90°C o la diferencia de temperatura entre la salida del colector y el nodo inferior sea menor a 2°C. Debido a la presión máxima del sistema completo es de 6 bar, a esta presión el punto de ebullición del agua es de alrededor de 150 °C. En caso de que el recurso solar no sea suficiente,

como en algunas semanas poco favorables durante el año, se activa el sistema auxiliar (resistencia eléctrica) con una potencia nominal de 3 kW. La potencia útil promedio del colector, en un día de funcionamiento de 12 horas, es de 0.47 kW y una energía diaria útil promedio de 5.68 kWh o 20460 kJ. En la Figura 3.9 se muestra el perfil de temperaturas del tanque de acumulación asistido por el sistema de colector solar con resistencia eléctrica como sistema auxiliar durante una de las semanas menos favorables con menor recurso solar y mayor participación del sistema auxiliar eléctrico.

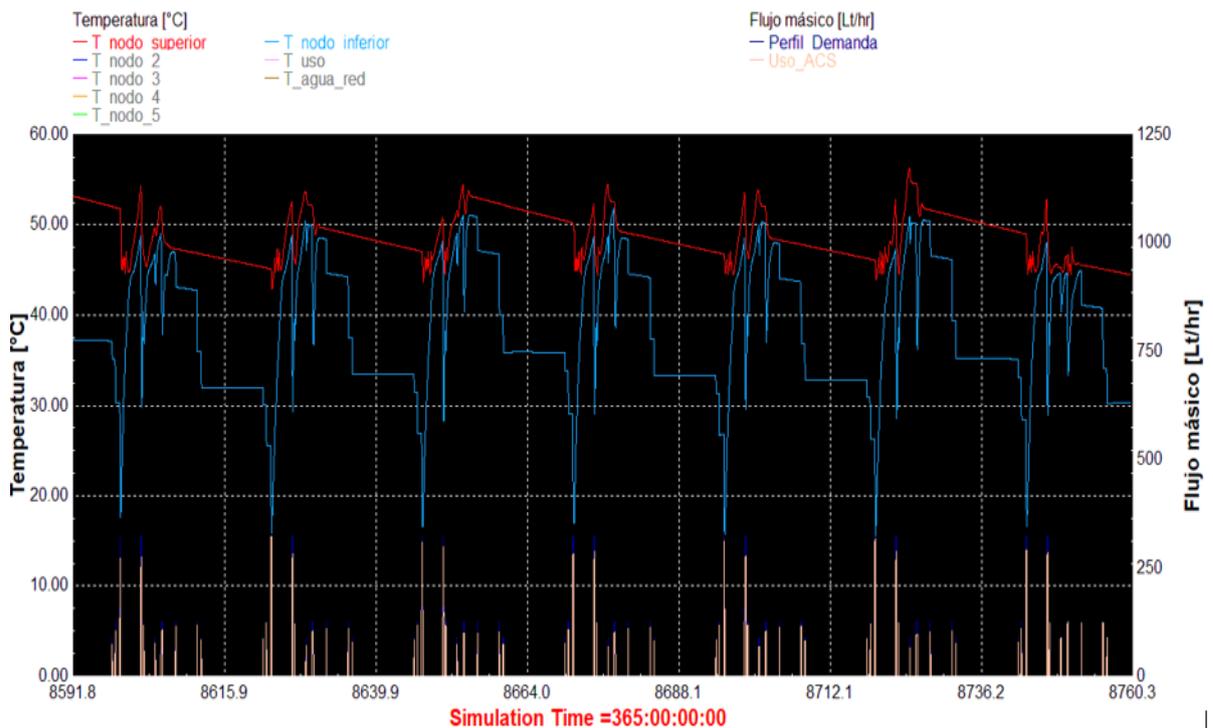


Figura 3.9. Perfil de temperaturas en el Tanque de acumulación de ACS – Colector solar – semana poco favorable.  
(Fuente: TRNSYS)

En esta semana menos favorable cuando el sistema está en funcionamiento el nodo superior se encuentra alrededor de los 47°C en promedio, y la temperatura del agua en el tercio inferior del tanque alcanza los 42°C en promedio cuando el sistema se encuentra en funcionamiento, y desciende a los 18°C después de haber pasado el último uso de ACS. Cuando el sistema solar empieza su periodo de recepción y acumulación de energía. Esto se debe a que, pese al bajo recurso solar disponible, cuando el sistema se encuentra en funcionamiento, éste transfiere la energía térmica almacenada hacia el flujo de agua que atraviesa el colector el cual proviene del nodo inferior hasta que la diferencia entre la temperatura de salida del colector es menor a 2°C en comparación a la temperatura del agua del nodo inferior del tanque, y cuando el sistema ya no se encuentra en funcionamiento, la demanda de ACS y el reemplazo de agua de red

reducen rápidamente la temperatura del agua contenida en este tercio inferior del tanque. Adicionalmente, en la misma Figura 3.9 se observa del perfil de demanda, que el agua caliente sanitaria proveniente del tanque de acumulación asistido por colector solar cubre en general el 92% de la demanda de ACS requerida. La potencia útil del colector solar (color rojo), del sistema auxiliar (color azul) y la irradiación solar sobre el colector (color lila) se muestran en la Figura 3.10, en esta se observa que; en esta semana menos favorable, el sistema auxiliar se activó todos los días mayormente antes de que el recurso solar esté disponible, también se observa la variabilidad del poco recurso solar disponible (irradiación) que incide sobre el colector por metro cuadrado y cuanta potencia útil produce el colector.

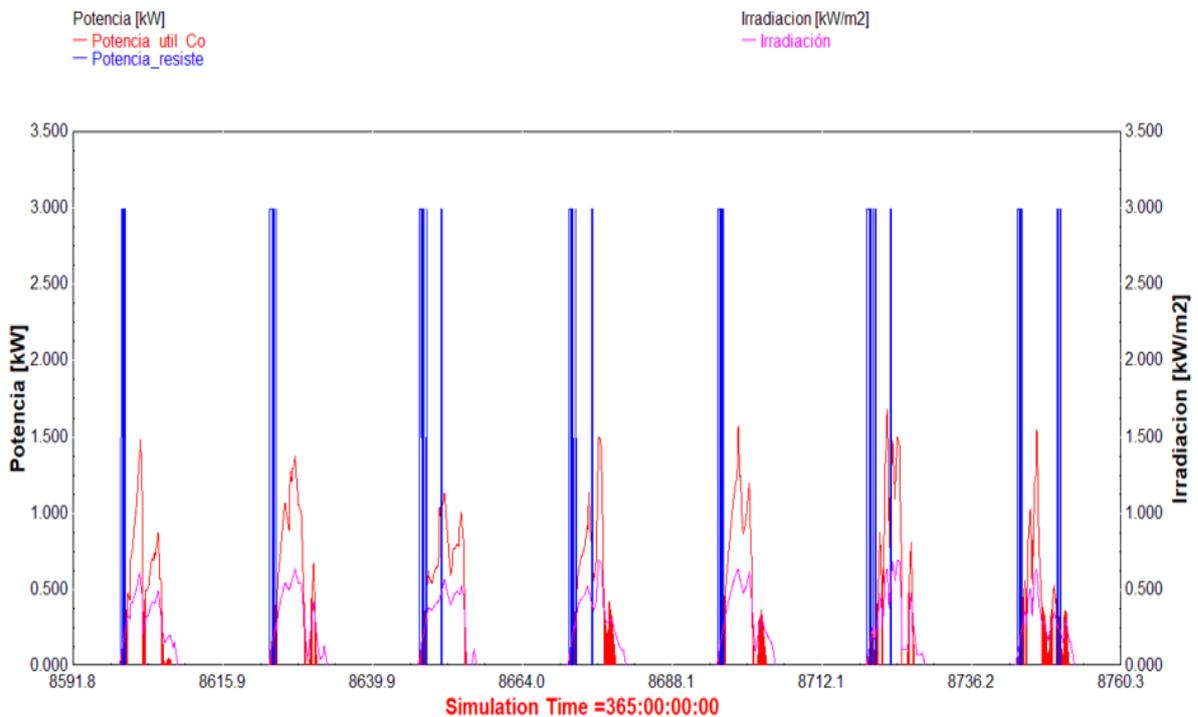


Figura 3.10. Potencia útil del colector, potencia eléctrica del sistema auxiliar (resistencia eléctrica) e irradiación total sobre la superficie del colector solar, semana no favorable. (Fuente: TRNSYS).

Por otro lado, en la Figura 3.11 se muestra el perfil de temperaturas del tanque de acumulación asistido por el sistema de colector solar con resistencia eléctrica como sistema auxiliar durante una de las semanas más favorables con recurso solar mayor y estable en comparación a la semana menos favorable. En esta semana más favorable el nodo superior se encuentra sobre los 85°C en promedio durante los 4 primeros días y a 75°C durante el resto de los días la mayor parte del tiempo, en general, la temperatura promedio del agua de los dos tercios superiores dentro del tanque está alrededor de los 70°C, la temperatura del tercio más bajo de agua dentro del tanque

está alrededor de los 60°C la mayor parte del tiempo con picos mínimos de temperatura de 38°C durante la noche. Además, en la misma Figura se observa que el 52.1% de agua caliente sanitaria contenida dentro del tanque de acumulación cubre toda la demanda de agua caliente a 45°C requeridos.

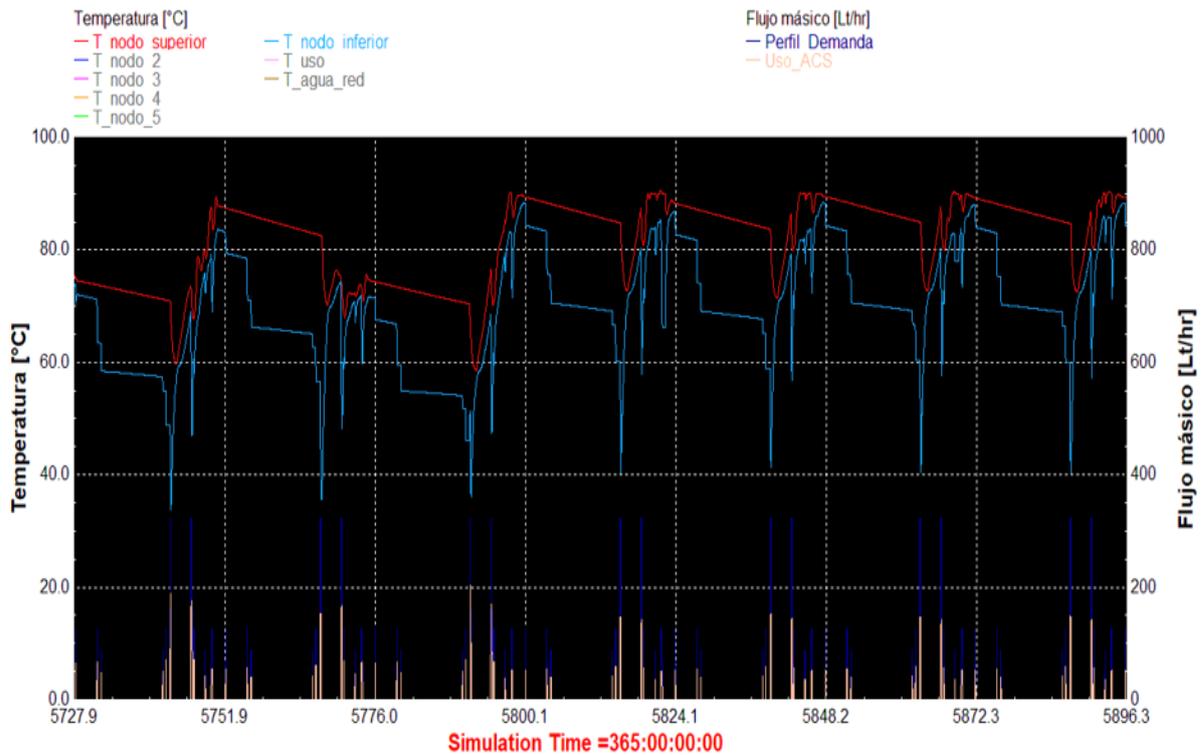


Figura 3.11. Perfil de temperaturas en el Tanque de acumulación de ACS – Colector solar – semana favorable.  
(Fuente: TRNSYS)

En la Figura 3.12 se observa que; en esta semana más favorable, el sistema auxiliar no se activó durante toda la semana, es decir; el recurso solar disponible (irradiación) que incide sobre el colector por metro cuadrado es mayor y más estable en comparación al recurso solar disponible en la semana menos favorable, y que la potencia útil producida por el colector es mayor en relación a la potencia útil producida en la semana menos favorable.

Dentro del año de simulación del sistema de colector solar, se encontró que; 20 semanas o 5 meses no continuos, el sistema auxiliar de respaldo se activó al menos 5 días por semana, 28 semanas o 7 meses el sistema auxiliar de respaldo se activó 3 días a la semana o menos, y 16 de estas 28 semanas no continuas, el sistema auxiliar no se activó ni un solo día, llegando casi a 2 meses continuos de no ser activado el sistema auxiliar de respaldo para cubrir la demanda de agua caliente sanitaria.

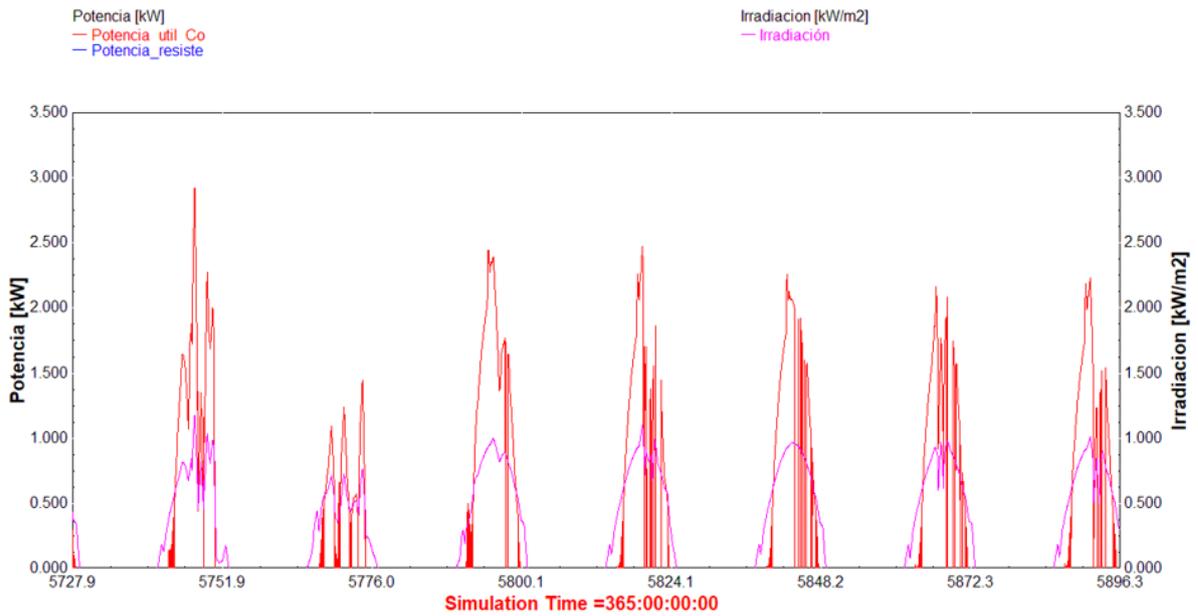


Figura 3.12. Potencia útil del colector, potencia eléctrica del sistema auxiliar (resistencia eléctrica) e irradiación total sobre la superficie del colector solar, semana favorable. (Fuente: TRNSYS)

### 3.2. Análisis comparativo energético de los sistemas ACS

Una vez realizados los diseños y simulación de los modelos y análisis de comportamiento de cada uno de los sistemas de ACS propuestos, desde el aspecto energético en la Figura 3.13 se observa el siguiente consumo energético en kWh por parte de cada uno de los sistemas para poder cubrir la demanda de agua caliente sanitaria de forma anual.

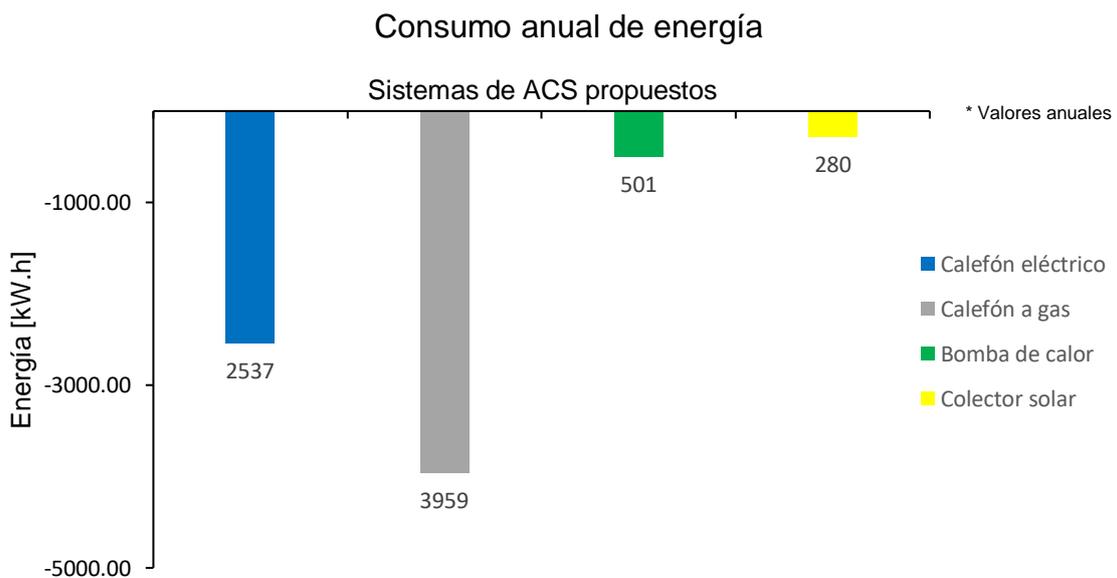


Figura 3.13. Consumo de energía anual de los sistemas de ACS propuestos. (Fuente: Propia)

Tomando como caso base el consumo de energía del sistema de calefón eléctrico, el cual resulta ser de 2537 kWh por año, los resultados de consumo de energía anuales muestran que el sistema de calefón a gas es el sistema de ACS que más consumo anual de energía tiene con un valor de 3959 kWh, es decir, 1.56 veces el consumo anual de energía del calefón eléctrico, en términos de operación, para cubrir esta demanda de energía, el sistema de calefón a gas necesita alrededor de 20 tanques de GLP de 15 kg por año aproximadamente. Por otro lado, tanto los sistemas de bomba de calor y colector solar son los sistemas de ACS presentaron el menor consumo de energía por año. La bomba de calor presenta un consumo 468 kWh de energía eléctrica por año, es decir el 18.4% del consumo de energía eléctrica por parte del calefón eléctrico. El sistema de colector solar presenta el menor consumo de energía eléctrica por parte de su sistema auxiliar con un total de 223 kWh por año, es decir el 8.8% del consumo de energía eléctrica por parte del calefón eléctrico. Adicionalmente, por el lado del colector solar, se encontró que con los 4 metros cuadrados de área de los captadores solares, la energía total incidente sobre estos es de 21.71 GJ, la energía útil transferida al agua es de 7.47 GJ, la energía consumida por parte del sistema auxiliar de respaldo fue de 0.8 GJ, y mientras que la energía anual proveniente de la demanda de ACS es de 7.25 GJ, el factor solar por año llegó a ser del 87%, es decir, el sistema de colector solar cubrió el 87% de la demanda de energía para acondicionar el agua final de uso.

### **3.3. Análisis comparativo exergético de los sistemas ACS**

Los resultados respecto a la exergía de las fuentes de energía de cada sistema de ACS se presentan en la Figura 3.14. Estos resultados muestran la cantidad de energía consumida por parte de la fuente de energía de cada sistema de ACS en giga Joules. La exergía de cada fuente de energía de los sistemas de ACS propuestos muestra que tanto la cantidad de exergía de la fuente de energía del calefón eléctrico y la cantidad de exergía de la fuente de energía de la bomba de calor son exactamente los mismos, ya que la fuente de energía de estos sistemas es energía eléctrica y ésta presenta un factor de calidad de 1, es decir que la exergía contenida en la energía eléctrica como fuente es el 100% de la cantidad de energía eléctrica.

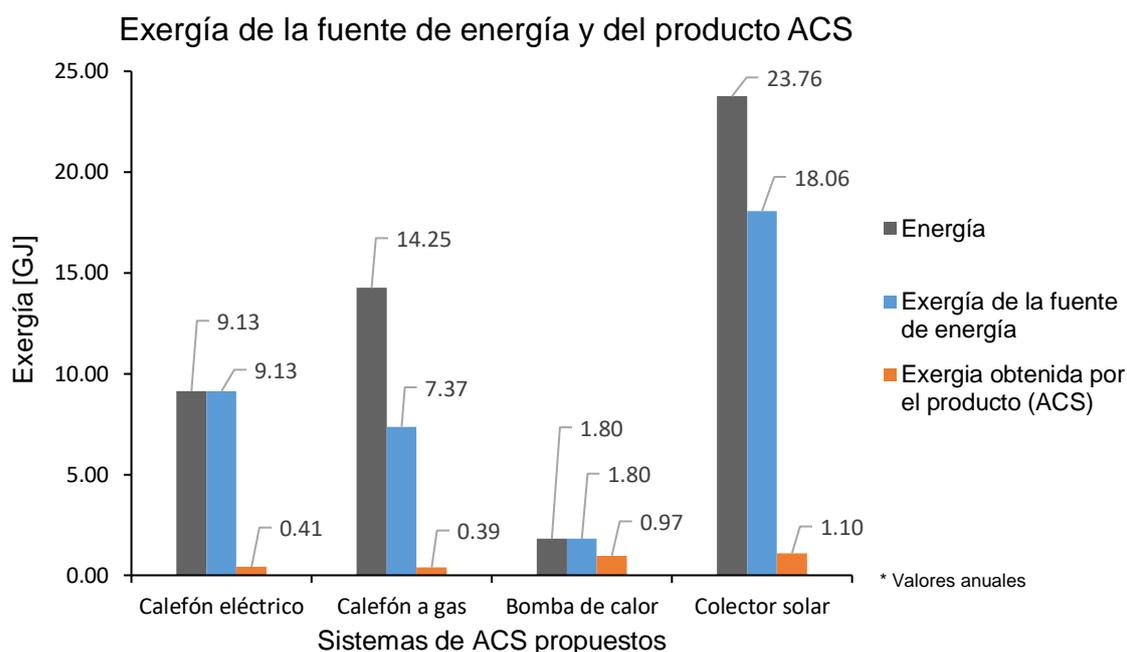


Figura 3.14. Exergía de cada fuente de energía y del producto de los sistemas de ACS propuestos.  
(Fuente: Propia)

Por otro lado, la exergía de la fuente de energía del calefón a gas es de alrededor del 52% de su contenido de energía, mientras que la exergía de la fuente del colector solar es de alrededor del 73.42% de la cantidad de energía útil captada. Como se observa en la Figura 3.14, La cantidad de exergía de cada fuente de energía obtenida por el producto (ACS) en cada sistema es sustancialmente menor a la cantidad de exergía de la fuente. Con respecto a la exergía del producto (ACS) obtenida de la fuente de energía de cada sistema, los resultados muestran que tanto para ambos sistemas de calefón, eléctrico y a gas, el producto adquiere 0.41 y 0.39 GJ, respectivamente, es decir que esta es la cantidad del total del contenido energético obtenido por el ACS que tiene el potencial de producir un cambio o trabajo si fuese implementado en otro proceso. Por el lado de los sistemas de ACS con fuentes de energía renovable, en el sistema de ACS asistido por la bomba de calor, la exergía adquirida por el producto (ACS) es de 0.92 GJ, 2.3 veces la exergía ganada por el producto en los sistemas de calefón eléctrico y a gas. Esto se debe en parte a la diferencia de temperatura del agua a la salida de la bomba de calor y de los sistemas de calefón eléctrico y a gas, pues la temperatura del agua a la salida de la bomba de calor esta alrededor de los 60°C. Finalmente, en el sistema de colector solar, la exergía adquirida por el agua es de 1 GJ, siendo 2.5 veces más exergía adquirida por el producto en comparación a ambos calefones, y ligeramente mayor en comparación al sistema de bomba de calor. La principal razón de esta diferencia en la cantidad de exergía es la diferencia de temperatura del agua a la salida

del colector solar en comparación a los demás sistemas llegando esta diferencia a ser de un máximo de 45°C.

En la Figura 3.15 se muestra la cantidad potencial de la energía (exergía) destruida o degradada en el proceso de calentamiento de agua para cada sistema propuesto.

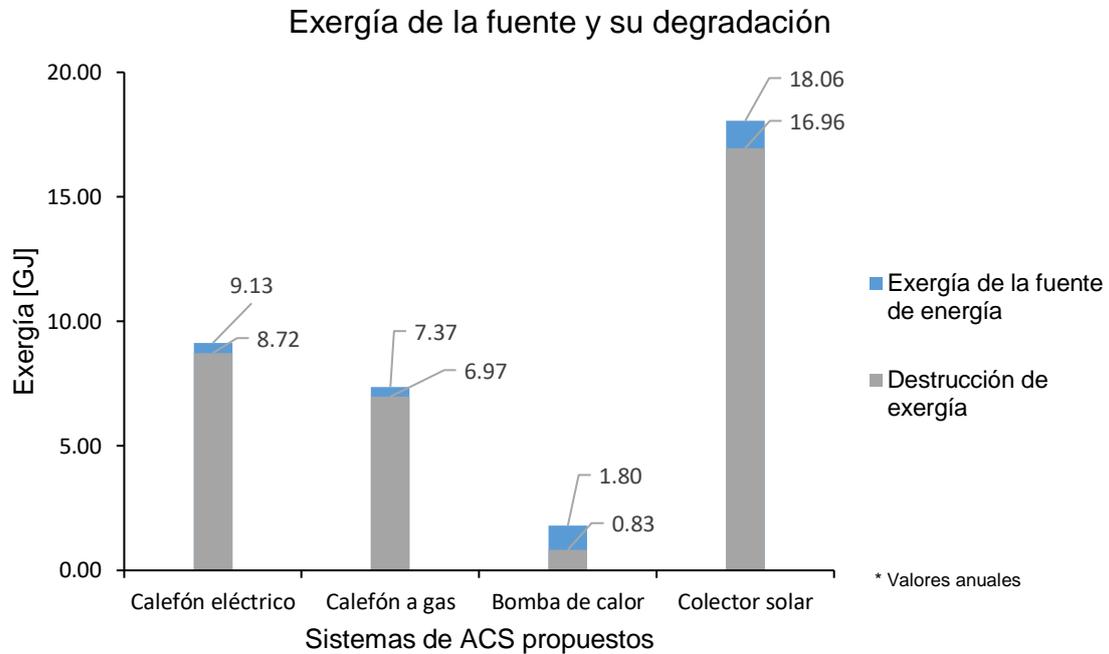


Figura 3.15. Exergía destruida en cada uno de los sistemas de ACS propuestos. (Fuente: Propia)

En la figura anterior se puede observar que en todos los sistemas destinados al calentamiento de agua existe una gran destrucción del potencial de cada fuente de energía, llegando en algunas sistemas a ser del 95% de destrucción o degradación del potencial de sus fuentes energéticas. Por el lado del calefón eléctrico, la fuente de energía de este sistema proporciona un contenido exergético de 9.13 GJ por año, de los cuales 8.72 GJ, es decir el 95.5%, son destruidos o degradados por año. Por el lado del calefón a gas, la fuente de energía de este sistema (GLP) proporciona un contenido exergético de 7.37 GJ por año, de los cuales 6.97 GJ, es decir el 94.6%, son destruidos o degradados por año. Por el lado de los sistemas con uso de fuentes de energía renovable, la fuente del sistema de bomba de calor proporciona un contenido exergético de 1.8 GJ anuales, de los cuales 0.83 GJ, es decir el 46.1%, son destruidos o degradados anualmente, y la fuente del sistema solar proporciona un contenido exergético de 15.94 GJ de forma anual, de los cuales 14.94 GJ, es decir el 93.73%, son destruidos o degradados cada año.

En la Figura 3.16 se observa las eficiencias exergéticas de transformación energética para cada uno de los sistemas propuestos.

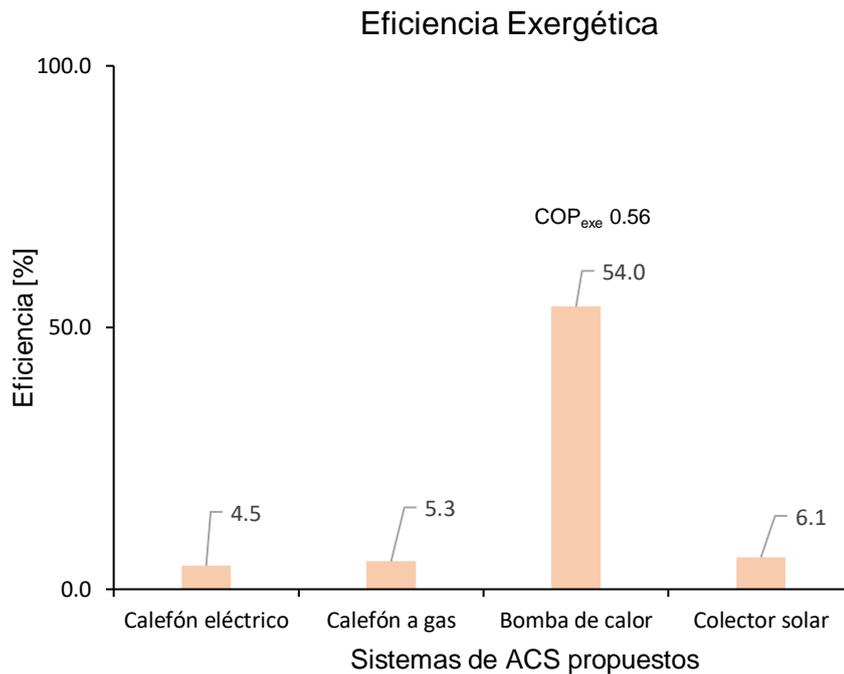


Figura 3.16. Eficiencia exergética de transformación de los sistemas de ACS propuestos.  
(Fuente: Propia)

Como se muestra en la figura anterior, por el lado de los sistemas de uso de energías de fuentes renovables, el sistema de ACS asistido por bomba de calor es el que presenta la mayor eficiencia exergética de transformación de todos los sistemas propuestos siendo esta del 54% con un COP exergético de 0.56. Es decir que, por cada unidad exergética contenida en su producción energética, 0.56 unidades exergéticas son transferidas al producto final (ACS). Por el lado del colector solar, la eficiencia exergética del uso del recurso solar como fuente de energía es del 6.27%, ligeramente mayor a las eficiencias exergéticas obtenidas por parte del calefón a gas y eléctrico que son de 5.3 y 4.5%, respectivamente.

### 3.4. Análisis comparativo económico de los sistemas ACS

Aparte del análisis energético y exergético realizados anteriormente, se incluye el análisis económico de los sistemas propuestos a modo de complementar integralmente este estudio. En la tabla 3.1 se muestran los detalles de los costos de adquisición, instalación, operación, mantenimiento y valor de rescate de los sistemas a ser comparados; calefón eléctrico, calefón a gas, bomba de calor y colector solar, tomando en cuenta el costo de la electricidad en Quito para el pliego tarifario en un rango de consumo promedio de 351-500 kWh/mes, el cual es de \$ 0.105/kWh para los sistemas de calefón eléctrico, bomba de calor (compresor y ventilador) y el sistema auxiliar de respaldo del sistema de colector solar. Por otro lado, para el costo de la fuente de

energía del calefón a gas, se toma en cuenta el costo promedio del cilindro de GLP de 15 kg con subsidio el cual es de \$ 3.50/cilindro, con un contenido energético promedio de 48 MJ/kg. En adición, ningún sistema será reemplazado durante el periodo de estudio.

Tabla 3.1. Detalles de costos de adquisición, operación y mantenimiento del calefón eléctrico, calefón a gas, bomba de calor y colector solar.

Concepto	Sistemas de Agua Caliente Sanitaria			
	Calefón eléctrico	Calefón a gas	Bomba de Calor	Colector Solar
	Valor			
Costo tanque de almacenamiento [\$]	\$0	\$0	\$300	\$300
Costo del sistema con instalación [\$]	\$550	\$450	\$2,200	\$2,250
Costo de mantenimiento [\$]	\$100	\$100	\$250	\$250
Tiempo de mantenimiento [años]	5	5	5	5
Consumo de energía anual [kWh]	2537	3960	501	281
Costo de la energía anual [\$]	\$267	\$70 (20 un.)	\$53	\$30
Valor de rescate a 10 años	\$0	\$0	\$1250	\$1250

(Fuente: Propia) \*Los costos de los equipos estan basado en la ofertas de mercado ecuatoriano.

Con estos datos de costos y subsidios, se plantea dos casos de estudio, en los cuales únicamente el costo de operación (costo de energía) varía, manteniéndose el tiempo de mantenimiento, el consumo anual de energía y los costos de adquisición, instalación, mantenimiento y valor de rescate al final del periodo de estudio.

### Caso de Estudio 1

En este primer caso de estudio, se propone mantener el subsidio al GLP en el periodo de estudio de 10 años en Quito, Ecuador. En La Figura 3.17 se muestran los costos totales de propiedad de los cuatro sistemas propuestos estudiados a 10 años en el escenario de mantener el subsidio al GLP.

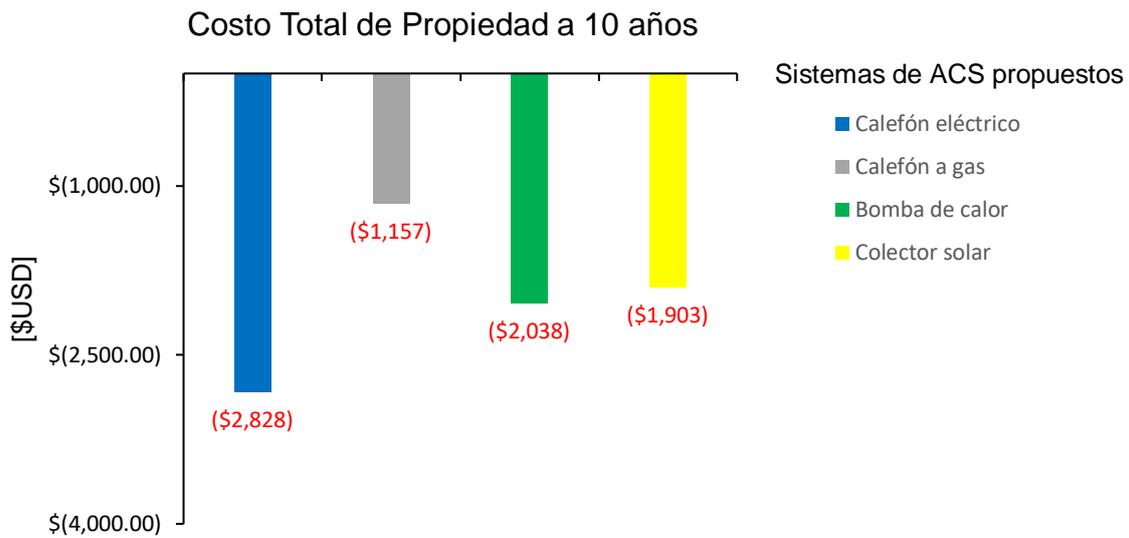


Figura 3.17. CTP para cada uno de los sistemas de ACS propuestos, Caso de Estudio 1. (Fuente: Propia)

Como se observa en la Figura 3.17, el costo total de propiedad más alto en 10 años de estudio es el del calefón eléctrico con \$2828, mientras que el costo total de propiedad del calefón a gas con subsidio es el más bajo de los 4 sistemas propuestos con \$1157. Por otro lado, la diferencia entre el costo total de propiedad entre el sistema de bomba de calor con el sistema de colector solar es menor a \$140. En la tabla 3.2 se detallan los costos de operación anual, y de operación y mantenimiento a 10 años de estudio y finalmente el costo total de propiedad de cada uno de los sistemas propuestos en este caso de estudio.

Tabla 3.2. Costos de operación del calefón eléctrico, calefón a gas, bomba de calor y colector solar, caso de estudio 1.

Concepto	Sistemas de Agua Caliente Sanitaria			
	Calefón eléctrico	Calefón a gas	Bomba de Calor	Colector Solar
	Valor			
Costo de la energía anual [USD]	\$267	\$70	\$53	\$30
Costo de operación y mantenimiento (10 años – tiempo presente) [USD]	\$2,278	\$707	\$788	\$603
Costo Total de Propiedad a 10 años [USD]	\$2,828	\$1,157	\$2,038	\$1,903

(Fuente: Propia)

Como se observa en la tabla 3.2, el costo de operación y mantenimiento más bajo en 10 años de estudio llevado a tiempo presente es el del sistema de colector solar con \$603, y seguido a éste, se encuentran el costo del calefón a gas con subsidio y el de la bomba de calor. Por otro lado, el sistema de calefón eléctrico presenta el costo de operación y mantenimiento más alto con \$2,278.

## Caso de Estudio 2

En este segundo caso de estudio, se propone una reducción total e inmediata del subsidio al GLP. Esta reducción tomaría lugar en el año 0, o periodo de inversión, fijando el costo del cilindro de GLP de 15 kg en \$22.27, su valor real internacional sin subsidio. En este caso de estudio, de la tabla 3.1, el único valor que cambia es el costo anual del gas, el cual sería de \$ 446. En La Figura 3.18 se muestran los costos totales de propiedad de los cuatro sistemas propuestos estudiados a 10 años en el escenario de mantener el subsidio al GLP.

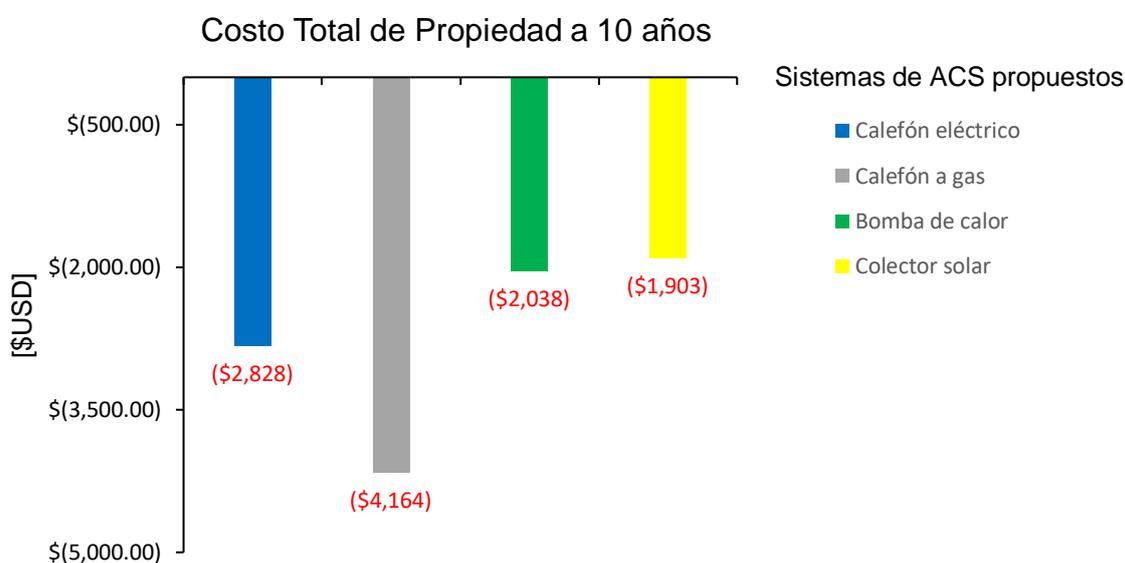


Figura 3.18. CTP para cada uno de los sistemas de ACS propuestos, Caso de Estudio 2.  
(Fuente: Propia)

Como se observa en la Figura 3.18, el costo total de propiedad más alto en 10 años de estudio es el del calefón a gas sin subsidio con \$4,164, mientras que el costo total de propiedad del sistema solar seguido por el de la bomba de calor presentan los costos más bajos de los 4 sistemas propuestos con \$1,903 y \$2,038, manteniendo una diferencia menor a \$140. En la tabla 3.3 se detallan los costos de operación anual, y de operación y mantenimiento a 10 años de estudio y finalmente el costo total de propiedad de cada uno de los sistemas propuestos en este caso de estudio.

Tabla 3.3. Costos de operación del calefón eléctrico, calefón a gas, bomba de calor y colector solar, caso de estudio 2.

Concepto	Sistemas de Agua Caliente Sanitaria			
	Calefón eléctrico	Calefón a gas	Bomba de Calor	Colector Solar
	Valor			
Costo de la energía anual [\$]	\$267	\$446	\$53	\$30
Costo de operación y mantenimiento (10 años – tiempo presente) [\$]	\$2,278	\$3,715	\$788	\$603
Costo Total de Propiedad a 10 años [\$]	\$2,828	\$4,164	\$2,038	\$1,903

(Fuente: Propia)

Como se observa en la tabla 3.3, el costo de operación y mantenimiento más bajo en 10 años de estudio llevado a tiempo presente sigue siendo el del sistema de colector solar con \$603, y seguido a éste, se encuentran el costo de la bomba de calor. Por otro lado, el sistema de calefón a gas sin subsidio presenta el costo de operación y mantenimiento más alto con \$4,164.

Como se observa, los casos planteados de estudio son casos extremos. El primero con un alto subsidio al gas, y el otro sin subsidio alguno. Con la finalidad de encontrar cual sería el valor del subsidio al gas que iguale al valor del costo total de propiedad del sistema de colector solar y bomba de calor, se presenta la tabla 3.4, en donde se usa un análisis paramétrico en donde el valor del cilindro de 15 kg de GLP es el parámetro por variar hasta alcanzar un costo total de propiedad similar a los sistemas de colector solar y bomba de calor sin sus beneficios y ventajas adicionales.

Tabla 3.4. Costo total de propiedad a 10 años del sistema de ACS de calefón a gas en función del costo del cilindro de 15 kg de GLP.

Costo del cilindro de 15 kg de GLP [\$]	Costo total de Propiedad a 10 años		
	Calefón a gas	Colector Solar	Bomba de calor
\$3.50	\$1,157	\$1,903	\$2,038
\$5.00	\$1,397	\$1,903	\$2,038
\$6.50	\$1,637	\$1,903	\$2,038
\$8.00	\$1,877	\$1,903	\$2,038
\$8.25	\$1,917	\$1,903	\$2,038
\$9.00	\$2,037	\$1,903	\$2,038

(Fuente: Propia)

Como se observa en la tabla 3.4, el costo total de propiedad del sistema de calefón a gas alcanza al costo total de propiedad del sistema de colector solar cuando el costo del cilindro de 15 kg de GLP es de alrededor de \$8.25/ cilindro, y alcanza al costo total de propiedad de la bomba de calor cuando el costo del cilindro de GLP es de alrededor de \$9/ cilindro en un tiempo de estudio de 10 años. En comparación al escenario actual del subsidio al GLP, cuando este se reduzca alrededor de \$5, el costo total de propiedad del sistema de ACS de calefón a gas será similar al costo total de propiedad del sistema de colector solar y bomba de calor, sin los beneficios y ventajas adicionales de estos. Este escenario de reducción parcial del subsidio al GLP puede ser paulatino o inmediato en el contexto del gasto anual por este subsidio al GLP que debe cubrir el Estado Ecuatoriano.

En ambos casos de estudio, el costo total de propiedad más alto lo presenta el sistema de calefón eléctrico, pues su costo de operación y mantenimiento en el periodo de 10 años llevado a tiempo presente es de \$2, 278. Por otro lado, el costo total de propiedad del calefón a gas está ligado en gran medida al nivel de subsidio aplicado al GLP, siendo este subsidio uno de los factores clave desde un punto de vista puramente económico. Por el lado del colector solar y la bomba de calor, sus valores de costo total de propiedad son similares, con una diferencia menor a \$140, presentando valores de costo de operación y mantenimiento constantes en ambos casos de estudio, siendo sus valores de adquisición e instalación los más altos en comparación con los otros sistemas y siendo así factores clave a la hora de inversión inicial.

Una vez realizada la simulación y comparaciones energética, exergética y económica de los cuatro sistemas de ACS propuestos, bajo las mismas condiciones ambientales y de demanda de ACS, se encontró que el calefón a gas es el sistema que presenta un mayor consumo de energía anual para poder cubrir la demanda de ACS, seguido por el calefón eléctrico, la bomba de calor y el colector solar. Desde un punto de vista de consumo de energía, el colector solar es el sistema que requiere de un menor consumo de energía anual de respaldo para cubrir la demanda anual de ACS.

Al revisar los sistemas desde el punto de vista exergético, se observa que a pesar de que el calefón eléctrico es altamente eficiente en la transformación de energía eléctrica en calor, este sistema, al ser utilizado para el calentamiento de agua, presentó la mayor tasa de destrucción de exergía en comparación con los demás sistemas; siendo esta tasa de alrededor del 95.5% de su potencial exergético destruido en este proceso. De

forma similar ocurre con el sistema de calefón a gas, cuya fuente de GLP presentó un alto contenido exergético; sin embargo, debido al tipo de uso final de energía, alrededor del 94.5% de su contenido exergético fue destruido durante la conversión de uso final de la energía, convirtiéndolo en el segundo sistema con la menor eficiencia exergética para calentamiento de agua sanitaria. En esta misma línea de alta destrucción de exergía se encuentra el colector solar, con una destrucción exergética del 93.9 % del contenido exergético en su producción útil de energía. Esto se debe en gran parte a los requerimientos de temperatura final máxima permitida a la salida del colector solar, ya que la aplicación de uso final de la energía se encuentra en el rango de baja temperatura. De esta forma, los escenarios de eficiencia exergética para los sistemas de colector solar, calefón a gas y calefón eléctrico, al ser considerados para la aplicación de calentamiento de agua sanitaria, son muy similares; presentando valores de eficiencia exergética bajos de 6.1%, 5.3% y 4.5%, respectivamente.

Por otro lado, el sistema de bomba de calor operado con energía eléctrica y fuente de aire presentó un COP promedio de 3.6, es decir que, por cada unidad de energía eléctrica consumida por el compresor y ventilador, se entregó al agua 3.6 unidades de energía térmica en promedio. Sin embargo, el COP exergético de la misma bomba de calor fue de apenas 0.56 en promedio. Es decir, que por cada unidad exergética contenida en esas 3.6 unidades de energía térmica producida, apenas 0.56 unidades exergéticas en promedio son transferidas al producto final (ACS). Estos valores fueron obtenidos con tiempos de operación promedio de 45 minutos por día durante el mediodía, momento en que la temperatura ambiente y del aire son generalmente las más altas registradas durante el día. Es así que, desde el punto de vista exergético, y considerando únicamente los valores de eficiencias exergéticas en relación con la aplicación de uso final de energía (agua caliente sanitaria), tanto con el colector solar como con ambos calefones: a gas y eléctrico, no serían las mejores opciones para esta aplicación de uso final de la energía. No obstante, y ampliando el punto de vista exergético en conjunto con el punto de vista del desarrollo sostenible y disponibilidad de recursos energéticos, de estos tres sistemas previamente mencionados, el sistema de colector solar sería una excelente opción para cubrir la aplicación de uso final de energía de calentamiento de agua, tomando como fundamento base que el recurso solar se encuentra presente, sea o no utilizado. De esta forma, a pesar de que de la eficiencia exergética del colector solar es baja, la fuente renovable de energía que utiliza se encuentra presente.

Desde un punto de vista económico, el calefón eléctrico es uno de los sistemas de ACS que presenta un costo de adquisición e instalación más bajo en comparación al resto de sistemas; sin embargo, presenta un costo total de propiedad mayor a todos los otros sistemas propuestos en los dos casos de estudio realizados. Por ende, este alto costo total de propiedad disminuye significativamente la posibilidad de que este sistema de ACS sea implementado. Otro de los sistemas con un costo de adquisición e instalación bajos es el calefón a gas. Este sistema presenta el menor costo total de propiedad únicamente en el caso de que el subsidio al GLP se mantenga indefinidamente. Sin embargo, tomando en cuenta la vida útil del calefón a gas y la posibilidad de reducción paulatina o inmediata del subsidio al GLP; este sistema es el menos conveniente, ya que al presentarse esta reducción en el subsidio sería necesario optar por cambiar de sistema de ACS, incrementando así el gasto total requerido para uso del servicio de ACS. Es así que, desde una perspectiva económica a largo plazo, tanto el sistema de calefón eléctrico como el sistema de calefón a gas no son opciones rentables para cubrir la necesidad de agua caliente sanitaria.

Por otro lado, las opciones económicamente más rentables a largo plazo, en base al costo total de propiedad, serían tanto la bomba de calor como el colector solar, ya que su costo de operación y mantenimiento están entre los más bajos y su tiempo de vida útil es mayor al de los otros sistemas analizados.

A través de este análisis comparativo energético, exergético y económico de los sistemas propuestos para el calentamiento de agua sanitaria, se observa la importancia de este análisis integral, no solo para escoger la opción económica y energéticamente más atractiva y viable, sino también exergéticamente más sostenible con el medio ambiente y la disponibilidad de recursos energéticos.

## 4. CONCLUSIONES

En este presente trabajo se realizó un análisis comparativo energético, exergético y económico de sistemas de calentamiento de agua sanitaria para cubrir la demanda de ACS para una vivienda unifamiliar en Quito. La simulación energética y parte del cálculo exergético se realizó en TRNSYS. De este análisis comparativo se puede concluir lo siguiente:

- La eficiencia exergética, mas no la eficiencia energética, es la que determina el uso eficiente de los recursos energéticos disponibles. Es a través del análisis exergético de cada alternativa que se evidencia el aprovechamiento o desperdicio del potencial exergético de cada tecnología con su uso final.
- La temperatura ambiente y la temperatura final del proceso influyen directamente sobre la eficiencia exergética en la transformación de un tipo de energía a otra de menor a mayor medida, respectivamente. Por tanto, otro beneficio del análisis exergético es alinear el uso final con las tecnologías disponibles dentro del marco de desarrollo sostenible y disponibilidad de recursos energéticos.
- Exergéticamente dentro de este análisis comparativo, la bomba de calor provee un mayor aprovechamiento del potencial exergético de sus fuentes de energía cuando el uso final de energía es destinado al calentamiento de agua sanitaria. A la par, el colector solar presenta el segundo mayor aprovechamiento del potencial exergético del recurso solar en comparación al calefón a gas y eléctrico cuando todos estos son empleados para el calentamiento de agua sanitaria.
- Económicamente dentro de este análisis comparativo, los sistemas de fuentes de energía renovable: bomba de calor y colector solar, son los más rentables a largo plazo para cubrir la demanda de servicio de agua caliente sanitaria para una vivienda de 4 personas en Quito, Ecuador.
- En base al costo total de propiedad y eficiencia exergética, principales indicadores de este análisis comparativo, los sistemas de ACS de colector solar y bomba de calor con fuente de aire son los sistemas más rentables económica y exergéticamente a largo plazo que están alineados dentro del marco de desarrollo sostenible y disponibilidad de recursos energéticos para el calentamiento de agua sanitaria.
- Los modelos desarrollados en TRNSYS de los cuatro sistemas propuestos son versátiles; lo que permite modificar su diseño o incluir diferentes modelos energéticos, exergéticos y también económicos, bajo diferentes condiciones climáticas o parámetros para diferentes casos de estudio.

Se propone realizar un estudio exergético para emparejar, desde el punto de vista de la eficiencia exergética, las fuentes energéticas y sus tecnologías con las aplicaciones de uso final de la energía más demandadas, para obtener así una guía exergética sobre el uso eficiente y sostenible de los recursos energéticos disponibles.

## Referencias Bibliográficas

- [1] EIA Energy Atlas, “World energy statistics & World energy balances,” p. 703, 2020, [Online]. Available: <http://data.iea.org/103-world-energy-statistics-and-balances-2018-edition-coming-soon.aspx>.
- [2] IPCC, *Calentamiento Global de 1,5 °C*. 2019.
- [3] B. Roca Villanueva, M. Beltrán Salvador, and R. Gómez Huelgas, “Change climate and health,” *Rev. Clin. Esp.*, vol. 219, no. 5, pp. 260–265, 2019, doi: 10.1016/j.rce.2019.01.004.
- [4] A. D. P. Ap *et al.*, “Exergy , environment , and sustainable development,” pp. 61–89, 2021, doi: 10.1016/B978-0-12-824372-5.00004-X.
- [5] United Nations, “The sustainable development goals report 2019,” *United Nations Publ. issued by Dep. Econ. Soc. Aff.*, p. 64, 2019, [Online]. Available: <https://undocs.org/E/2019/68>.
- [6] I. Dincer and A. Abu-Rayash, “Fundamental aspects of energy, environment, and sustainability,” *Energy Sustain.*, no. 2015, pp. 1–18, 2020, doi: 10.1016/b978-0-12-819556-7.00001-2.
- [7] I. Dincer and M. A. Rosen, “Exergy and energy analyses,” *Exergy*, pp. 23–35, 2021, doi: 10.1016/b978-0-12-824372-5.00002-6.
- [8] J. M. P. Sala Lizarraga and A. Picallo-Perez, *Quality of energy and exergy*. 2020.
- [9] U.S. Energy Information Administration, “International Energy Outlook 2019,” *U.S. Energy Inf. Adm.*, vol. September, no. 09, pp. 25–150, 2019.
- [10] X. Cao, X. Dai, and J. Liu, “Building energy-consumption status worldwide and the state-of-the-art technologies for zero-energy buildings during the past decade,” *Energy Build.*, vol. 128, no. 2012, pp. 198–213, 2016, doi: 10.1016/j.enbuild.2016.06.089.
- [11] L. Pérez-Lombard, J. Ortiz, and C. Pout, “A review on buildings energy consumption information,” *Energy Build.*, vol. 40, no. 3, pp. 394–398, 2008, doi: 10.1016/j.enbuild.2007.03.007.
- [12] O. Ibrahim, F. Fardoun, R. Younes, and H. Louahlia-Gualous, “Review of water-heating systems: General selection approach based on energy and environmental aspects,” *Build. Environ.*, vol. 72, pp. 259–286, 2014, doi: 10.1016/j.buildenv.2013.09.006.
- [13] X. Li, W. Wu, and C. W. F. Yu, “Energy demand for hot water supply for indoor environments: Problems and perspectives,” *Indoor Built Environ.*, vol. 24, no. 1, pp. 5–10, 2015, doi: 10.1177/1420326X14564285.
- [14] L. Qifen, Z. Lifeng, P. Cuicui, B. Ang, and P. Weiguo, “The Feasibility Analysis of Energy Conservation by Using Solar Energy to Dehumidify in Transition Season of High Humidity Regions,” *Energy Procedia*, vol. 17, pp. 258–265, 2012, doi: 10.1016/j.egypro.2012.02.092.
- [15] INER, “Análisis de las oportunidades de I+D+i en eficiencia energética y energías renovables en el Ecuador.” p. 168, 2016, [Online]. Available: [https://www.academia.edu/32653611/Agenda\\_I\\_D\\_i\\_en\\_eficiencia\\_energética\\_y\\_energía\\_renovable](https://www.academia.edu/32653611/Agenda_I_D_i_en_eficiencia_energética_y_energía_renovable).

- [16] J. Guamán, M. García, D. Guevara, and A. Ríos, "Evaluación del Impacto Económico en Diferentes Escenarios de Implementación de Tecnologías Eficientes de Calentamiento de Agua en el Ecuador," *Rev. Técnica "Energía,"* vol. 12, no. 1, pp. 270–283, 2016, doi: 10.37116/revistaenergia.v12.n1.2016.52.
- [17] P. Nejat, F. Jomehzadeh, M. M. Taheri, M. Gohari, and M. Z. Muhd, "A global review of energy consumption, CO2 emissions and policy in the residential sector (with an overview of the top ten CO2 emitting countries)," *Renew. Sustain. Energy Rev.,* vol. 43, pp. 843–862, 2015, doi: 10.1016/j.rser.2014.11.066.
- [18] "Our World in Data." <https://ourworldindata.org/renewable-energy> (accessed Aug. 21, 2021).
- [19] "Our World in Data." [https://ourworldindata.org/grapher/co-emissions-by-sector?country=~OWID\\_WRL](https://ourworldindata.org/grapher/co-emissions-by-sector?country=~OWID_WRL) (accessed Aug. 21, 2021).
- [20] Instituto de Investigación Geológico y Energético - IIGE, "Balance Energetico Nacional," *Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables.* p. 180, 2021, [Online]. Available: [www.recursoyenergia.gob.ec](http://www.recursoyenergia.gob.ec).
- [21] I. Dincer and M. A. Rosen, *Exergy and its Ties to the Environment, Economics, and Sustainability.* 2015.
- [22] L. Palacios, "Exergy Fundamentals," 2019, pp. 1–15.
- [23] I. Dincer and M. A. Rosen, *Exergy analyses of renewable energy systems.* 2021.
- [24] I. Dincer and M. A. Rosen, *Exergoeconomic analyses of thermal systems.* 2021.
- [25] M. T. Balta, "Exergetic cost analysis and sustainability assessment of various low exergy heating systems," *Energy Build.,* vol. 55, pp. 721–727, 2012, doi: 10.1016/j.enbuild.2012.09.030.
- [26] E. Fuentes, L. Arce, and J. Salom, "A review of domestic hot water consumption profiles for application in systems and buildings energy performance analysis," *Renew. Sustain. Energy Rev.,* vol. 81, no. April, pp. 1530–1547, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.05.229.
- [27] M. Z. Pomianowski, H. Johra, A. Marszal-Pomianowska, and C. Zhang, "Sustainable and energy-efficient domestic hot water systems: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.,* vol. 128, no. August 2019, p. 109900, 2020, doi: 10.1016/j.rser.2020.109900.
- [28] X. Yang, H. Li, and S. Svendsen, "Energy, economy and exergy evaluations of the solutions for supplying domestic hot water from low-temperature district heating in Denmark," *Energy Convers. Manag.,* vol. 122, pp. 142–152, 2016, doi: 10.1016/j.enconman.2016.05.057.
- [29] C. Su, C. Su, L. Comisi, C. Interterritorial, and S. Nacional, "Proyecto de Real Decreto .../ 2021 , por el que se establecen los criterios higiénico- sanitarios para la prevención y el control de la legionelosis CAPITULO I Disposiciones generales," 2021, [Online]. Available: [https://www.sanidad.gob.es/normativa/audiencia/docs/RD\\_CONTROL\\_LEGION ELOSIS.pdf](https://www.sanidad.gob.es/normativa/audiencia/docs/RD_CONTROL_LEGION ELOSIS.pdf).
- [30] ASHRAE, "Minimizing the Risk of Legionellosis Associated with Building Water Systems.," *ASHRAE Guidel. 12-2000,* no. Guideline 12-2000, 2000.
- [31] ASHRAE, "ANSI/ASHRAE Standard 188-2015. Legionellosis: Risk Management

- for Building Water Systems,” pp. 1–20, 2015.
- [32] “HomeAdvisor.” <https://www.homeadvisor.com/cost/plumbing/install-a-water-heater/> (accessed Sep. 09, 2021).
- [33] J. A. Duffie (Deceased), W. A. Beckman, and N. Blair, *Solar Engineering of Thermal Processes, Photovoltaics and Wind*. 2020.
- [34] S. A. Kalogirou, *Solar Energy Engineering: Processes and Systems: Second Edition*. 2014.
- [35] MINENERGIA, GEF, PNUD, and CDT, *Sistemas Solares Térmicos*, 1st ed. 2010.
- [36] E. de O. Fernandes, *Solar Energy In The Built Environment*. 2000.
- [37] A. Hepbasli, “Heat Pumps,” *Compr. Energy Syst.*, vol. 4–5, pp. 98–124, 2018, doi: 10.1016/B978-0-12-809597-3.00404-1.
- [38] I. Dincer and M. A. Rosen, *Heat Pump Systems*. 2015.
- [39] A. Redko, O. Redko, and R. DiPippo, *Effective use of heat pumps for various heating applications*. 2020.
- [40] F. J. Aguilar, D. Crespí, and P. V. Quiles, “Experimental and numerical study of the domestic hot water production with PV panels and a heat pump,” *E3S Web Conf.*, vol. 111, no. 201 9, 2019, doi: 10.1051/e3sconf/201911101066.
- [41] X. Guo and A. P. Goumba, “Air source heat pump for domestic hot water supply: Performance comparison between individual and building scale installations,” *Energy*, vol. 164, pp. 794–802, 2018, doi: 10.1016/j.energy.2018.09.065.
- [42] L. M. López-Ochoa, K. Verichev, J. Las-Heras-Casas, and M. Carpio, “Solar domestic hot water regulation in the Latin American residential sector with the implementation of the Energy Performance of Buildings Directive: The case of Chile,” *Energy*, vol. 188. 2019, doi: 10.1016/j.energy.2019.115985.
- [43] R. Serway, *Electricidad y Magnetismo*, Tercera Ed. McGRAW-HILL.
- [44] D. E. Seitz, J. Dabney, L. Everett, and T. L. Harman, “Tankless Water Heater,” p. 16, 2013.
- [45] G. Johnson and I. Beausoleil-Morrison, “The calibration and validation of a model for predicting the performance of gas-fired tankless water heaters in domestic hot water applications,” *Appl. Energy*, vol. 177, pp. 740–750, 2016, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.05.130.
- [46] G. Bourke, P. Bansal, and R. Raine, “Performance of gas tankless (instantaneous) water heaters under various international standards,” *Appl. Energy*, vol. 131, pp. 468–478, 2014, doi: 10.1016/j.apenergy.2014.06.008.
- [47] M. Krarouch, F. Ruesch, H. Hamdi, A. Outzourhit, and M. Haller, “Dynamic simulation and economic analysis of a combined solar thermal and pellet heating system for domestic hot water production in a traditional Hammam,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 180, no. August, p. 115839, 2020, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2020.115839.
- [48] F. Cao, Z. Ye, and Y. Wang, “Experimental investigation on the influence of internal heat exchanger in a transcritical CO<sub>2</sub> heat pump water heater,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 168, no. July 2019, p. 114855, 2020, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2019.114855.

- [49] M. S. Buker and S. B. Riffat, "Solar assisted heat pump systems for low temperature water heating applications: A systematic review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 55, pp. 399–413, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.10.157.
- [50] X. Sun, Y. Dai, V. Novakovic, J. Wu, and R. Wang, "Performance Comparison of Direct Expansion Solar-assisted Heat Pump and Conventional Air Source Heat Pump for Domestic Hot Water," *Energy Procedia*, vol. 70, pp. 394–401, 2015, doi: 10.1016/j.egypro.2015.02.140.
- [51] A. Hepbasli and Y. Kalinci, "A review of heat pump water heating systems," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 13, no. 6–7, pp. 1211–1229, 2009, doi: 10.1016/j.rser.2008.08.002.
- [52] A. Ahmadi *et al.*, "Recent residential applications of low-temperature solar collector," *J. Clean. Prod.*, vol. 279, 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.123549.
- [53] O. Kara, K. Ulgen, and A. Hepbasli, "Exergetic assessment of direct-expansion solar-assisted heat pump systems: Review and modeling," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 12, no. 5, pp. 1383–1401, 2008, doi: 10.1016/j.rser.2006.12.001.
- [54] D. Brough, J. Ramos, B. Delpech, and H. Jouhara, "Development and validation of a TRNSYS type to simulate heat pipe heat exchangers in transient applications of waste heat recovery," *Int. J. Thermofluids*, vol. 9, 2021, doi: 10.1016/j.ijft.2020.100056.
- [55] M. Karami and F. Javanmardi, "Performance assessment of a solar thermal combisystem in different climate zones," *Asian J. Civ. Eng.*, vol. 21, no. 5, pp. 751–762, 2020, doi: 10.1007/s42107-020-00236-0.
- [56] TRANSSOLAR Energietechnik, "Trnsys 18," vol. 3, pp. 49–50, 2017, [Online]. Available: <http://www.trnsys.com/>.
- [57] ASHRAE, *2019 ASHRAE Handbook\_ HVAC Applications CH35.pdf*. 2019.
- [58] A. Lomet, F. Suard, and D. Chèze, "Statistical Modeling for Real Domestic Hot Water Consumption Forecasting," *Energy Procedia*, vol. 70, pp. 379–387, 2015, doi: 10.1016/j.egypro.2015.02.138.
- [59] J. de Santiago, O. Rodriguez-Vialon, and B. Sicre, "The generation of domestic hot water load profiles in Swiss residential buildings through statistical predictions," *Energy Build.*, vol. 141, pp. 341–348, 2017, doi: 10.1016/j.enbuild.2017.02.045.
- [60] A. Ergun, T. Menlik, and M. G. Ozkaya, "Energy and Exergy Analyses of the Heating System in a Multipurpose Building," *IGazi Mühendislik Bilim. Derg.*, vol. 1, no. 1, pp. 195–218, 2015.
- [61] Código Técnico Español, *Documento Básico HS Salubridad*, vol. 2013. 2007, pp. 1–129.
- [62] MIDUVI, "NEC-11, Norma Hidrosanitaria NHE Agua," *Norma Ecuatoriana La Construcción*, p. 38, 2011.
- [63] "Home - NSRDB." <https://nsrcdb.nrel.gov/> (accessed Nov. 20, 2021).
- [64] "Sistema de Distribución-EPMAPS." <https://www.aguaquito.gob.ec/sistema-de-distribucion/> (accessed Nov. 25, 2021).

- [65] "SCINERGY." <https://meteo-scinergy.epn.edu.ec/> (accessed Aug. 21, 2021).
- [66] T. Bergman, A. Lavine, F. Incropera, and D. Dewitt, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, SEVENTH ED. JOHN WILEY & SONS, 2011.
- [67] M. J. (The O. S. U. Moran, H. N. (low. S. U. Shapiro, U. . A. Boettner, Daise D. (Colonel, and M. B. (Rochester I. of T. Bailey, *FUNDAMENTALS OF ENGINEERING THERMODYNAMICS*, 9th ed. United States of America: WILEY, 2017.
- [68] TRNSYS18 V4, "Trnsys 18 a transient system simulation program. Volume 4: Mathematical Reference. Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison, USA," vol. 4, [Online]. Available: <http://sel.me.wisc.edu/trnsys>.
- [69] C. y B. S. Ministerio de Sanidad, "Sistemas de agua caliente sanitaria," pp. 1–25, 2003.
- [70] I. Dincer and M. A. Rosen, *Energy and Exergy Assessments*. 2015.
- [71] S. K. Thangavelu, R. J. Khoo, and C. Piraiarasi, "Exergy and exergoeconomic analysis of domestic scale solar water heater by the effect of solar collector area," *Mater. Today Proc.*, vol. 47, no. xxxx, pp. 5004–5010, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2021.04.584.
- [72] A. Allouhi, M. Benzakour Amine, M. S. Buker, T. Kousksou, and A. Jamil, "Forced-circulation solar water heating system using heat pipe-flat plate collectors: Energy and exergy analysis," *Energy*, vol. 180, pp. 429–443, 2019, doi: 10.1016/j.energy.2019.05.063.
- [73] F. Yazdanifard and M. Ameri, "Exergetic advancement of photovoltaic/thermal systems (PV/T): A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 97, no. August, pp. 529–553, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.08.053.
- [74] I. Moukhtar, A. Z. El Dein, A. A. Elbaset, and Y. Mitani, "Economic Study of Solar Energy Systems," *Power Systems*. pp. 113–133, 2021, doi: 10.1007/978-3-030-61307-5\_6.
- [75] F. Peuser, K. Remmers, and M. Schnauss, *Sistemas solares termicos Diseño e instalacion.pdf*. SOLARPRAXIS, 2002.
- [76] I. Harrabi, M. Hamdi, A. Bessifi, and M. Hazami, "Dynamic modeling of solar thermal collectors for domestic hot water production using TRNSYS," *Euro-Mediterranean J. Environ. Integr.*, vol. 6, no. 1, pp. 1–17, 2021, doi: 10.1007/s41207-020-00223-6.
- [77] S. C. Factsheet, "Solar Collector Factsheet C1549," pp. 2–3, 2013.
- [78] I. García Kerdan and D. Morillón Gálvez, "Artificial neural network structure optimisation for accurately prediction of exergy, comfort and life cycle cost performance of a low energy building," *Appl. Energy*, vol. 280, no. October, 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.115862.
- [79] A. Falls, "Air to Water Heat Pump System," 2001.
- [80] "STIEBEL ELTRON." [https://www.stiebeltronamericas.com/sites/default/files/pdf/brochure\\_dhf\\_es.pdf](https://www.stiebeltronamericas.com/sites/default/files/pdf/brochure_dhf_es.pdf) (accessed Sep. 20, 2021).
- [81] A. F. Quintã, J. A. F. Ferreira, A. Ramos, N. A. D. Martins, and V. A. F. Costa,

- “Simulation models for tankless gas water heaters,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 148, pp. 944–952, 2019, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2018.11.095.
- [82] J. M. P. Sala Lizarraga and A. Picallo-Perez, *Exergy analysis of thermal facilities equipment in buildings (I)*, no. 1. 2020.
- [83] “Banco Central del Ecuador.” <https://www.bce.fin.ec/> (accessed Dec. 10, 2021).
- [84] W. G. Sullivan, E. M. Wicks, and C. P. Koelling, *Engineering-Economy*, 16th ed. PEARSON, 2015.

## Anexos

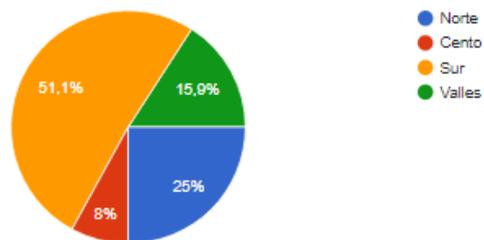
### ANEXO A.

#### Preguntas y resultados sobre hábitos y tipos de uso del agua caliente sanitaria

##### Datos de sector, vivienda y habitantes.

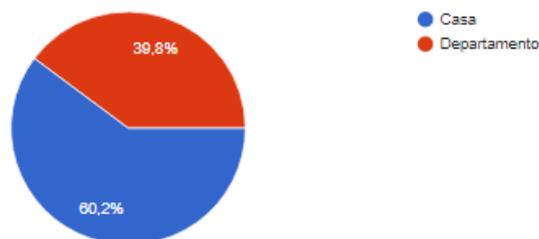
¿En que sector de Quito reside?

88 respuestas



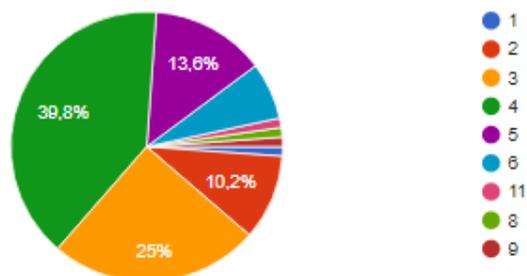
¿Cuál es el tipo de vivienda en la que reside?

88 respuestas



¿ Cuántas personas en total residen en la vivienda?

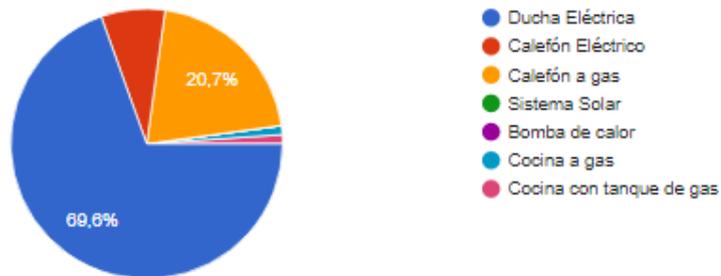
88 respuestas



## Sistema de calentamiento de agua sanitaria

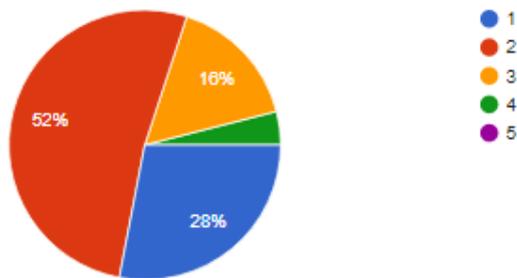
¿Qué tipo de sistema se utiliza para calentar el agua para la vivienda?

88 respuestas



En caso de Calefón a gas, ¿Cuántos cilindros de GLP usa al mes?

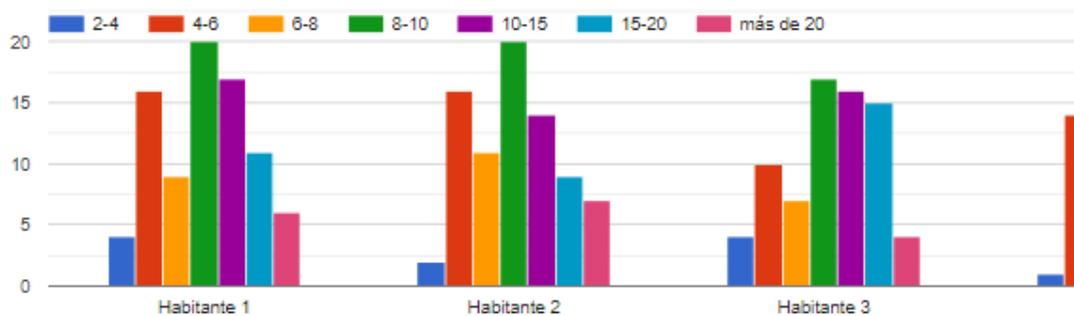
25 respuestas



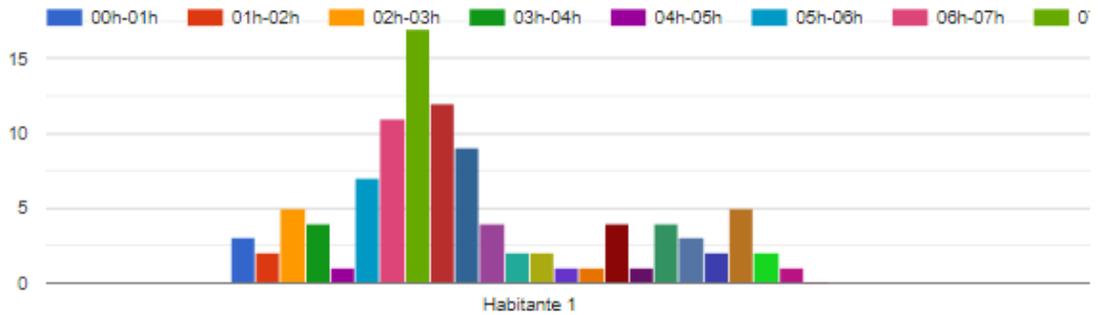
## Perfil de consumo de agua caliente sanitaria

### Agua caliente sanitaria para bañarse

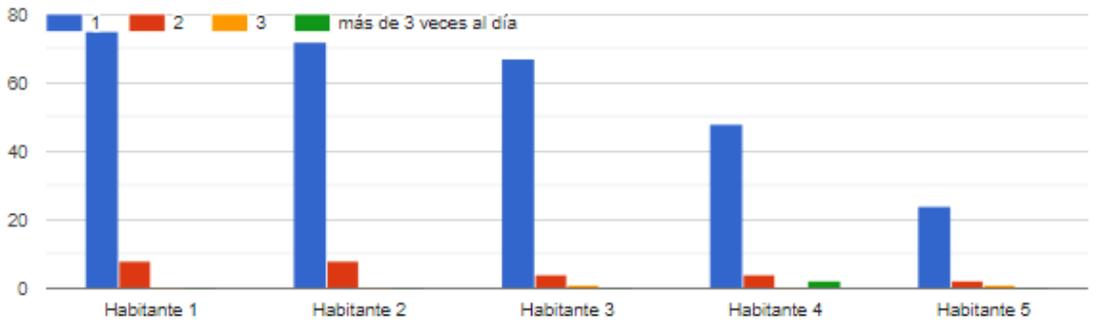
Aproximadamente, ¿Qué tiempo, en minutos, le toma bañarse?



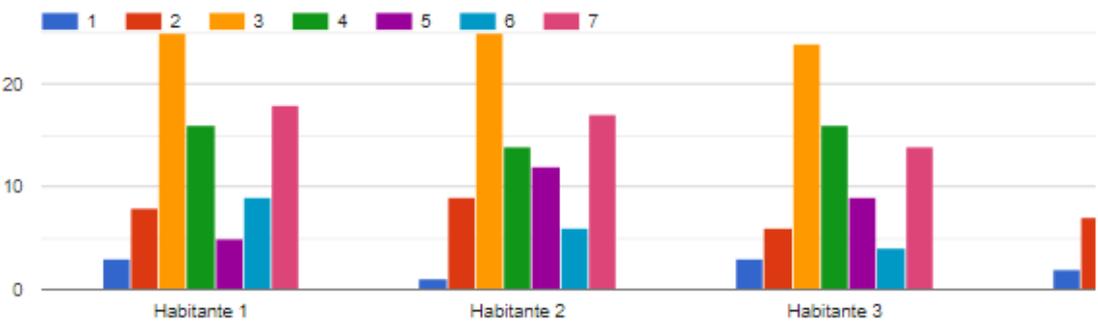
¿Cuál es el horario habitual para bañarse?



¿Cuántas veces, por día, se baña?



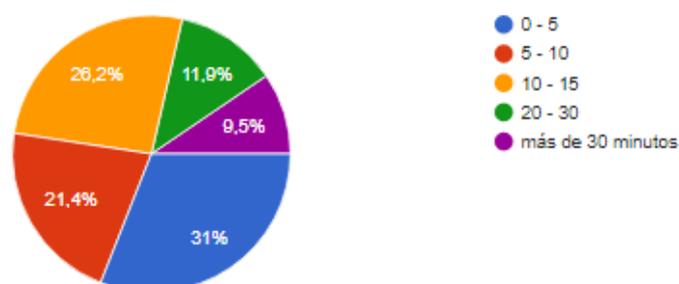
¿Cuántos días a la semana se baña?



## Agua caliente sanitaria para lavado de vajilla

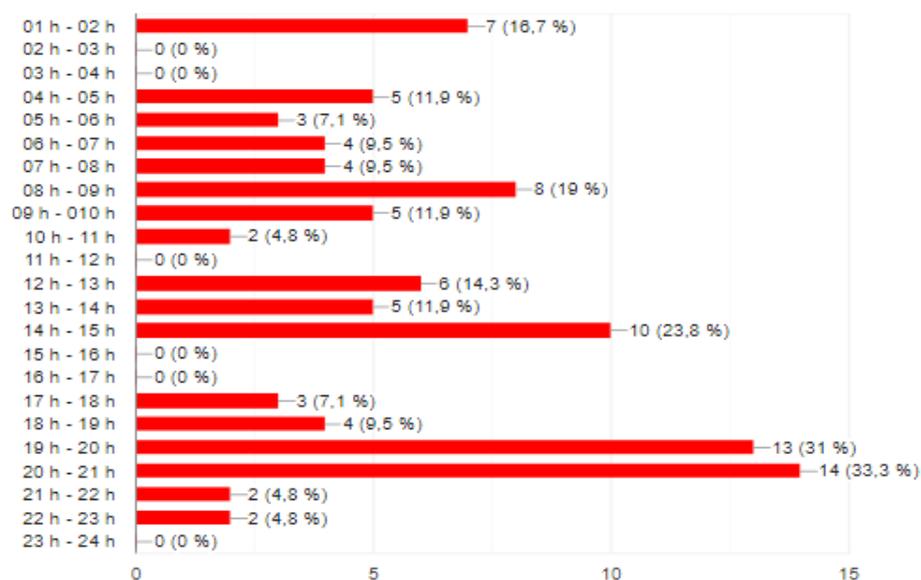
Aproximadamente, ¿Qué tiempo, en minutos, le toma lavar la vajilla con agua caliente?

42 respuestas



¿Cuál es el horario habitual para lavar la vajilla con agua caliente?

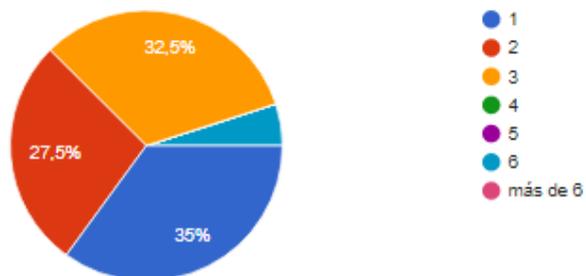
42 respuestas



¿Cuántas veces, por día, se lava la vajilla con agua caliente?

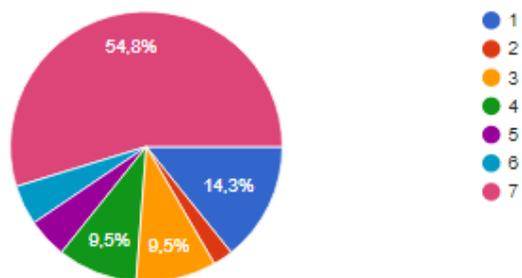


40 respuestas



¿Cuántos días a la semana se lava la vajilla con agua caliente?

40 respuestas



## ANEXO B.

### Análisis exergético de resistencias inmersas en el tanque de acumulación

Si el sistema es cerrado la variación de exergía resulta ser:

$$E_{x_2} - E_{x_1} = \int_1^2 \left[ 1 - \frac{T_a}{T_b} \right] \partial Q - [W - p_a(V_2 - V_1)] - T_a \sigma$$

Al no existir variación de volumen del sistema o flujo de calor hacia el sistema:

$$V_2 - V_1 = 0 \quad \int_1^2 \left[ 1 - \frac{T_a}{T_{fe}} \right] \partial Q = 0$$

$$E_{x_{fl,2}} - E_{x_{fl,1}} = (U_2 - U_1) - T_a(S_2 - S_1)$$

$$\Delta U = (U_2 - U_1)$$

$$\Delta U = Q - W$$

$$Q = 0$$

$$\Delta U = -W$$

$$\Delta U = m_{fl}(h_{fl,out} - h_{fl,in})$$

$$m_{fl}(h_{fl,out} - h_{fl,in}) = m_{fl}C_p(T_{fl,out} - T_{fl,in})$$

$$\Delta U = m_{fl}C_p(T_{fl,out} - T_{fl,in})$$

$$\Delta S = S_2 - S_1$$

$$T d\bar{s} = d\bar{u} + p d\bar{v}$$

$$v = cte$$

$$du = C(T)dT$$

Ya que la energía interna depende únicamente de la temperatura:

$$p d\bar{v} = 0$$

$$T ds = C(T) dT$$

$$c(T) = Cp$$

$$T ds = Cp dT$$

$$\int_1^2 ds = \int_1^2 \frac{Cp dT}{T}$$

$$\Delta s = Cp \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right)$$

$$T_2 = T_{fl,out}$$

$$T_1 = T_{fl,in}$$

$$\Delta S = m_{fl} \Delta s$$

$$\Delta S = m_{fl} Cp \ln\left(\frac{T_{fl,out}}{T_{fl,in}}\right)$$

$$\psi_{C.Elec} = \frac{E_{xp}}{W_{elec}}$$

$$\psi_{C.Elec} = \frac{\Delta U - T_a \Delta S}{\Delta U}$$

$$\psi_{C.Elec} = 1 - \frac{T_a \Delta S}{\Delta U}$$

$$\psi_{C.Elec} = 1 - \frac{T_a m_{fl} Cp \ln\left(\frac{T_{fl,out}}{T_{fl,in}}\right)}{m_{fl} C_p (T_{fl,out} - T_{fl,in})}$$

Por ende, la eficiencia exergética de la energía entregada al agua dentro del tanque de acumulación por parte de las resistencias eléctricas sumergidas en este sería:

$$\psi_{C.Elec} = 1 - \frac{T_a \ln\left(\frac{T_{fl,out}}{T_{fl,in}}\right)}{(T_{fl,out} - T_{fl,in})}$$