

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL
Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la
Producción

"Simulación de un Sistema de Bomba de Calor para el Calentamiento de
Agua en Aplicaciones Domésticas y su Integración con Tecnologías de
Almacenamiento de Energía Térmica"

TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN

Materia Integradora

Previo la obtención del Título de:

INGENIERO MECÁNICO

Presentado por:

Gabriel Andrés Agila Suárez

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2015

AGRADECIMIENTOS

A mi madre Maritza Suárez López, por su constante esfuerzo, lucha y sacrificio; a mi hermano Roberto Agila S., por su aliento y apoyo incondicional, a Ana Granja Vera por estar a mi lado durante este recorrido y por creer en mí. Finalmente al Dr. Guillermo Soriano, por su guía constante e invaluable contribución en el desarrollo de esta investigación.

DECLARACIÓN EXPRESA

"La responsabilidad del contenido desarrollado en la presente propuesta de la materia integradora corresponde exclusivamente al equipo conformado por:

Gabriel Andrés Agila S.

Director: PhD. Guillermo Soriano I.

Y el patrimonio intelectual de la misma a la Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción (FIMCP) de la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL".

Estamos también de acuerdo que el vídeo de la presentación oral es de plena propiedad de la FIMCP.



Gabriel Andrés Agila S.



PhD. Guillermo Soriano I

RESUMEN

Se presenta el desarrollo de un modelo para un sistema de bomba de calor con almacenamiento térmico, operando simultáneamente para calentamiento y enfriamiento. La función primordial del sistema es producir calor útil para generar servicios de agua caliente sanitaria para una vivienda promedio (2 adultos y 1 niño) en las ciudades de Guayaquil y Quito.

La operación del modelo fue estudiada para un periodo anual a través de una simulación energética del sistema usando el software TRNSYS 17. El objetivo de la simulación fue evaluar el consumo energético y potencial de ahorro en diferentes modos operativos de funcionamiento; así como determinar los principales parámetros que afecten la eficiencia del sistema.

Los requerimientos de temperatura, frecuencia y caudales de agua caliente sanitaria se fundamentaron en los lineamientos y las recomendaciones descritas en el Capítulo 50 del Manual de Aplicaciones de HVAC publicado por la ASHRAE (2011) y el Estándar ASHRAE 90.2. La información fue aterrizada en un contexto nacional a partir de datos encontrados en los registros del Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC).

Se llevó a cabo un análisis comparativo en base a los consumos anuales de energía para diferentes medios de producir agua caliente sanitaria. Cinco alternativas fueron examinadas: (1) calentador de acumulación por resistencia eléctrica; (2) calentador instantáneo por combustión de GLP; (3) calentador de agua termo solar; (4) calentador de agua por bomba de calor alimentada por aire; y (5) un calentador de agua por bomba de calor integrada con almacenamiento térmico. Los resultados demuestran las ventajas de la eficiencia energética del sistema propuesto, reduciendo el consumo de energía en un 30 a 60% en comparación con tecnologías convencionales.

Se espera que el trabajo realizado de pie a iniciativas de proyectos de investigación y genere interés en el diseño y simulación de los distintos tipos de sistemas calentamiento de agua sanitaria.

Palabras Clave: Bombas de calor, Calentador de Agua Residencial, Batería Térmica.

ABSTRACT

The Developing of a model for a heat pump system with heat storage, operating simultaneously for heating and cooling is conducted. The primary function of the system is to produce useful heat to generate hot water services for an average household (2 adults and 1 child) in the cities of Guayaquil and Quito.

The operation of the model was evaluated for an annual period through an energy simulation using TRNSYS 17. The purpose of the simulation was to assess the energy consumption and potential savings in different operating modes; and to determine the main parameters affecting the efficiency of the system.

Requirements for temperature, flow rate and hot water were based on the guidelines and recommendations contained in Chapter 50 of HAVC Applications Handbook published by ASHRAE (2011) and ASHRAE Standard 90.2. The information was grounded in a national context from data found in the records of the National Institute of Statistics and Census (NISC).

A comparative analysis based on annual energy consumption for different ways to produce hot water is conducted. Five alternatives were examined: (1) electric storage water heater; (2) gas fired automatic water heater; (3) solar water heater; (4) air source heat pump water heater; and (5) a heat pump water heater integrated with thermal storage. The results show the benefits of energy efficiency of the proposed system, reducing energy consumption about of 30-60% compared to conventional technologies.

It is expected that the work promotes initiatives and research projects to generate interest in the design and simulation of various types of domestic water heating systems.

Keywords: *Heat Pumps, Residential Water Heater, Thermal Battery*

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN.....	I
ABSTRACT.....	II
ÍNDICE GENERAL.....	III
ABREVIATURAS.....	V
SIMBOLOGÍA.....	VI
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VIII
ÍNDICE DE TABLAS.....	XI
CAPÍTULO 1.....	1
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Objetivos del Estudio	1
Objetivos Generales:.....	1
Objetivos Específicos	1
1.2. Antecedentes - La Problemática Energética.....	2
1.3. Situación Energética en el Ecuador	2
2. METODOLOGÍA DE DISEÑO	12
2.1. Consumo de Agua Caliente en el Sector Residencial.....	12
2.1.1. Factores que afectan el Consumo de Agua Caliente Residencial	12
2.1.2. Requerimientos de Temperatura para Calentamiento de Agua en el Sector Residencial.....	14
2.1.3. Patrones de Consumo de Agua Caliente en el Sector Residencial	15
2.1.4. Consumo Diario de Agua Caliente.....	19
2.1.5. Consideraciones de Diseño	20
2.2. Sistemas para Servicio de Agua Caliente Residencial	23
2.2.1. Tipos de Calentadores de Agua Residenciales	24
2.2.2. Calentadores de Agua Residenciales Alternativos	25
2.3. Tecnología de Bomba de Calor con Almacenamiento Térmico para Calentamiento de Agua.....	27
2.3.1. Principios Termodinámicos de la Bomba de Calor	30
2.3.2. COP-Coeficiente de Rendimiento	31
2.4. Emisiones de CO ₂	31
2.5. Alternativas para Sistema de Agua Caliente Residencial	34

2.5.1.	Condiciones de los Sitios para Simulación	34
2.5.2.	Alternativa 1 - Calentador de Acumulación por Resistencia Eléctrica.....	35
2.5.3.	Alternativa 2 - Calentador Instantáneo Alimentado por GLP.....	39
2.5.4.	Alternativa 3 - Calentador de Agua Termo solar.....	41
2.5.5.	Alternativa 4 - Calentador por Bomba de Calor Alimentada por Aire.....	47
2.5.6.	Alternativa 5 - Calentador de Agua con Batería Térmica.....	51
CAPÍTULO 3.....		60
3.	RESULTADOS	60
3.1.	Análisis Comparativo de las Alternativas	60
3.1.1.	Consumo de Energía	70
3.1.2.	COP – Coeficiente de Rendimiento	72
3.2.	Emisiones Atmosféricas.....	73
3.3.	Costo de la Energía	75
3.4.	Análisis del Costo Beneficio.....	77
CAPÍTULO 4.....		79
4.	Conclusiones y Recomendaciones.....	79
4.1.	Conclusiones	79
4.2.	Recomendaciones	80
BIBLIOGRAFÍA.....		82
APÉNDICE A.....		84
APÉNDICE B.....		88
APÉNDICE C.....		95
APÉNDICE D.....		98

ABREVIATURAS

ACEEE	American Council for an Energy Efficient Economy
ARCH	Agencia de Regulación y Control Hidrocarburífero
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air – Conditioning Engineers
ASTM	American Society for Testing and Materials
BEP	Barriles Equivalentes de Petróleo
CEDEC	Comité Ejecutivo del Código Ecuatoriano de la Construcción
CONELEC	Consejo Nacional de Electricidad
DNSAHC	Dirección Nacional de Servicios Ambientales y Herramientas para la Conservación
DOE	Department of Energy – E.E.U.U.
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
FHR	First Hour Rating
GEI	Gases de Efecto Invernadero
GRI	Global Reporting Initiative
IEA	International Energy Agency
INAMHI	Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología
INEC	Instituto Nacional de Estadísticas y Censos
INECEL	Instituto Nacional de Electricidad
MAE	Ministerio del Ambiente
MCPEC	Ministerio Coordinador de la Producción, Empleo y Competitividad.
MDL	Mecanismo de Desarrollo Limpio
MEER	Ministerio de Electricidad y Energías Renovables
MICSE	Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos
PIB	Producto Interno Bruto
PNBV	Plan Nacional del Buen Vivir
SENPLADES	Secretaria Nacional de Planificación y Desarrollo
SNI	Sistema Nacional Interconectado
SRCC	Solar Rating and Certification Corporation
TB	Batería Térmica
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change
UNSD	United Nation Statistic Division
US EPA	Environmental Protection Agency - E.E.U.U.

SIMBOLOGÍA

\dot{Q}_L	Transferencia de calor en el lado de la carga
\dot{Q}_s	Transferencia de calor desde la fuente
\dot{Q}_{gen}	Tasa de calor total útil producido
\dot{Q}_l	Carga térmica latente
\dot{Q}_{se}	Carga térmica sensible
\dot{Q}_{AC}	Carga térmica Total
\dot{Q}_R	Capacidad de calentamiento requerida
T_{hot,in_t}	Temperatura del agua que entra a la unidad
$\dot{V}_{Colector}$	Consumo promedio diario de agua caliente
\dot{V}_{air}	Flujo volumétrico de suministro de aire
\dot{W}_{elec}	Demanda de potencia
\dot{m}_{mixed}	Flujo volumétrico de mezcla
\dot{v}_a	Flujo volumétrico de agua caliente rea
h_2	Entalpía de entrada del aire en intercambiador
h_4	Entalpía de salida del aire en intercambiador
h_{fg}	Calor latente de vaporación a 32 °F (0 °C)
\dot{m}	Flujo másico
\dot{Q}	Tasa de Transferencia de Calor
S_t	Volumen del tanque de almacenamiento
\dot{V}	Flujo Volumétrico
V_t	Agua caliente disponible
\dot{W}	Potencia Suministrada
A_c	Área de colectores
E_{CO2}	Emisiones de CO ₂
$S_{c,s}$	Volumen de almacenamiento del tanque de agua fría
T_2	Temperatura de entrada del aire en intercambiador
T_4	Temperatura de salida del aire en intercambiador
$T_{hot,out}$	Temperatura del agua que sale de la unidad
T_m	Temperatura de mezcla del aire
T_{max}	Temperatura máxima de Seguridad
T_{mixed}	Temperatura de la mezcla de agua
w_2	Radio de humedad de entrada del aire en intercambiador
w_4	Radio de humedad de salida del aire en intercambiador
γ_i	Entrada función de control
γ_o	Salida función de control
η_s	Eficiencia del colector
η_{wh}	Eficiencia del calentador de agua
ρ_{air}	Densidad del aire de suministro

ρ_w	Densidad del agua
ΔT_H	Diferencia de temperatura Superior
ΔT_L	Diferencia de temperatura Inferior
AGPD	Consumo promedio diario de agua caliente
B	Consumo diario por persona 3.2 gal/día.
BTU	Unidad Térmica Británica.
CFM	Pies cúbicos por minuto.
COP	Coeficiente de Rendimiento
C_p	Calor específico del agua
CW	Consumo diario por uso de lavadora 2.0 gal/día por persona
H	Entalpía
hr	Hora
kg	Kilogramo
kJ	kilojoule
kW	Kilowatt
M	Radio entre volumen disponible y volumen de almacenamiento
m	Metro
m^2	Metro Cuadrado
m^3	Metro Cúbico
mm	Milímetro
NP	Número de personas en una vivienda
P	Presión
R	Tasa de recuperación a la temperatura de consigna
RCS	Relación de calor sensible
s	Segundo
SPA	Consumo diario por uso de tina 25 gal/día por persona
T	Temperatura
T_{avg}	Temperatura promedio del tanque de almacenamiento
T_{set}	Temperatura de consigna
V	Volumen
β	Inclinación del colector.
η	Eficiencia electromecánica
v	Volumen específico
ρ	Coeficiente de reflexión del suelo
C	Energía consumida asociada a la emisión de CO ₂
I	Radiación incidente en el colector
L	Litro
f	Factor de emisión

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Evolución de la oferta energética por fuente de energía. Periodo 1970-2010....	3
Figura 1.2 Evolución de la demanda energética por sector. Periodo 1970-2010	3
Figura 1.3 Tasas de crecimiento acumulativo demanda vs PIB. Periodo 2000-2010	4
Figura 1.4 Subsidios a los combustibles fósiles a nivel nacional. Periodo 2005-2009	6
Figura 1.5 Uso final de energía primaria por sector en el ecuador. Año 2011.....	6
Figura 1.6 Población total y proyecciones. Periodo 1950-2020	7
Figura 1.7 Consumo de energía por sectores	7
Figura 1.8 Uso de energía por tipo de fuente - Sector residencial.....	8
Figura 1.9 Participación de los usos finales en el consumo de energía - Región costa	8
Figura 1.10 Participación de los usos finales en el consumo de Energía - Región sierra ...	9
Figura 1.11 Demanda eléctrica sector residencial.....	9
Figura 2.1 Consumo de agua caliente residencial por cápita	13
Figura 2. 2 Desarrollo de quemaduras en función de la temperatura de agua	14
Figura 2.3 Consumo residencial promedio de agua caliente	16
Figura 2.4 Histograma de perfiles de agua caliente - Fracción de consumo o demanda total diaria	17
Figura 2.5 Comparación de perfiles ASHRAE 90.2, Becker, Bouchelle y Perlman - Fracción de consumo o demanda total diaria.....	18
Figura 2.6 Comparación entre perfiles SRCC, Becker y ASHRAE 90.2 - Fracción de consumo o demanda total diaria	19
Figura 2.7 Consumo horario de agua caliente residencial.....	20
Figura 2.8 Función de Control	23
Figura 2.9 Sistemas para suministro de agua caliente	25
Figura 2.10 Principio de operación de una bomba de calor.....	27
Figura 2.11 Esquema del concepto de bomba de calor con almacenamiento térmico.....	29
Figura 2.12 Configuración básica de una bomba de calor.....	30
Figura 2.13. Alternativa 1 - Calentador de agua por resistencia eléctrica.....	35
Figura 2.14. Modelo tanque de almacenamiento	37
Figura 2.15 Diagrama esquemático de tanque de acumulación por resistencia eléctrica .	38
Figura 2.16 Diagrama esquemático de un calentador instantáneo por GLP	41
Figura 2.17 Calentador de agua residencial termo solar	42

Figura 2.18 Calentador de agua residencial termo solar	46
Figura 2.19. Calentador de Agua por bomba de calor alimentada por aire	47
Figura 2.20 Esquema de un modelo de bomba de calor basado en datos del fabricante .48	
Figura 2.21 Diagrama de flujo para implementación de modelo de bomba de calor	48
Figura 2.22 Bomba de Calor Aire – Agua Marca HUBBEL.....	49
Figura 2.23 Sistema de calentamiento de agua por bomba de calor alimentada por aire .51	
Figura 2.24 Bomba de calor para calentamiento y enfriamiento simultáneo	52
Figura 2.25 Diagrama de un sistema de aire acondicionado con retorno.....	53
Figura 2.26 Efecto del ambiente térmico en el estrés térmico	54
Figura 2.27 Carta Psicométrica ASHRAE No. 1	55
Figura 2.28 Esquema de alternativa 5 - trnsys.	58
Figura 3.1 Resultados Calentador eléctrico por acumulación. Guayaquil.....	61
Figura 3.2 Resultados Calentador eléctrico por acumulación. Quito	61
Figura 3.3 Resultado anual para Calentador eléctrico por acumulación - Guayaquil	62
Figura 3.4 Resultado anual para Calentador eléctrico por acumulación - Quito.....	62
Figura 3.5 Resultados Calentador instantáneo por GLP - Guayaquil	63
Figura 3.6 Resultados Calentador instantáneo por GLP – Quito.....	63
Figura 3.7 Resultado anual Calentador instantáneo por GLP – Quito	64
Figura 3.8 Resultados Calentador instantáneo por GLP - Quito.....	64
Figura 3.9 Resultados Calentador Termo solar con resistencia de respaldo - Guayaquil .65	
Figura 3.10 Resultados Calentador Termo solar con resistencia de respaldo - Quito	65
Figura 3.11 Resultado anual C. Termo solar con resistencia de respaldo - Guayaquil	66
Figura 3.12 Resultado anual C. Termo solar con resistencia de respaldo - Quito.....	66
Figura 3.13 Resultados bomba de calor alimentada por aire - Guayaquil	67
Figura 3.14 Resultados bomba de calor alimentada por aire - Quito.....	67
Figura 3.15 Resultado anual bomba de calor alimentada por aire - Guayaquil	68
Figura 3.16 Resultado anual bomba de calor alimentada por aire - Quito.....	68
Figura 3.17 Resultados Calentador por batería térmica - Guayaquil.....	69
Figura 3.18 Resultados Calentador por batería térmica – Quito.....	70
Figura 3.19 Resultado anual Calentador por Batería Térmica - Guayaquil	70
Figura 3.20 Consumo Anual de Energía para diferentes medios de producir agua caliente - Guayaquil.....	72
Figura 3.21 Consumo Anual de Energía para diferentes medios de producir agua caliente - Quito	72

Figura 3.22 COP Anual - Guayaquil	73
Figura 3.23 COP Anual - Quito.....	73
Figura 3.24 Emisiones Anuales de CO2 por hogar - Guayaquil	74
Figura 3.25 Emisiones Anuales de CO2 por hogar- Quito.....	74
Figura 3.26 Costo Anual de energía por hogar – Guayaquil.....	76
Figura 3.27 Costo Anual de energía por hogar – Quito	76

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Estadísticas energéticas en América Latina, Central y el Caribe.....	5
Tabla 2 Distribución del subsidio al GLP en Ecuador.....	10
Tabla 3 Distribución del subsidio al GLP por quintiles de pobreza	10
Tabla 4 Uso Residencial Típico de Agua Caliente.....	14
Tabla 5 Demanda de agua caliente y lineamientos de uso (Litros por persona a 49°C en punto de uso final	21
Tabla 6 Características de los sistemas de agua caliente.....	25
Tabla 7 Comparación del costo de ciclo de vida para diferentes sistemas para calentamiento de agua	26
Tabla 8 Factores de Emisión para Gases de Efecto Invernadero	33
Tabla 9 Modelos de calentadores por resistencia eléctrica vs capacidades de recuperación	36
Tabla 10 Características del modelo para alternativa 1.....	38
Tabla 11 Características del Cilindro 15 kg de GLP.....	39
Tabla 12 Modelos Calefones Potencia vs Temperatura de entrega.....	40
Tabla 13 Características del modelo para alternativa 2.....	41
Tabla 14 Valores Promedio de Irradiación Solar para sitios de análisis	44
Tabla 15 Características técnicas del colector solar.....	45
Tabla 16 Características del modelo para alternativa 3.....	46
Tabla 17 Modelos Bomba Calor Aire - Agua	50
Tabla 18 Características del modelo para alternativa 3.....	50
Tabla 19 Características del modelo de bomba de calor.....	52
Tabla 20 Características del modelo para alternativa 5.....	59
Tabla 21 Características del modelo para alternativa 1.....	71
Tabla 22 Cálculo de emisiones totales de CO ₂	75
Tabla 23 Costos de adquisición e instalación.....	78
Tabla 24 Análisis Económico para Implementación de Batería Térmica - Guayaquil.....	78
Tabla 25 Análisis Económico para Implementación de Batería Térmica - Quito	78

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

Los patrones de consumo y necesidades energéticas actuales, en combinación con incrementos en los precios de la energía, han provocado una corriente a nivel mundial para la elaboración de políticas y estrategias que generen fuentes de energía limpias, seguras y en armonía con el ambiente. Esto ha resultado en un incremento de la creación de tecnologías que no solo buscan satisfacer la demanda, sino transformar la forma de producir, transportar y consumir energía.

En este contexto, y considerando que el consumo de energía en el sector residencial representa una fracción importante del consumo nacional (alrededor del 14%), se investiga el diseño y potencial de ahorro energético de un calentador de agua residencial por bomba de calor integrado con almacenamiento térmico, operando simultáneamente para calentamiento y enfriamiento, concepto que se denomina Batería Térmica.

El enfoque del presente proyecto es analizar la factibilidad técnico-económica de implementar la tecnología de Batería Térmica como una alternativa eficiente para proporcionar servicios térmicos y reducir los consumos de energía e impactos ambientales asociados con sistemas convencionales para calentamiento de agua residencial.

Para comprobar esta hipótesis, se procede con el desarrollo de un modelo que permita determinar la validez técnica del sistema. El alcance del modelo incluye su operación bajo condiciones de estado estable, y los parámetros que afectan el comportamiento dinámico del sistema.

1.1. Objetivos del Estudio

Objetivos Generales:

- Desarrollar el modelo de un sistema para el calentamiento de agua residencial basado en la tecnología de bomba de calor con almacenamiento térmico.

Objetivos Específicos

- Identificar los principales factores, parámetros y variables que influyen en la eficiencia energética del sistema de calentamiento de agua.

- Comparar los consumos y costos de energía, así como las emisiones de CO₂ del sistema de Batería Térmica con aquellos estimados para las tecnologías a base de combustión y conversión de energía eléctrica.
- Comprobar si el sistema propuesto representa una alternativa eficiente para el reemplazo de tecnologías convencionales a base de combustión y conversión de energía eléctrica.

1.2. Antecedentes - La Problemática Energética

La provisión de un suministro adecuado, económico, ambientalmente seguro y confiable de energía, en conformidad con las necesidades de desarrollo sociales y económicas, es un elemento esencial para el desarrollo sostenible. Sin embargo, en la actualidad muchas regiones del mundo no cuentan con un suministro confiable o fácilmente asequible, lo que conduce a limitaciones en cobertura y servicios energéticos, dando como consecuencia restricciones en el crecimiento económico. Otro aspecto a tomar en cuenta es la degradación ambiental atribuible a la producción y uso de energía.

Antes estas conclusiones, la realidad obliga a adoptar acciones serias para evitar o reducir los impactos ambientales como consecuencia de un sistema energético basado en combustibles fósiles. El objetivo debe estar encaminado en transformar el sistema y la economía energética, con la pretensión última de fomentar un consumo y aprovechamiento energético responsable.

Esta sección revisa la situación energética nacional, indicando los riesgos que presenta la estructura actual de la matriz energética, con una gran dependencia de los combustibles fósiles.

1.3. Situación Energética en el Ecuador

Para cumplir con los objetivos y metas recogidos en el Plan Nacional del Buen Vivir (PNBV) 2009-2013, a partir del 2007 en el Ecuador se inició un período de cambio o transición en su matriz energética. Esta se encuentra impulsada por la modernización en la industria de refinación del petróleo y sus derivados, el desplazamiento de las plantas térmicas por centrales hidroeléctricas y la racionalización del consumo. Todo esto con el propósito de garantizar la seguridad y la sostenibilidad en el sector energético nacional.

La Figura 1.1 muestra la evolución de la matriz energética del Ecuador para los últimos cuarenta años. En la actualidad, la estructura de la matriz energética se caracteriza por dos fuentes predominantes: (1) el petróleo y sus derivados, y (2) la hidroelectricidad.

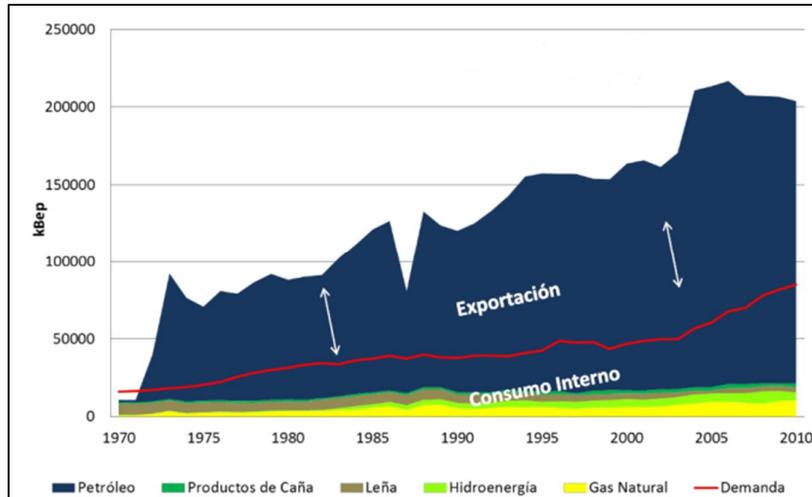


Figura 1.1 Evolución de la oferta energética por fuente de energía. Periodo 1970-2010 (MICSE, 2012)

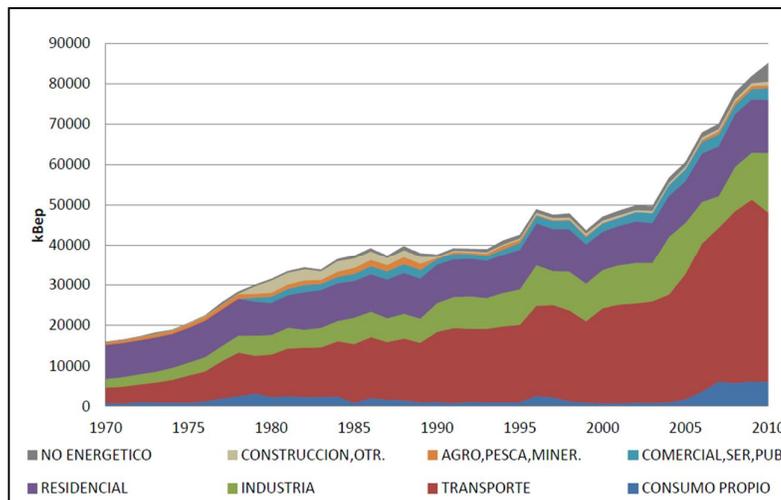
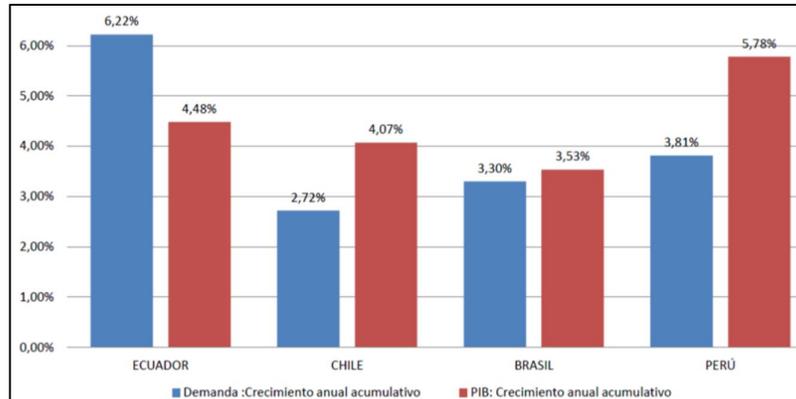


Figura 1.2 Evolución de la demanda energética por sector. Periodo 1970-2010 (MICSE, 2012)

La hidroelectricidad ha experimentado una tendencia hacia la alza en su participación desde 1985, aunque en menor intensidad. Esto como consecuencia de los compromisos estratégicos que ha asumido el Ecuador para el desarrollo de su potencial hidroeléctrico, especialmente después de las sequías que provocaron la implementación de apagones a finales de 2009 e inicios de 2010.



*PIB: Millones de USD al 2005

Figura 1.3 Tasas de crecimiento acumulativo Demanda vs PIB. Periodo 2000-2010 (MICSE, 2012)

La Figura 1.3 muestra un cuadro comparativo entre los crecimientos acumulativos de la demanda de energía primaria y el Producto Interno Bruto (PIB) de Ecuador, Brasil, Chile y Perú (estos tres últimos no imponen subsidios al uso de combustibles fósiles). Ecuador presenta un crecimiento anual de 6.22% en su consumo, superior a dos de las economías más grandes de Sudamérica, Brasil con 3.30% y Chile 2.72%. De este grupo Ecuador es el único que posee un crecimiento en su PIB inferior a su consumo energético (4.48%), lo que es una señal clara de un consumo ineficiente de energía.

En lo que respecta a intensidad energética, la Tabla 1 muestra los valores de la región para el año 2007. Esta revela que el Ecuador no solo posee una tendencia creciente en el consumo de energía por dólar de PIB, adicionalmente con 2.82 BEP/10³ USD es uno de los mayores valores para este indicador en América del Sur, Central y el Caribe, alcanzando casi el doble del promedio para la región en ese año.

Un tema que ha influenciado este comportamiento y que guarda relación con los gastos incurridos por el estado son las tarifas “políticas” o subsidios energéticos aplicados a los consumidores finales. Este tema ha sido sujeto a discusión en los últimos años dentro del ámbito político, económico y social, especialmente los subsidios empleados a los derivados del petróleo.

Tabla 1
Estadísticas Energéticas en América Latina, Central y El Caribe
(Gazzoni, 2010)

PAÍS	POBLACIÓN 10 ³ Inhab (A)	P/B 10 ³ USD (B)	CONSUMO FINAL DE ENERGÍA 10 ³ Boe (C)	PIB PER CÁPITA USD/Inhab (D/A)	CONSUMO FINAL PER CÁPITA Boe/Inhab (C/A)	INTENSIDAD ENERGÉTICA Boe 10 ³ USD (C/B)
ARGENTINA	38 971	340 315.95	361 886.41	8 732.54	9.29	1.06
BARBADOS	270	1 914.03	2 067.76	7 089.00	7.66	1.08
BOLIVIA	9 627	10 193.52	26 613.39	1 058.85	2.76	2.61
BRASIL	190 127	764 552.24	1 355 368.32	4 021.27	7.13	1.77
COLOMBIA	46 772	105 573.95	169 013.85	2 257.20	3.61	1.6
COSTA RICA	4 399	21 028.85	24 049.31	4 780.37	5.47	1.14
CUBA	11 240	56 347.54	69 005.45	5 013.13	6.14	1.22
CHILE	16 436	96 533.33	159 150.66	5 873.29	9.68	1.65
ECUADOR	13 408	21 319.73	60 132.19	1 590.08	4.48	2.82
EL SALVADOR	6 991	15 248.18	23 961.46	2 181.12	3.43	1.57
GRENADA	104	476.51	507.01	4 581.83	4.88	1.06
GUATEMALA	13 018	20 968.72	53 938.43	1 610.75	4.14	2.57
GUYANA	752	534.65	5 519.43	843.95	7.34	8.7
HAITI	9 317	3 648.03	17 238.40	391.55	1.85	4.73
HONDURAS	7 518	7 614.79	24 674.87	1 012.87	3.28	3.24
JAMAICA	2 662	8 123.96	28 843.09	3 051.83	10.84	3.55
MÉXICO	107 537	665 522.24	800 331.46	6 188.77	7.44	1.2
NICARAGUA	5 594	4 772.22	18 570.15	853.10	3.32	3.89
PANAMÁ	3 284	15 474.40	22 809.06	4 712.06	6.95	1.47
PARAGUAY	6 365	8 391.03	26 674.34	1 318.31	4.19	3.18
PERU	28 349	70 661.88	86 611.98	2 492.57	3.06	1.23
REP. DOMINICANA	9 240	31 120.65	36 935.43	3 368.04	4.00	1.19
SURINAME	453	1 067.04	4 495.53	2 355.50	9.92	4.21
TRINIDAD Y TOBAGO	1 311	13 800.60	79 014.96	10 526.77	12.77	5.73
URUGUAY	3 478	22 504.08	18 390.02	6 470.41	5.29	0.82
VENEZUELA	27 031	146 638.03	326 320.32	5 424.81	12.07	2.23
TOTAL	564 254	2 454 446.15	3 802 123.27			
PROMEDIO REGIONAL				4 349.90	6.74	1.55

Por las razones señaladas, los subsidios energéticos existentes en el Ecuador explican, en parte, el alto crecimiento del consumo total de energía.

Ante lo expresado, cualquier estrategia energética que aspire preservar recursos debe comenzar por la reducción del consumo, detectando aquellos sectores o servicios que presenten un mayor grado de intensidad energética. Por lo dicho, las principales medidas de eficiencia energética deberían estar enfocadas en optimizar o reducir el consumo de los sectores transporte y residencial, pues representan cerca del 65% del consumo energético nacional.

La Figura 1.5 expone el diagrama de uso final de energía primaria en Ecuador para el año 2011, el cual complementa la figura 1.2. Al enfocar la atención en el sector residencial, se observa que existe una fuerte dependencia hacia los productos refinados y la electricidad para la satisfacción de sus necesidades, ambas fuentes sujetas a subsidios gubernamentales.

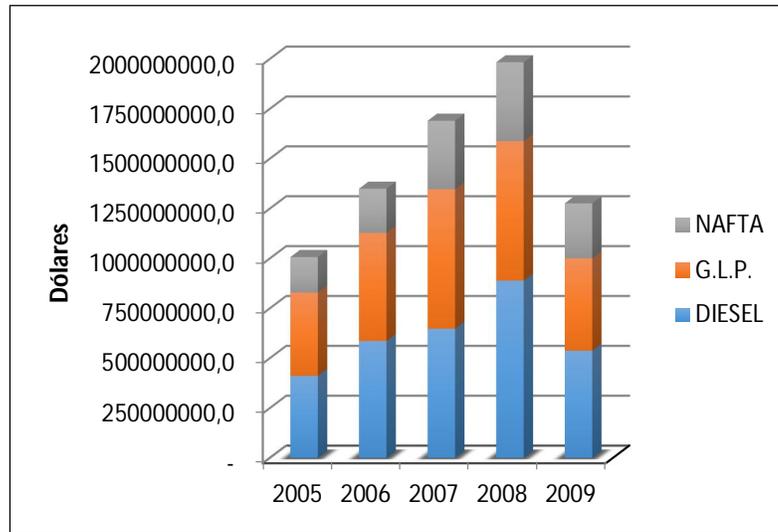


Figura 1.4 Subsidios a los combustibles fósiles a nivel nacional. Período 2005-2009 (MCPEC, 2010)

En resumen, sólo a partir de un correcto diagnóstico energético de este sector, mediante la revisión de estadísticas energéticas; se podrán diseñar adecuadas y eficaces políticas de diversificación energética. La siguiente sección profundiza sobre los patrones existentes en el sector residencial en lo referente a usos de energía.

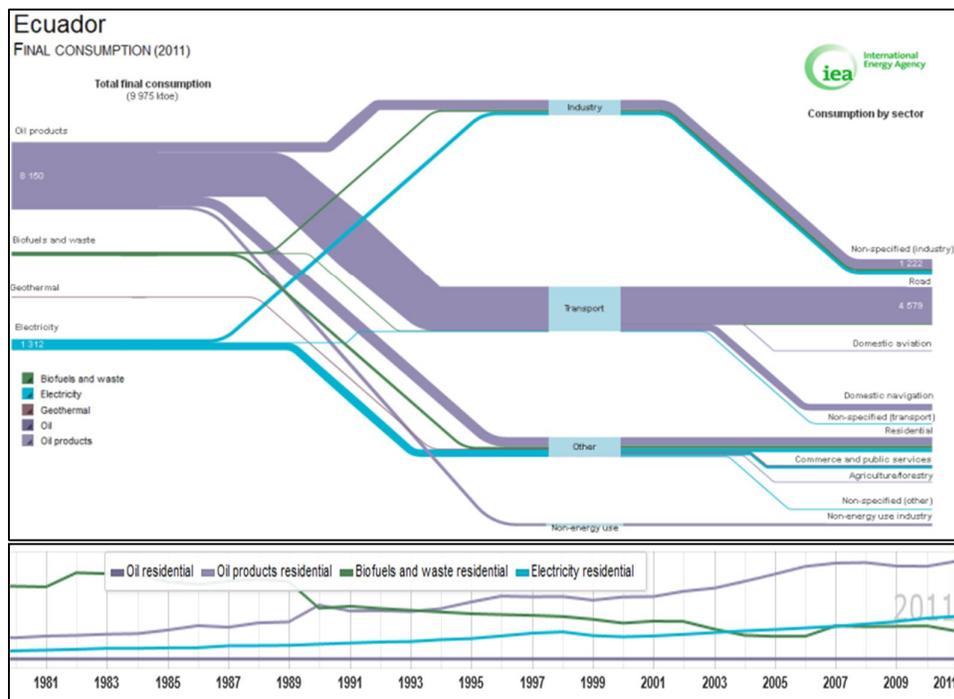
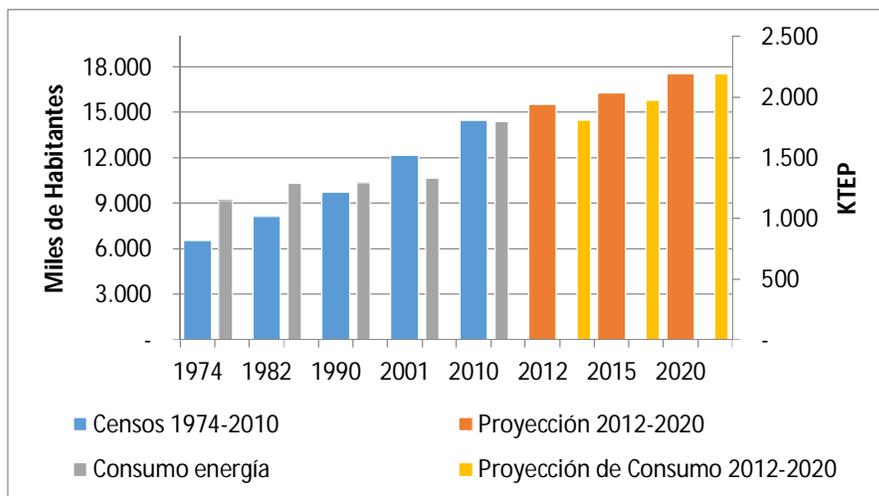


Figura 1.5 Uso final de energía primaria por sector en el Ecuador. Año 2011 (IEA, 2011)

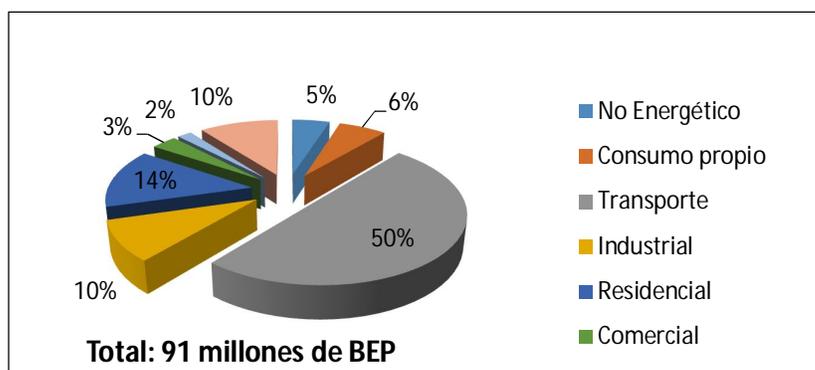


**Figura 1.6 Población Total y Proyecciones.
Periodo 1950-2020 (INEC, 2013).**

La Energía en el Sector Residencial del Ecuador

El sector residencial en los últimos años ha recibido importante consideración en la creación de programas de eficiencia energética, esto tomando en cuenta su participación en el consumo total de energía y, en especial, debido a su enorme potencial para el ahorro energético.

El consumo de energía en el sector residencial, a pesar de presentar una tendencia estable en los últimos años (Ver Figura 1.2), se encuentra solo por debajo del sector transporte en el consumo total de energía primaria (Ver Figura 1.7). A esto se agrega el crecimiento constante en el consumo de electricidad y productos refinados que se observa en la parte inferior de la Figura 1.5; tendencia que obedece al desarrollo económico y modernización que propició la sustitución de biomasa (leña) por combustibles como kerosene y GLP.



**Figura 1.7 Consumo de energía por sectores
(ARCH & CONELEC, 2011)**

En el Ecuador, se estima que alrededor del 25% del uso total de energía en los hogares proviene de la electricidad (Figura 1.8), 58% de combustibles refinados (principalmente GLP) y el 17% de Biomasa (leña).

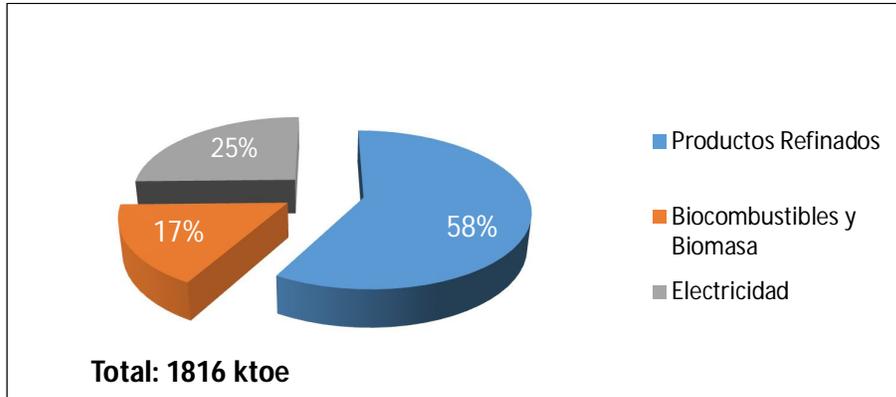


Figura 1.8 Uso de energía por tipo de fuente - Sector residencial (IEA, 2011)

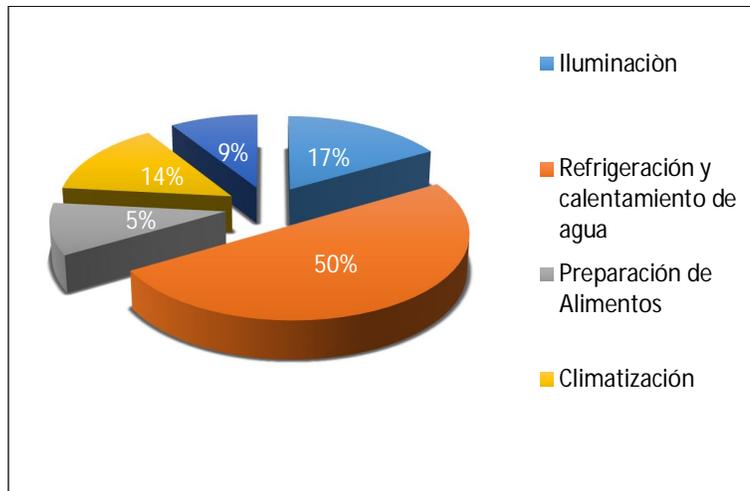


Figura 1.9 Participación de los usos finales en el consumo de energía - Región Costa (INECEL, 1994)

Dentro del sector residencial, el uso de energía para la producción de agua caliente representa en general una fracción importante del consumo total de energía, especialmente para la región Sierra. El desaparecido INECEL¹ (Instituto Nacional de Electricidad) en su “*Programa de la administración de la demanda y uso racional de la energía eléctrica en el Ecuador - Informe Final*” (1994), presentó un estudio donde detalla los usos finales de energía a nivel residencial. Los resultados se presentan en las figuras 1.9, 1.10 y 1.11. Esta información permite concluir que el consumo de energía por calentamiento de

¹ Reemplazado en 1998 por el Consejo Nacional de Electricidad – CONELEC. Decreto Ejecutivo No.368 de 3 de diciembre de 1996. R.O. No. 182 de 4 de diciembre de 1996

agua es relevante fundamentalmente en la región sierra donde corresponde al tercer uso más importante con el 7%.

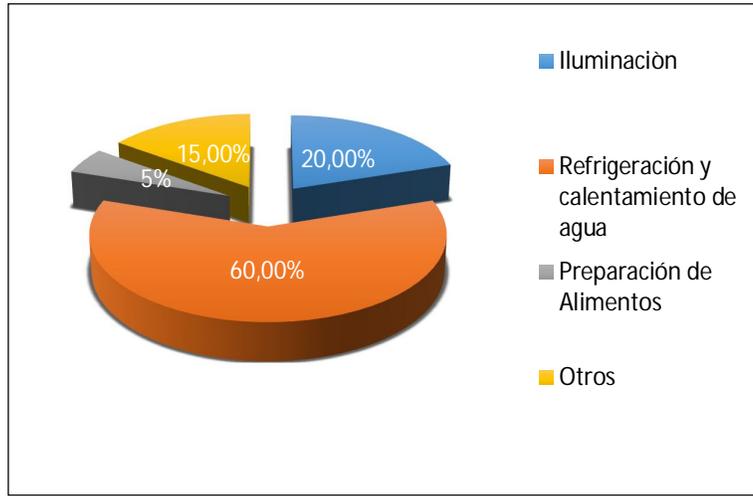


Figura 1.10 Participación de los usos finales en el consumo de energía - Región Sierra (INECEL, 1994)

La mayoría de calentadores de agua en el sector residencial corresponden a sistemas que generan calor útil mediante la combustión de combustibles de origen fósil (principalmente GLP) o conversión de electricidad, procesos que no son convenientes desde un punto de vista de utilización eficiente de energía (Hepbasli & Kalinci, 2008). De acuerdo a las estadísticas de comercio exterior proporcionadas por el Banco Central del Ecuador (2000-2013) y la Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos de los Hogares Urbanos y Rurales (2011-2012) ejecutada por el INEC; se estima que en Ecuador existen unos 350 000 sistemas de agua caliente sanitaria operando con GLP.

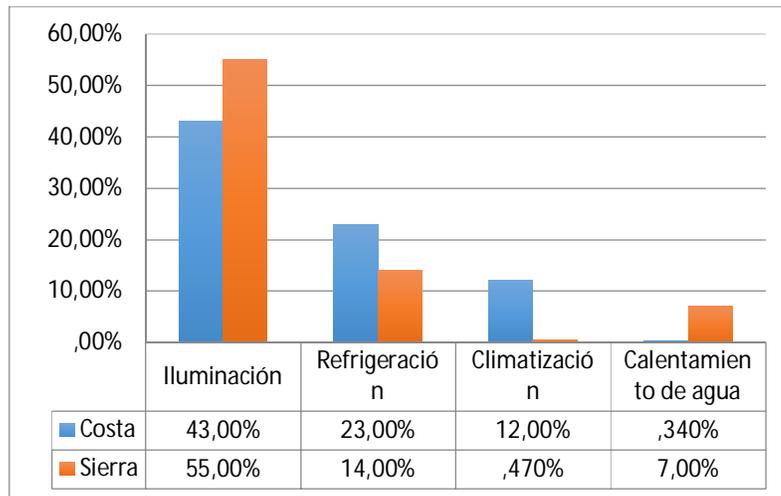


Figura 1.11 Demanda Eléctrica - Sector Residencial

Para comprender la naturaleza inequitativa e ineficiente inherente a la gestión de subsidios energéticos en el Ecuador, basta revisar algunas cifras del consumo y distribución del subsidio al GLP en el sector residencial (Tabla 2 y Tabla 3); tomadas como referencia a partir de la información desarrollada en la Encuesta de Condiciones de Vida – Quinta Ronda (2005 – 2006), llevada a cabo por el INEC.

Tabla 2
Distribución del subsidio al GLP en Ecuador (Castillo, 2007)

Subsidio del Gas de uso Doméstico 2008	Millones de USD	Distribución porcentual del uso
Uso Doméstico	434.7	59%
Contrabando	162.1	22%
Industria	81.0	11%
Automotores	58.9	8%
Total	736.8	100%

Tabla 3
Distribución del subsidio al GLP por quintiles de pobreza (Castillo, 2007)

Distribución de Subsidio del Gas de uso Doméstico	Millones de USD	Distribución porcentual del uso
Quintil 1 (20% más pobre)	34.8	8%
Quintil 2 (20% pobre)	60.9	14%
Quintil 3 (20% clase media)	78.2	18%
Quintil 4 (20% clase media)	104.3	24%
Quintil 5 (20% más rico)	156.5	26%
Total Gas Uso Doméstico	434.7	100%

Se presenta un escenario donde el subsidio efectivo, es decir, aquel que alcanza a la población definida como “pobre” (40%), apenas llega a USD 95.6 millones, representando el 22% del total de los USD 434.7 millones asignados para el sector doméstico.

El escenario para el subsidio del Diesel es mucho más crítico, sobre todo porque parte de su consumo es destinado al sector eléctrico para generación de energía; a esto se le suma el hecho que ya existen subsidios en la tarifa del servicio eléctrico. Esta gestión energética ha formado malos hábitos de consumo y el empleo de equipos o electrodomésticos de baja eficiencia.

Todas estas circunstancias inciden, en mayor o en menor magnitud, en los niveles de eficiencia del gasto público. Es por esto, y ante los próximos cambios que se aplicarán en la matriz productiva nacional, así como diferentes iniciativas gubernamentales como como el “*Programa de Eficiencia Energética para cocción por inducción y calentamiento de agua con electricidad*” que este trabajo busca incentivar una conversión energética más eficiente en los servicios de calentamiento de agua sanitaria; y además

reducir el consumo de combustibles fósiles en el sector residencial de forma que se habilite el direccionamiento de recursos hacia otras alternativas de inversión pública.

Los calentadores de agua con bomba de calor son una tecnología prometedora para aplicaciones residenciales debido a su superior eficiencia en comparación a otros sistemas; sin embargo han experimentado un limitado éxito en el mercado debido fundamentalmente a una elevada inversión inicial.

En este trabajo se propone el uso de calentadores de agua con bomba de calor para aplicaciones residenciales como punto de partida para disminuir el consumo energético de las familias que utilizan sistemas de calentamiento de agua sanitaria o climatización, logrando al mismo tiempo una reducción en la demanda de GLP para uso doméstico y los picos de energía eléctrica atribuibles a esta actividad.

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA DE DISEÑO

Se expone a continuación, de manera general, las diferentes alternativas de sistemas para calentamiento de agua, las estrategias para la estimación de consumos de agua caliente y el rendimiento del sistema durante su operación normal. Se examinan factores relacionados con el consumo de energía con el fin de obtener una comprensión más clara de la naturaleza del uso de energía para aplicaciones domésticas.

Esta sección expone también los factores clave que afectan el consumo de energía por calentamiento de agua de tal manera que la influencia del sistema empleado y su uso son caracterizados y cuantificados por separado. Esto significa que la influencia de la eficiencia del sistema, las condiciones ambientales y la interacción del usuario son examinadas por separado.

2.1. Consumo de agua caliente en el sector residencial

El agua caliente tiene una amplia variedad de aplicaciones, su utilización se la observa en procesos industriales, equipamiento médico, hoteles, edificios comerciales, entre otros. En el sector residencial la situación no es diferente; usualmente se observa que el consumo es comparable con la energía empleada para climatización o iluminación. La Figura 2.1 muestra la distribución del consumo de agua caliente residencial por cápita para algunas regiones del planeta.

2.1.1. Factores que afectan el consumo de agua caliente residencial

El consumo de energía en un calentador de agua está en función de las características del sistema (eficiencia), la interacción del usuario con el sistema (patrones de consumo de agua caliente) y, en menor medida, de las condiciones ambientales durante el funcionamiento (temperatura del aire y del agua de suministro).

Además, es evidente que una serie de factores demográficos afectará el consumo de agua caliente. El tamaño del hogar es un factor importante al igual que la edad sus miembros. El tamaño medio de los hogares se calculó en 2.57 personas utilizando datos de la Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos de los Hogares Urbanos y Rurales (2011-2012).

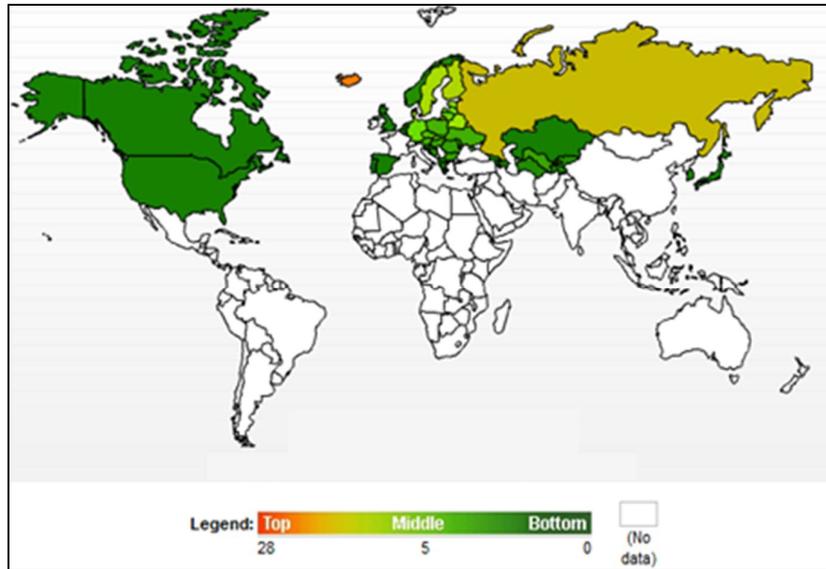


Figura 2.1 Consumo de agua caliente residencial por cápita (UNSD, 2005)

La interacción de los miembros del hogar con la infraestructura física, por ejemplo, a través de la frecuencia de duchas, caudales y su duración, así como la frecuencia del uso de equipamiento como lavadoras y el uso lavavajillas son otros factores que afectan el consumo de energía.

También existen influencias secundarias de naturaleza demográfica y geográfica en la selección de un calentador de agua (disponibilidad o asequibilidad a recursos, ej: gas). Residencias grandes tienden a utilizar calentadores de mayor capacidad, por otro lado, ciertas viviendas poseen sistemas de bajo costo de adquisición, pero que pueden tener altos costos de operación; adicionalmente suelen existir restricciones en la elección del calentador de agua (limitaciones de espacio o consideraciones de seguridad).

Los factores que afectan el consumo de energía que se requiere para la producción de agua caliente residencial incluyen también el nivel de ingreso familiar, antecedentes culturales, el tipo de combustible utilizado, la temperatura de la red pública de agua potable, temperatura de consigna, y cualquier tipo de pérdida de energía.

La Tabla 4 muestra usos referenciales de agua caliente en una residencia típica para diferentes actividades y para diferentes categorías de equipamiento.

Tabla 4
Uso residencial típico de agua caliente (ASHRAE, 2011)

Uso	Alto Flujo, Litros / Tarea	Bajo Flujo, Litros / Tarea	E. Ahorradores, Litros / Tarea
Preparación de alimentos	19	11	11
Lavavajillas manual	15	15	11
Lavavajillas automático	57	57	11 a 38
Lavadora de ropa	121	80	19 a 57
Ducha o bañera	76	57	38 a 57
Lavado de manos	15	8	4 a 8

2.1.2. Requerimientos de temperatura para calentamiento de agua en el sector residencial

Otro factor a tener en cuenta al dimensionar los calentadores de agua es la temperatura de consigna. Actualmente, los fabricantes envían los calentadores de agua residenciales con una recomendación de que el punto de referencia inicial sea aproximadamente 50°C para minimizar la posibilidad de quemaduras e incrustaciones. Puntos de consigna menores pueden disminuir las pérdidas por modo de espera² y aumentar la eficiencia del calentador y la capacidad de recuperación, pero también pueden reducir la cantidad de agua caliente disponible. La Figura 2.2 muestra los tiempos de exposición versus temperaturas de agua que producen quemaduras de primer (dolor, daño menor en tejido) y tercer grado (daño permanente) en adultos.

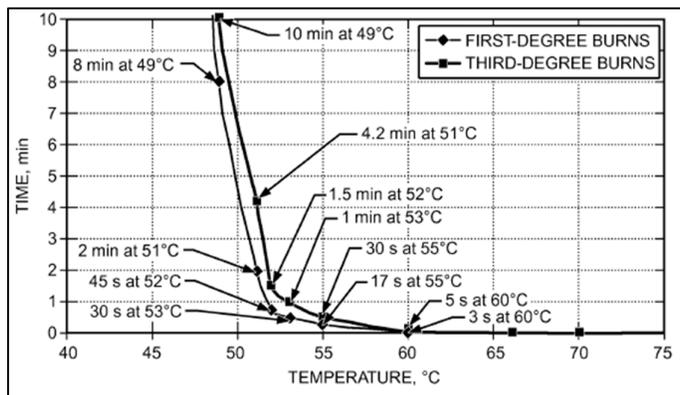


Figura 2.2 Desarrollo de quemaduras en función de la temperatura de agua (ASHRAE, 2011)

² Las pérdidas de calor por modo de espera se refieren a la energía cedida a través de las paredes del tanque de acumulación mientras se ejecuta el calentamiento de agua.

2.1.3. Patrones de consumo de agua caliente en el sector residencial

La mayor dificultad que se presenta en el diseño de sistemas para calentamiento de agua proviene de la incertidumbre acerca de las cargas de diseño de agua caliente. El conocimiento de los patrones de consumo es importante para comprender el uso de energía a nivel residencial, sea para establecer una línea base o para el análisis energético. En este apartado se revisa la literatura pertinente sobre el consumo de energía para esta aplicación, específicamente los que refiere al uso de agua caliente.

En los calentadores domésticos, el consumo de agua es la más grande e importante influencia en el consumo energético para este servicio. Sin embargo, la caracterización de los patrones de consumo es un elemento pobremente desarrollado, encontrándose escasos estudios o investigaciones que permitan desarrollar un modelo general y preciso de este parámetro

Mediciones sobre el consumo de agua caliente han dado paso a la creación de modelos desarrollados por diferentes centros de investigación, organismos gubernamentales o especializados con el propósito de facilitar una metodología o herramienta para analizar, evaluar y valorizar el rendimiento de sistemas calentadores de agua. Parte de la información de las cargas térmicas se basan en pruebas de campo a pequeña escala combinada con análisis estadísticos para estimar la demanda en función del número de puntos de uso final, número de personas, entre otros. Lo más preocupante es el hecho de que la mayoría de los datos de esos estudios fueron para dispositivos que utilizan agua a caudales muy superiores a los equipos de bajo consumo modernos. El uso de esta información por lo general resulta en un sistema de calentamiento de agua que sirve adecuadamente las cargas, pero a menudo resulta en un sobredimensionamiento considerable.

En función de la revisión de literatura y estudios sobre uso de energía en residencias, específicamente en lo que se refiere a patrones o perfiles típicos de consumo de agua caliente y el análisis de sus premisas y supuestos, se identifica a continuación la serie de patrones que mejor se ajustan al comportamiento esperado por una residencia unifamiliar típica.

American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers – ASHRAE

En aplicaciones residenciales, los patrones de consumo utilizados con mayor frecuencia son los desarrollados por la ASHRAE. Estos se

presentan en (1) el “ASHRAE Handbook – HVAC Applications” (Manual de Aplicaciones ASHRAE) y (2) en el Estándar ANSI/ASHRAE 90.2 “Energy Efficient Design of Low Rise Residential Buildings”. Para el presente trabajo se emplea las ediciones 2011 y 2007 del Manual de Aplicaciones y del Estándar 90.2 respectivamente.

La Figura 2.3 muestra los perfiles de consumo de agua caliente del Manual de Aplicaciones ASHRAE para condiciones promedio en base a una escala de tiempo de 1 hora. La construcción de estos perfiles de consumo fue desarrollada a partir de las investigaciones de Perlman y Mills (1985), quienes compilaron y analizaron muestras estadísticas para proporcionar un perfil de consumo de agua caliente por hora.

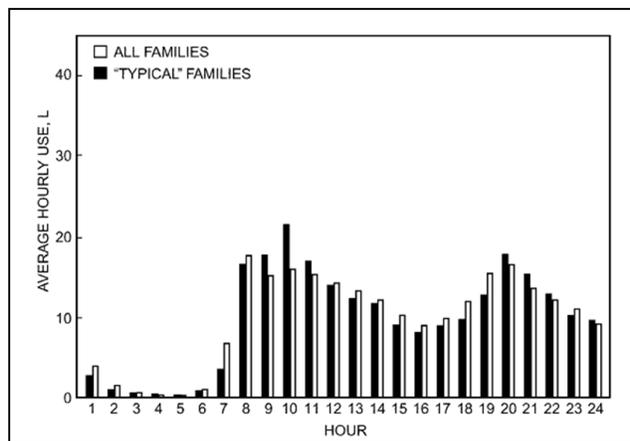


Figura 2.3 Consumo Residencial Promedio de Agua Caliente (ASHRAE, 2011)

Solar Rating and Certification Corporation – SRCC

La Corporación Solar para la Calificación y Certificación (SRCC, por sus siglas en inglés) proporciona un sistema de calificación para calentadores termo solares bajo su programa de certificación OG- 300. Para evaluar el desempeño anual de un sistema, la SRCC emplea diferentes parámetros de rendimiento, en conjunto con una simulación anual utilizando TRNSYS. Para esto emplea en su metodología un patrón de consumo de agua caliente, en con base horaria.

Estudios Adicionales

Otros estudios aportan información relevante sobre consumos domésticos de agua caliente, tal es el caso de Becker y Stogsdill (1990), quienes compilaron datos sobre consumo reunidos en Canadá y, principalmente, Estados Unidos. Dichos conjuntos de datos contiene mediciones de uso

de agua caliente para periodos de un año o más de duración, de los cuales se reporta el valor promedio por hora.

Bouchelle y Parker (2000) reportan también un patrón de demanda de agua caliente a partir de un estudio de muestreo de 204 residencias en Florida (E.E.U.U.).

De esta forma, las fuentes principales para perfiles de consumo de agua caliente son el Manual de Aplicaciones de ASHRAE (Perlman) con su perfil típico; Becker (1990), el Estándar ASHRAE 90.2 (2007); la SRCC; y Bouchelle (2000).

Previo a la selección de cualquiera de los perfiles anteriormente mencionados, vale la pena tener en cuenta que el consumo o demanda total diario no es necesariamente el mismo para cada uno de ellos. Debido a esto, y para facilitar una comparación directa entre perfiles, estos deben ser normalizados. Esto se consigue dividiendo el consumo o la demanda de cada hora por el valor total diario. Esta operación proporciona un perfil donde cada hora representa una fracción del consumo o demanda total diario; de esta forma se reduce cada perfil a un conjunto de datos directamente comparables.

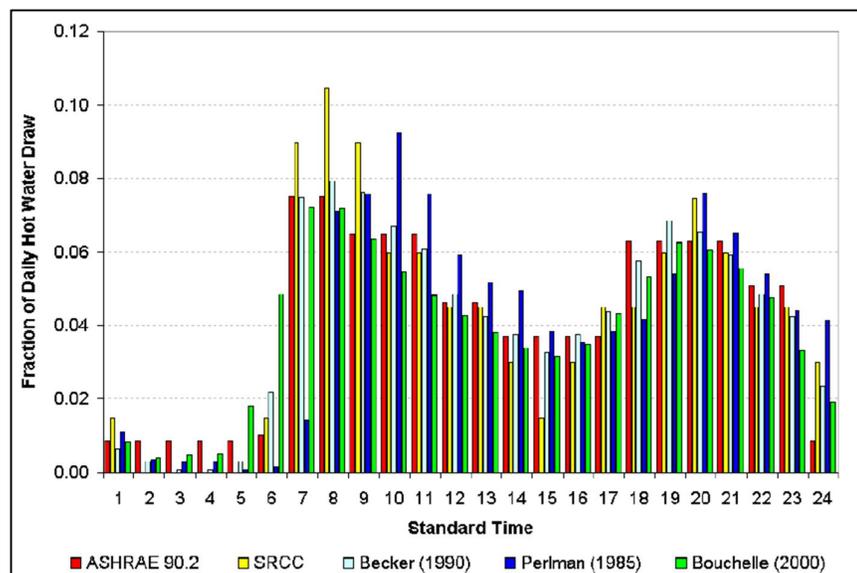


Figura 2.4 Histograma de Perfiles de Agua Caliente - Fracción de Consumo o Demanda Total Diaria (Failey & Parker, 2004).

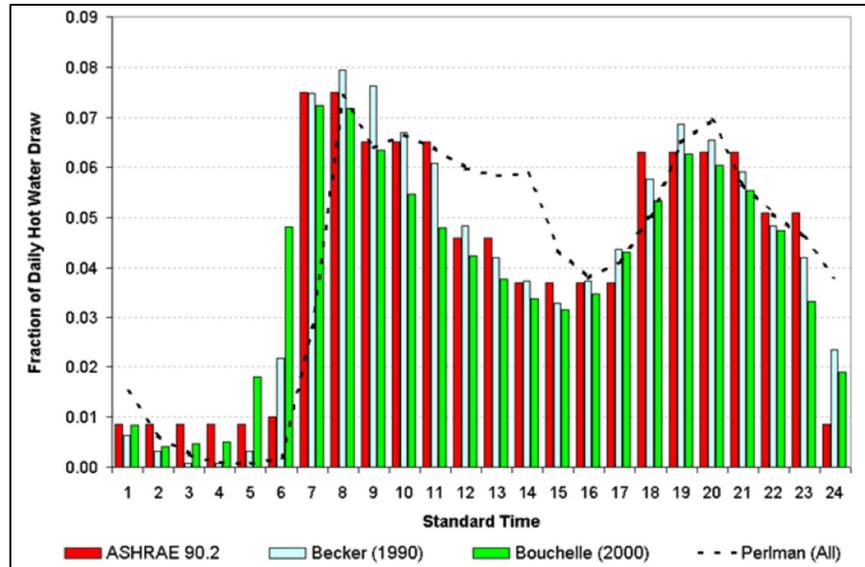


Figura 2.5 Comparación de Perfiles ASHRAE 90.2, Becker, Bouchelle y Perlman (All families) - Fracción de Consumo o Demanda Total Diaria (Fairey & Parker, 2004)

La Figura 2.4 muestra una comparación normalizada de estos perfiles (la serie Perlman en la gráfica hace referencia al perfil denominado "Typical"). Una rápida mirada muestra una marcada diferencia entre los perfiles de SRCC, Perlman y el resto de datos. Al separar estos datos del histograma original y reemplazar el perfil de Perlman "Typical" por el conjunto de datos definidos como "All families", se obtiene la Figura 2.5 (Fairey & Parker, 2004). Esta gráfica acentúa la similitud general que existe entre los distintos perfiles, excepto por los datos de Perlman, que muestran ser inconsistentes.

Un análisis más profundo de los perfiles se observa en la Figura 2.6 (Fairey & Parker, 2004), esta demuestra que existe una semejanza significativa entre los datos de Becker (1990) y el perfil especificado por el Estándar ASHRAE 90.2. La gráfica también resalta la poca relación entre el perfil SRCC y los dos perfiles antes citados.

Se concluye a partir de la información revisada, que el perfil de consumo de agua caliente más apropiado es el establecido por el Estándar ASHRAE 90.2, pues es consistente con la mayoría de perfiles estudiados y forma parte de una norma sancionada por la ANSI.

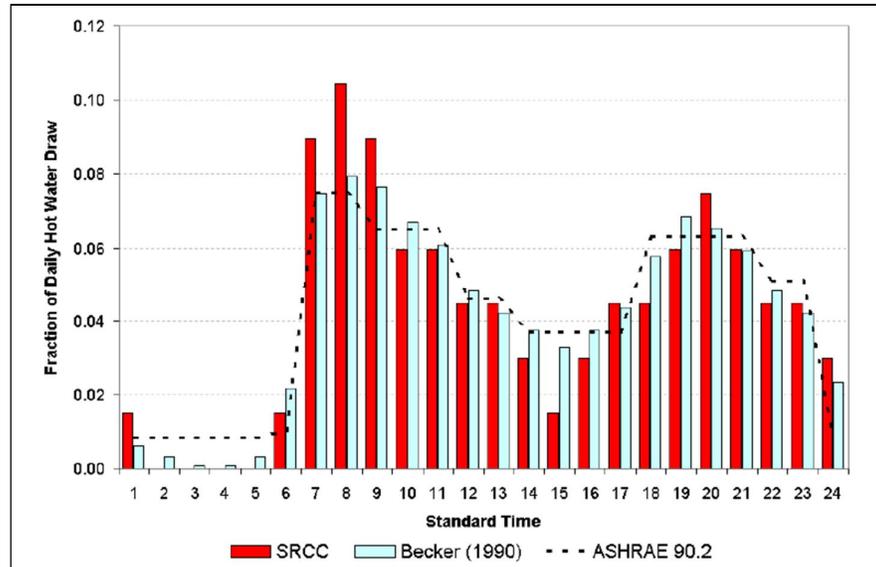


Figura 2.6 Comparación entre Perfiles SRCC, Becker y ASHRAE 90.2 - Fracción de Consumo o Demanda Total Diaria (Fairey & Parker, 2004)

2.1.4. Consumo diario de agua caliente

Una vez definido el perfil de consumo a emplearse en la simulación energética, es necesario determinar la carga térmica total por agua caliente que servirá como punto de partida para el cálculo del consumo de energía total del sistema. ASHRAE en su estándar 90.2 *“Energy – Efficient Design of Low – Rise Residential Building”* sección 8.9.3 (2007) define un procedimiento para la estimación del consumo promedio diario de agua caliente en una vivienda. Este se define a partir de la expresión:

$$AGPD = [CW + SPA + B][NP] \quad (1)$$

Dónde:

$AGPD \equiv$ Consumo promedio diario de agua caliente en galones.

$CW \equiv$ 2.0 gal/día por persona si se emplea lavadora, caso contrario cero.

$SPA \equiv$ 1.25 gal/día por persona si se emplea una tina, caso contrario cero.

$B \equiv$ 13.2 gal/día por persona

$NP \equiv$ Número de personas en la vivienda.

Para la estimación del consumo de agua caliente diario se asume la presencia de una ducha o tina en todas las viviendas que poseen calentadores de agua.

El tamaño medio de un hogar en el Ecuador se estimó igual a 2,57 personas para el año 2002, aproximando a 3 personas este parámetro, el consumo diario de acuerdo a la ecuación (1) es igual a:

$$AGPD = \left[\frac{1,25 \frac{gal}{día} + 13,2 \frac{gal}{día}}{persona} \right] [3 personas]$$

$$AGPD = 43,35 \frac{gal}{día} \cong 44 \frac{gal}{día}$$

Finalmente el valor encontrado de AGPD permite definir el perfil de consumo de agua caliente, el cual se muestra en la Figura 2.7.

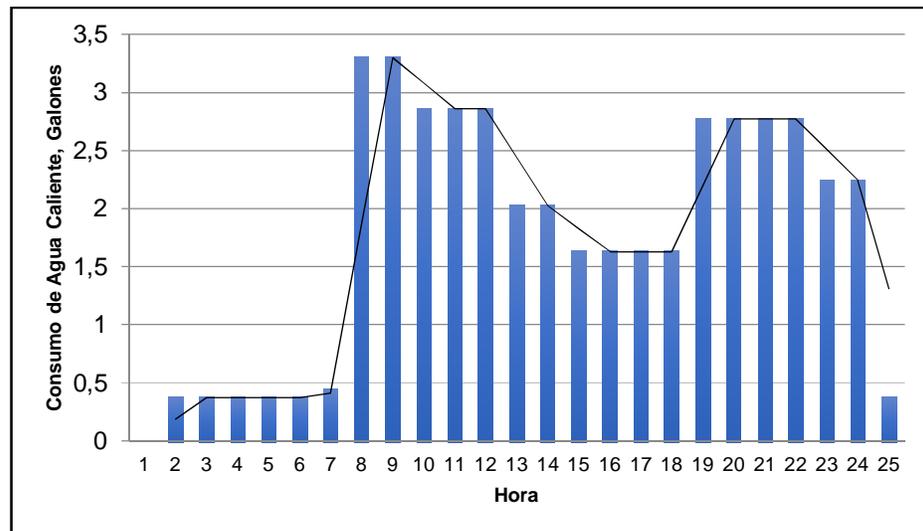


Figura 2.7 Consumo Horario de Agua Caliente Residencial.

2.1.5. Consideraciones de Diseño

Tanque de Almacenamiento.

Para calentadores de agua con almacenamiento térmico, se asume que el 60 a 80% del agua almacenada representa volumen útil antes que la dilución por agua fría de renovación disminuya la temperatura por debajo de un nivel aceptable (ASHRAE, 2011). El volumen de máximo de agua caliente puede calcularse entonces a partir de la siguiente expresión:

$$V_t = Rd + MS_t \quad (2)$$

Dónde:

$V_t \equiv$ Agua caliente disponible, Litros.

R \equiv Tasa de recuperación a la temperatura de consigna, L/s
 d \equiv Duración de la demanda pico de agua caliente, segundos.
 M \equiv Radio entre volumen disponible y volumen de almacenamiento.
 S_t \equiv Volumen del tanque de almacenamiento, Litros.

Tabla 5
Demanda de agua caliente y lineamientos de uso
Litros por persona a 49°C en punto de uso final
(ASHRAE, 2011)

Consumo	Minutos Pico						Máximo Diario	Promedio diario
	5	15	30	60	120	180		
Bajo	1.5	3.8	6.4	10.6	17.0	23.1	76	53
Medio	2.6	6.4	11.0	18.2	30.3	41.6	185	114
Alta	4.5	11.4	19.3	32.2	54.9	71.9	340	204

Para determinar la demanda pico de agua caliente, la Tabla 5 muestra valores de consumo pico de agua caliente para diferentes duraciones. Se presentan tres categorías de uso (bajo, medio y alto) en lugar de un valor específico, esta información se emplea para el dimensionamiento de calentadores de agua, permitiendo una fácil combinación entre la tasa de calentamiento y el volumen de almacenamiento para un perfil de carga dado.

Para una vivienda unifamiliar en Ecuador se estima una demanda pico para un tiempo de 60 minutos de duración, lo que corresponde a un valor de 18.2 L por persona. Esto se alinea al “First- hour rating (FHR)” definido por el Departamento de Energía de E.E.U.U. (DOE, por sus siglas en inglés), el cual representa la máxima cantidad de agua caliente que un calentador puede proveer durante 1 hora de operación bajo condiciones específicas de prueba.

Es importante tomar en cuenta que en la realidad, los consumos no son constantes para periodos de duración más allá de 15 minutos, y que debido al empleo de un tanque de almacenamiento, cierta capacidad de calentamiento se retiene. De esta forma, se justifica la elección de un tiempo de duración de 1 hora, pues aunque el uso de agua corresponde a periodos considerablemente menores, el calentador debe proveer únicamente la energía adicional después de agotarse el almacenamiento.

Para propósitos de estimación, y debido a la falta de información y estadísticas en lo que respecta a equipamiento residencial, se asume que esta demanda pico es producida por 2 personas dentro la vivienda. Con

esta información, la capacidad de calentamiento requerida por el calentador se calcula a partir de la expresión:

$$Q = \frac{\dot{m}c_p (T_{hot,out} - T_{hot,in})}{\eta_{wh}} \quad (3)$$

Dónde:

$Q \equiv$ Capacidad de calentamiento, kW

$\dot{m} \equiv$ Flujo másico de agua, kg/s

$c_p \equiv$ Calor específico del agua, 4.186 kJ/(kg.K)

$T_{hot,in} \equiv$ Temperatura del agua que entra a la unidad, °C

$T_{hot,out} \equiv$ Temperatura del agua que sale de la unidad, °C

$\eta_{wh} \equiv$ Eficiencia del calentador de agua.

Secuencia de Control

El mecanismo de control empleado para un calentador de agua consiste generalmente de un controlador on/off a través de un termostato diferencial, el cual provee una señal del control que regula la operación del sistema. El controlador diferencial genera una función de control la cual puede tener valores de 1 o 0. El valor de la señal de control se escoge como función de la diferencia entre la temperatura de consigna T_{set} y la temperatura promedio del tanque T_{avg} , este valor se compara con dos parámetros ΔT_L y ΔT_H . Matemáticamente, la función de control se expresa mediante:

- Controlador previamente encendido:

$$\gamma_i = 1 \text{ y } \Delta T_L \leq (T_{set} - T_{avg}), \gamma_o = 1$$

$$\gamma_i = 1 \text{ y } \Delta T_L > (T_{set} - T_{avg}), \gamma_o = 0$$

- Controlador previamente apagado:

$$\gamma_i = 0 \text{ y } \Delta T_H \leq (T_{set} - T_{avg}), \gamma_o = 1$$

$$\gamma_i = 0 \text{ y } \Delta T_H > (T_{set} - T_{avg}), \gamma_o = 0$$

Dónde:

$\Delta T_H \equiv$ Diferencia de temperatura superior, °C.

$\Delta T_L \equiv$ Diferencia de temperatura inferior, °C.

$T_{set} \equiv$ Temperatura de Consigna, 50 °C.

$T_{avg} \equiv$ Temperatura promedio del tanque, °C.

$\gamma_i \equiv$ Entrada función de control.
 $\gamma_o \equiv$ Salida función de control.

La función de control se muestra gráficamente en la Figura 2.8 (Solar Energy Laboratory, 2012):

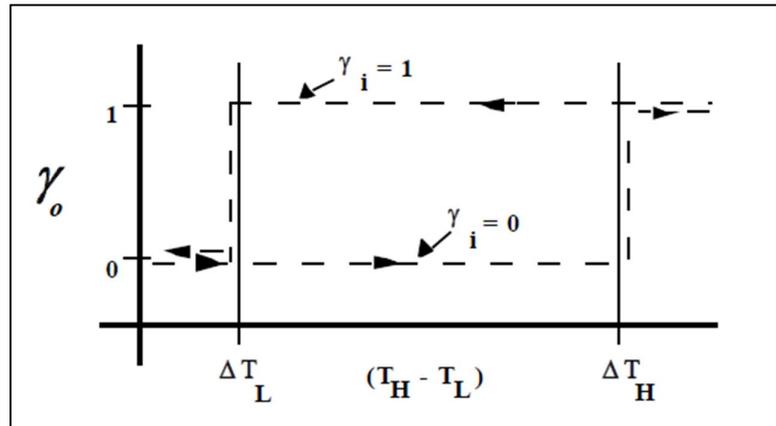


Figura 2.8 Función de Control

Debido a consideraciones de seguridad, una temperatura máxima T_{max} se incluye en el controlador. Sin importar las condiciones de ΔT_H o ΔT_L , la función de control dará como resultado cero si el valor de T_{max} es excedido.

2.2. Sistemas para Servicio de Agua Caliente Residencial

De acuerdo a lo definido por la ASHRAE (ASHRAE, 2011), un sistema para calentamiento de agua está conformado por (1) una o más fuentes de energía térmica, (2) un equipo de transferencia de calor, (3) un sistema de distribución y (4) terminales para uso de agua caliente.

Fuente de energía térmica: Puede emplearse (1) combustión; (2) conversión de energía eléctrica; (3) aprovechamiento del recurso solar (térmico o fotovoltaico); (4) potencial geotérmico; (5) aire ambiental y (6) procesos de recuperación de calor (gases de combustión, ciclos de refrigeración o ventilación).

Equipo de transferencia de calor: Puede ser de tipo directo, indirecto, o una combinación ambos. Para los dispositivos directos, el calor proveniente de la fuente de energía se aplica dentro de la propia unidad calentadora de agua. En el tipo indirecto, la energía térmica se transfiere a partir de fuentes externas (colectores solares; procesos de cogeneración; refrigeración o recuperación de calor), para luego ser depositada en el agua.

Sistema de Distribución: Se encarga del transporte del agua caliente producida a los terminales de uso.

Terminales de uso: Son los dispositivos o equipos que consumen agua caliente. Dependiendo de una serie de factores, como el tipo de actividad del edificio, su aplicación o preferencia individual, el uso de agua caliente puede ser de flujo variable, flujo constante, y sin flujo durante ciertos periodos.

2.2.1. Tipos de Calentadores de Agua Residenciales

Los sistemas para servicios de agua caliente se clasifican en:

- a) Sistemas de Acumulación.
- b) Sistemas Instantáneos.

En los **sistemas de acumulación**, el agua proveniente de la red pública se calienta, produciendo agua caliente que luego es arrastrada a un tanque de almacenamiento aislado térmicamente donde es depositada hasta su distribución para su uso final. Cuando existe una demanda de agua caliente, agua fría de reposición entra en el tanque de almacenamiento; donde procede un recalentamiento hasta alcanzar la temperatura de consigna, incluso si el flujo de agua caliente ha cesado. Generalmente se encuentran en un rango de capacidades entre 20 a 80 galones, y son capaces de manejar altos flujos de agua caliente, aunque por periodos limitados de tiempo; algunos modelos presentan recirculación o un calentador auxiliar interno o externo, de modo que se garantice que el agua se entregue en las condiciones requeridas. Como se mantiene constantemente el calentamiento de agua, independientemente de una demanda existente, este tipo de calentadores de agua están sujetos a pérdidas por modo de espera así como por distribución.

Los calentadores de agua con tanque de acumulación típicamente funcionan a través del consumo de electricidad, gas natural o GLP, dependiendo de la disponibilidad del recurso y su costo.

En los **sistemas instantáneos** el agua es calentada para posteriormente ser suministrada directamente al usuario final, cuando este lo requiera, sin depender en ningún tipo de forma de almacenamiento. La capacidad de los calentadores de agua instantáneos es considerablemente mayor que los sistemas de acumulación para los mismos requerimientos de temperatura, esto es debido a que el sistema debe proveer energía para el flujo máximo requerido, mientras que en los sistemas de acumulación el proceso de transferencia de calor ocurre durante un periodo de tiempo mucho más largo y con volúmenes más pequeños. La Tabla 6 resalta

algunas de las características entre los calentadores de agua instantáneos y de acumulación.

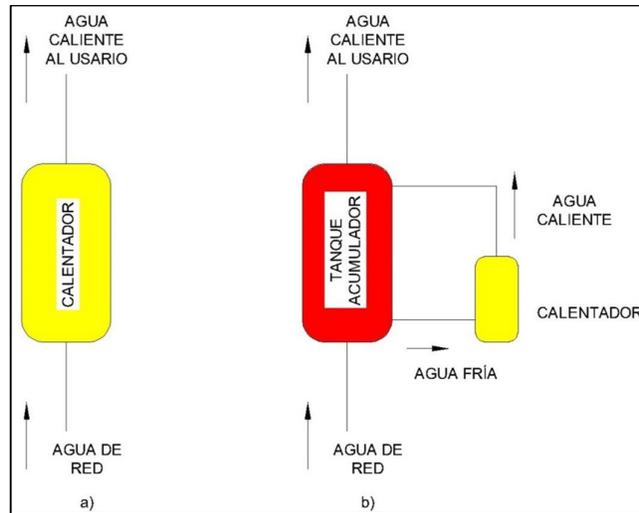


Figura 2.9 Sistemas para suministro de agua caliente.
A) Sistema Instantáneo y b) Sistema de Acumulación

Tabla 6
Características de los sistemas de agua caliente

	Sistemas Instantáneos	Sistemas de Acumulación
Suministro	Continuo	Limitado
Demandas de Espacio	Mínimo	Grandes
Retraso Encendido	Largo	Corto
Demanda de Energía	Alta	Ligera
Temperatura	Variable	Constante
Flexibilidad de fuente de calor	Limitada	Flexible

2.2.2. Calentadores de Agua Residenciales Alternativos

Aunque los sistemas convencionales (Ver Apéndice B) para calentamiento de agua poseen bajo costo y facilidades de instalación, la principal desventaja que presentan son sus eficiencias (menores a 1), esto se traduce en altos consumos de energía para satisfacer los requerimientos de temperatura. Debido a esto, se han desarrollado tecnologías alternativas más eficientes para calentadores de agua que buscan reemplazar los sistemas convencionales. Entre los sistemas alternativos viables en términos de eficiencia y costo de ciclo de vida se destacan los calentadores de agua con bomba de calor como una tecnología prometedora.

Calentadores de Agua Sanitaria con Bombas de Calor

Si bien los sistemas alternativos desarrollan eficiencias superiores, lo que se traslada en reducciones en los costos operativos, los montos de inversión inicial de estos sistemas son aún altos para las capacidades económicas de un hogar promedio a nivel local. Esto ha provocado que se presenten obstáculos y dificultades para su penetración en el mercado nacional.

Las bombas de calor ofrecen una alternativa a los sistemas de calentamiento basados en combustión o por resistencia eléctrica. En lugar de generar calor directamente, las bombas de calor utilizan una fuente de energía para transferir calor desde una zona a otra de mayor temperatura. Bajo esta definición, todos los sistemas que emplean ciclos de refrigeración, tales como acondicionadores de aire o chillers, pueden ser considerados como bombas de calor, sin embargo, a lo largo de este trabajo, el término bomba de calor hace referencia a aquellos sistemas que producen energía térmica para propósitos de calentamiento. En el caso de aplicaciones de calentamiento de agua estas “bombean” energía desde un medio y la depositan en el agua almacenada en un reservorio, logrando de esta forma el aumento de temperatura deseado. Se caracterizan por producir energía térmica útil en rangos de 3 a 4 veces la energía suministrada (Kim, 2004).

Tabla 7
Comparación del costo de ciclo de vida para diferentes sistemas para calentamiento de agua (ACEEE, 2012)

Tipo de calentador de agua	Eficiencia	Costo Instalación ^a	Costo Operación ^b	Años de vida	Costo por ciclo de vida ^c
Acumulación por gas	0.60	\$ 850	\$ 350	13	\$ 5 394
Acumulación por gas alta eficiencia	0.65	\$ 1 025	\$ 323	13	\$ 5 220
De condensación por gas	0.86	\$ 2 000	\$ 244	13	\$ 5 170
Acumulación alimentados por fuel oil	0.55	\$ 1 400	\$ 654	8	\$ 11 299
Acumulación resistencia eléctrica	0.90	\$ 750	\$ 463	13	\$ 6 769
Acumulación resistencia eléctrica de alta eficiencia	0.95	\$ 820	\$ 439	13	\$ 6 528
Instantáneos a Gas	0.82	\$ 1 600	\$ 256	13	\$ 4 925
Calentador con bomba de calor	2.20	\$ 1 660	\$ 190	13	\$ 4 125
Solar con resistencia de respaldo	1.20	\$ 4 800	\$ 175	13	\$ 7 072

^a El costo de instalación incluye estimaciones sobre el precio de adquisición y mano de obra para instalación y puesta a punto. ^b Los costos de operación se basan en el consumo típico para una familia integrada por cuatro personas, para un costo de energía de USD \$ 0.095/kWh, USD \$ 1.40/u. térmica para el gas y \$ 2.40/galón para fuel oil. ^c Los costos de operación no se ajustaron por concepto de inflación.

En los últimos años, el interés por disminuir los consumos de energía, la aparición de tecnologías más eficientes, la problemática energética y los impactos ambientales asociados con la operación de sistemas convencionales impulsaron la investigación del calentamiento de agua sanitaria como aplicación de los sistemas bomba de calor.

El Consejo Americano para una Economía de Eficiencia Energética (ACEEE, por sus siglas en inglés) desarrolló un estudio comparativo entre los costos de ciclo de vida de diferentes sistemas para calentamiento de agua residencial en E.E.U.U. La Tabla 7 muestra un resumen de los resultados obtenidos por el estudio. Como se observa, desde un punto de vista de ciclo vida los calentadores de agua con bomba de calor presentan un ahorro significativo en comparación con sistemas convencionales.

Partiendo de las características prometedoras de estos resultados, se ejecuta la presente investigación con el propósito de conocer el comportamiento operativo de los sistemas de bombas de calor bajo las condiciones meteorológicas existentes en Quito (Clima templado) y Guayaquil (variación de temperatura anual promedio baja), así como la realidad energética actual en el Ecuador.

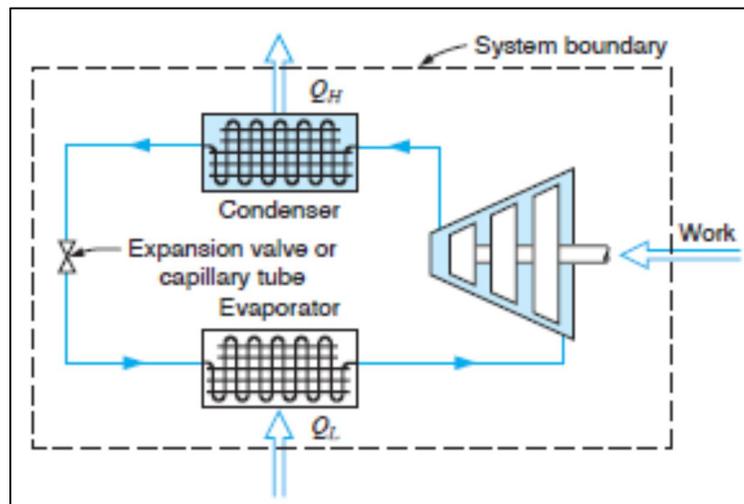


Figura 2.10 Principio de Operación de una Bomba de Calor (Borgnakke & Sonntag, 2009)

2.3. Tecnología de Bomba de Calor con Almacenamiento Térmico para Calentamiento de Agua

La tecnología de bombas de calor para calentamiento de agua en el sector residencial no es nueva, de hecho su desarrollo lleva aproximadamente 50 años. Sin embargo, los modelos iniciales sufrían de desventajas como altos

costos, operación poco confiable, altos costos de mantenimiento y poca robustez en sus diseños, lo que dificultaba su posicionamiento en el mercado. En la actualidad, la crisis del petróleo representa una oportunidad para aumentar la participación de esta tecnología a nivel local.

Este trabajo propone la combinación del calentamiento de agua residencial y aprovechamiento energético del potencial de enfriamiento en una calentador de agua por bomba de calor, concepto que se denomina “*Batería Térmica*” (Carmo, 2012), como un sistema que de manera efectiva acopla la provisión de energía eléctrica con el suministro de servicios térmicos, empleando almacenamiento de energía térmica.

Con esto se busca proveer servicios de agua caliente y acondicionamiento de espacios. Esto es especialmente adecuado en zonas de clima tropical y subtropical donde la calefacción no es esencial. Aunque se pone énfasis en la recuperación de calor, la producción de agua caliente es la principal tarea del calentador de agua por bomba de calor, la capacidad de enfriamiento es solo un subproducto del proceso.

El modo operativo de la bomba de calor con almacenamiento térmico es capaz de proveer los siguientes servicios:

- **Provisión de Agua Caliente Sanitaria:** El objetivo primordial del sistema propuesto es la producción de agua caliente sanitaria. Para propósitos de simplificación, el sistema se comporta como una bomba de calor agua-agua.
- **Refrigeración de espacios y agua caliente sanitaria:** El calor rechazado por el condensador es mayor en un 15-20% al efecto refrigerante del evaporador. Como el tiempo y la frecuencia de operación de un calentador de agua es variable, solo una parte del efecto refrigerante del evaporador se convierte en energía útil.

La Figura 2.11 ilustra el concepto de Batería Térmica (TB), que consiste en una bomba de calor y dos tanques de agua. El sistema produce agua caliente almacenada en el tanque (depósito caliente), mientras que el agua fría almacenada puede ser usada para la climatización de espacios. Debido a que las capacidades combinadas de calentamiento y enfriamiento utilizan todo el potencial de la bomba de calor, se obtienen eficiencias muy superiores en comparación con sistemas para una aplicación específica.

El concepto de Batería Térmica implica aprovechar el diferencial de temperatura y presión existentes en el evaporador y condensador de la bomba de calor. La Batería Térmica convierte la energía eléctrica

suministrada en energía térmica almacenada para los depósitos caliente y frío; lo que permite obtener niveles de temperatura útiles.

El concepto de Batería Térmica es aplicable para el remplazo o soporte de los sistemas que actualmente están proporcionando servicios independientes de calentamiento o enfriamiento. En el sector residencial, la Batería Térmica puede sustituir los calentadores de agua y sistemas centrales de A/C; la prestación de servicios de refrigeración también puede ser integrada a su operación. En resumen, estos sistemas proporcionan un método altamente eficiente de suministrar calor útil para servicios térmicos como acondicionamiento de espacios y calentamiento de agua sanitaria, alcanzando a entregar hasta 3 veces la energía (en forma de calor) suministrada (en forma de electricidad), a diferencia de sistemas convencionales donde generalmente la relación entre la energía efectiva entregada y la energía suministrada es menor a uno. De este modo la tecnología de bomba de calor representa un potencial de reducir costos de operación y necesidades de recursos y emisiones.

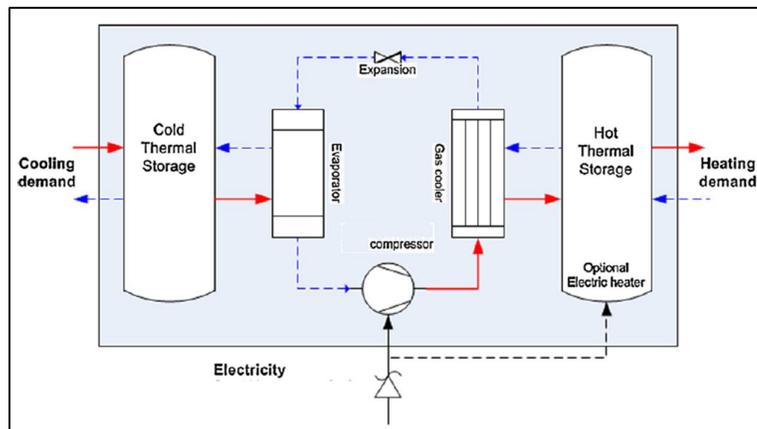


Figura 2.11 Esquema del concepto de Bomba de Calor con Almacenamiento Térmico (Blarke, 2012)

A continuación se procede con una revisión de los aspectos termodinámicos y de transferencia de calor de los diferentes componentes que forman el sistema de bomba de calor para calentamiento de agua, esto permite alcanzar un entendimiento completo de la operación global del sistema así como de sus sub-sistemas.

Concluida esta fase, se establecen las relaciones locales y globales entre los componentes, estas se expresan a través de un modelo matemático que permitió identificar las características de la bomba de calor. Este modelo representa la herramienta base para el análisis del rendimiento energético del sistema.

2.3.1. Principios Termodinámicos de la Bomba de Calor

En la mayoría de aplicaciones, la tecnología de bomba de calor para calentamiento de agua residencial opera en base al ciclo inverso de Carnot, absorbiendo calor a baja temperatura de una fuente disponible (típicamente aire, agua o del suelo) para producir energía térmica a una temperatura mayor y entregándola a un volumen de agua almacenado en un tanque, el cual hace las funciones de un depósito térmico.

Las bombas de calor aprovechan las propiedades termodinámicas de un fluido operante o refrigerante (generalmente CFC o HFC, aunque el uso de CO₂ ha mostrado resultados prometedores) para efectuar el ciclo inverso de Carnot. La configuración de bomba de calor utilizada en este trabajo se presenta a continuación en la Figura 2.12 (Splitter & Hui, 2002).

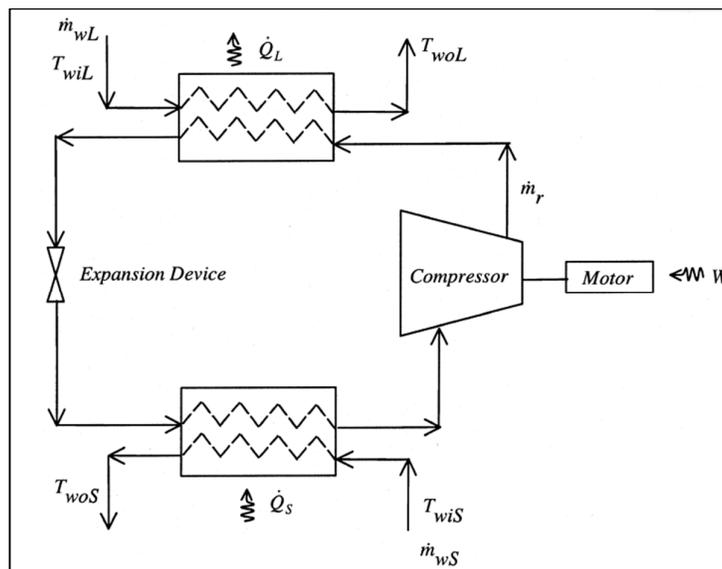


Figura 2.12 Configuración básica de una Bomba de Calor

De manera general, una bomba de calor consiste de 4 componentes básicos: (1) compresor; (2) evaporador; (3) condensador y (4) mecanismo de expansión. Aunque otros elementos pueden formar parte del sistema, estos se consideran despreciables debido a su comparativamente pequeña contribución en el análisis termodinámico el sistema.

Asumiendo un proceso isentálpico en el mecanismo de expansión, para la operación de bomba de calor con calentamiento y enfriamiento simultáneo, se tiene:

$$\dot{Q}_s = \dot{W} + \dot{Q}_L \quad (4)$$

Donde \dot{Q}_s es la transferencia de calor desde la fuente, \dot{W} es la potencia requerida por la unidad, \dot{Q}_L es la transferencia de calor en el lado de la carga. Para propósitos prácticos, la ecuación (4) asume cero pérdidas de calor en los componentes del sistema. Aunque en la realidad existe transferencia de calor entre los componentes de la bomba de calor y los alrededores, estas pérdidas son considerablemente pequeñas, y por lo tanto no se consideran en los catálogos de fabricantes.

2.3.2. COP-Coeficiente de Rendimiento

El rendimiento de un calentador de agua con bomba de calor se refiere al COP (Coefficient of performance, por sus siglas en inglés), que expresa o mide la eficiencia de operación de la bomba de calor. El COP puede representarse también como la comparación entre la cantidad de calor útil entregado y el trabajo mecánico o eléctrico consumido para la operación del sistema (compresor) en un instante t:

$$COP = \frac{\dot{Q}_{gen}(t)}{\dot{W}_{elec}(t)} \quad (5)$$

Donde \dot{Q}_{gen} es la tasa de calor total útil producido por la bomba de calor y \dot{W}_{elec} es la demanda de potencia del compresor y otros mecanismos auxiliares (bombas, controles, etc.).

Si se separa la tasa de calor útil en dos componentes: (1) el calor útil empleado en el calentamiento de agua \dot{Q}_L y (2) el potencial de enfriamiento del evaporador \dot{Q}_s se tiene:

$$COP = \frac{\dot{Q}_L + \dot{Q}_s}{\dot{W}_{elec}(t)} \quad (6)$$

El valor promedio del COP se obtiene integrando la expresión anterior para un intervalo de tiempo, en este caso se examina una base anual.

$$\overline{COP} = \frac{\int [\dot{Q}_L + \dot{Q}_s]}{\int \dot{W}_{elec}(t)} \quad (7)$$

2.4. Emisiones de CO₂

La Iniciativa de Reporte Global (GRI), con respecto a las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), menciona a éstos como la principal causa del cambio climático. Al respecto, existe un marco regulatorio internacional enfocado en la reducción de emisiones de GEI. Este se encuentra

encabezado por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (United Nations Framework Convention on Climate Change - UNFCCC).

Los GEI son gases que “atrapan” el calor en la atmósfera, sin embargo no todos los GEI tienen el mismo potencial de calentamiento. Los GEI son emitidos a la atmósfera como consecuencia de procesos naturales y otros relacionados con la actividad humana. El CO₂ es el principal GEI de origen antropogénico, y constituye el compuesto de referencia para expresar las emisiones de GEI a la atmósfera; a continuación se citan los principales GEI, expresados en función de su potencial de calentamiento global:

- Dióxido de Carbono (CO₂) (Potencial = 1)
- Metano (CH₄) (Potencial = 21)
- Óxido Nitroso (N₂O) (Potencial = 310)
- Gases Fluorados (ej. SF₆: Potencial = 23900)

Si bien existen GEI con mayor potencial de calentamiento global, este trabajo enfocará el análisis de las emisiones de CO₂ únicamente, pues su duración en la atmósfera es superior al del resto de GEI (puede durar hasta cien años en la atmósfera).

Ecuador forma parte de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, habiendo además suscrito el Protocolo de Kyoto. Según estos compromisos adquiridos internacionalmente, Ecuador no tiene la obligatoriedad de reducir sus emisiones de GEI (pues no está incluido en el Anexo I de la UNFCCC), sin embargo puede beneficiarse de proyectos de reducción certificada de emisiones de carbono.

La magnitud de las emisiones de CO₂, para el caso de aplicaciones domésticas de calentamiento de agua, será afectada principalmente por la tasa de consumo de combustibles empleados para la producción de energía eléctrica o para la operación de la unidad calentadora.

Así, la información necesaria para el cálculo de las emisiones de CO₂ comprenderá principalmente el tipo y volumen de combustible empleado, así como la cantidad de energía consumida de origen termoeléctrico; además de factores de emisión que permitan relacionar dicho consumo con los potenciales niveles de CO₂ que serán emitidos a la atmósfera.

La Agencia de Protección Ambiental de E.E.U.U. (US EPA, por sus siglas en inglés), a través del Centro para el Liderazgo Climático Corporativo creó el Centro de Factores de Emisión de Gases de Efecto Invernadero (GHG Emission Factors Hub), el mismo provee un conjunto de factores de emisión

para su uso. Así, para la evaluación de las emisiones de CO₂, se emplean los factores de emisión publicados por la US EPA para GEI en su versión al año 2011.

La Tabla 8 contiene factores de emisión para combustión estacionaria, establecidos por tipo de combustible. Las emisiones generadas están ligadas únicamente al tipo de combustible empleado; este aspecto conlleva la ventaja de que se cuenta con valores más estandarizados para realizar los cálculos de las emisiones.

Tabla 8
Factores de Emisión para Gases de Efecto Invernadero

Contaminantes Comunes	Fuel Oil (kg/gal)	Diesel 2 (kg/gal)	Gas Natural (kg/scf)	Residuo (kg/gal)	Crudo (kg/gal)	GLP (kg/gal)
Dióxido de Carbono (CO ₂)	10.21	10.21	0.0545	11.27	10.28	5.59
Metano (CH ₄)	0.00042	0.00041	1.028E-06	0.00045	0.00041	0.00027
Óxido Nitroso (N ₂ O)	0.00008	0.00008	1.03E-07	0.00009	0.00008	0.00005

Por otra parte, el MEER, en esfuerzo conjunto con el MAE (DNSAHC, 2009) desarrollaron un procedimiento para la actualización del factor de emisión del Sistema Nacional Interconectado (SNI), aplicable para todos los proyectos de generación de fuentes renovables y no renovables conectados a la red; proyectos de interconexión a la red, proyectos de eficiencia energética y cualquier otro tipo de proyecto que dentro de su metodología de cálculo requiera cuantificar su consumo de electricidad proveniente de la red. El resultado del procedimiento determina un factor de emisión de 0.5289 kg CO₂/kWh.

Finalmente, para la estimación de las emisiones debido al uso de energía para calentamiento de agua residencial se aplica la siguiente expresión:

$$E_{CO_2} = f \times C \quad (8)$$

Dónde:

E_{CO_2} ≡ Emisiones de CO₂, kg.

f ≡ Factor de emisión, kg/kWh.

C ≡ Energía consumida asociada a la emisión de CO₂, kWh.

2.5. Alternativas para Sistema de Agua Caliente Residencial

En esta sección se detallan los modelos desarrollados para la simulación de las distintas alternativas seleccionadas para contrastar el rendimiento de una Batería Térmica.

Para evaluar el rendimiento anual de un sistema para calentamiento de agua se emplean parámetros de operación y una simulación anual por computadora usando TRNSYS 17.0. TRNSYS es una herramienta digital que permite el análisis dinámico de todo tipo de sistemas energéticos a través de la creación de modelos utilizando una amplia librería de componentes, cada uno de los cuales cuenta con una o varias relaciones matemáticas que definen por completo su comportamiento.

La librería de componentes de TRNSYS permite un modelado termo-hidráulico detallado de los sistemas incluyendo la fuente de energía térmica, unidad calentadora, almacenamientos térmicos, etc. El comportamiento del usuario del sistema, características climáticas y estrategias de control son implementadas en la simulación. De esta forma, todas las influencias relevantes en el rendimiento del sistema son tomadas en cuenta. La simulación anual se lleva a cabo usando intervalos de tiempo de una hora.

2.5.1. Condiciones de los Sitios para Simulación

En la práctica, sistemas idénticos de calentamiento a menudo pueden alcanzar diferentes rendimientos. La razón de este comportamiento es generalmente atribuible al sistema de control, tanque de almacenamiento y otros elementos que resultan en un impacto significativo en la operación del sistema. Un ejemplo de estas influencias externas es la temperatura de la fuente de calor o temperatura de la red pública. En resumen, para realizar un análisis preciso del rendimiento de un calentador de agua no es suficiente un análisis de la unidad calentadora únicamente, sino del sistema en forma global.

Se seleccionan dos localidades referenciales para análisis, Guayaquil y Quito, estas ciudades corresponden al entorno físico que define las características climáticas y meteorológicas bajo las cuales se prueba el sistema.

En general, se caracterizan los aspectos físicos de las zonas para análisis, se recopila y procesa la información técnica de las zonas a partir de los resultados disponibles en las "Propuestas de Desarrollo y Lineamientos para el Ordenamiento Territorial" para las zonas de

planificación elaboradas por la SENPLADES (Apéndice C). Las cinco alternativas para la producción de agua caliente sanitaria son ahora examinadas.

2.5.2. Alternativa 1 - Calentador de Acumulación por Resistencia Eléctrica.

La primera alternativa representa un calentador eléctrico con almacenamiento. Este sistema cuenta con dos resistencias eléctricas de inmersión que transmiten energía para calentar agua desde la temperatura de la red de agua potable hasta la temperatura de consigna ($T_{set} = 50^{\circ}\text{C}$).

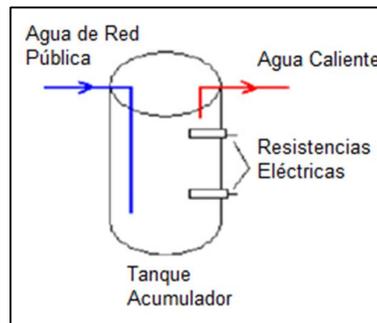


Figura 2.13. Alternativa 1 - Calentador de agua por Resistencia Eléctrica

Capacidad Nominal

El volumen pico de diseño a 60 min corresponde al valor tabulado en la Tabla 5:

$$18.2 \frac{L}{persona} \times 2 persona = 36.4 L$$

Con este valor podemos determinar el flujo volumétrico promedio:

$$\dot{V} = \left(\frac{36.4 L}{60 min} \right) \times \left(\frac{1 min}{60 s} \right)$$

$$\dot{V} = 10.11 \frac{mL}{s} \cong \frac{40L}{hr}$$

La capacidad nominal del calentador de agua por resistencia está en función de la temperatura de entrada, la cual corresponde a la temperatura de la red de agua potable. Esta temperatura varía de acuerdo al sitio de análisis (Quito o Guayaquil). Para poder estimar este valor, podemos referirnos a las mediciones de temperatura ambiente que se

encuentran en los anuarios meteorológicos publicados por el INAMHI, en ellos se reportan un conjunto de parámetros meteorológicos entre ellos la temperatura promedio anual, esta puede usarse como referencia para estimar la temperatura de la red de agua potable. Del anuario meteorológico, en su edición 2009, se toma el valor de 15.6°C y 26.4°C para Quito y Guayaquil, respectivamente.

La capacidad nominal, asumiendo una eficiencia de 0.9 (típica para calentadores eléctricos) para los dos sitios de análisis se calcula igual a:

- Quito:

$$Q_{ER,1} = \frac{\left(10.11 \times 10^{-3} \frac{L}{s}\right) \left(\frac{1kg}{L}\right) \left(\frac{4.186kJ}{kg.K}\right) (50^{\circ}C - 15.6^{\circ}C)}{0.90}$$

$$Q_1 = 1.46 kW$$

- Guayaquil:

$$Q_{ER,2} = \frac{\left(10.11 \times 10^{-3} \frac{L}{s}\right) \left(\frac{1kg}{L}\right) \left(\frac{4.186kJ}{kg.K}\right) (50^{\circ}C - 26.4^{\circ}C)}{0.90}$$

$$Q_2 = 1.11 kW$$

Tabla 9
Modelos de calentadores por resistencia eléctrica vs capacidades de recuperación
(RHEEM AUSTRALIA PTY LTD., 2006)

Heating unit rating (W)	40°C rise	50°C rise	60°C rise	70°C rise
1200	26	21	17	15
1500	32	26	22	18
1800	39	31	26	22
2000	43	34	29	25
2400	52	41	34	29
3000	65	52	43	37
3600	77	62	52	44
4800	103	83	69	59
6000	129	103	86	74

Nota: Capacidades de recuperación en L/h

Se elige por lo tanto un tanque de acumulación por resistencia eléctrica con una capacidad nominal igual a 1.5 kW (Ver Tabla 9).

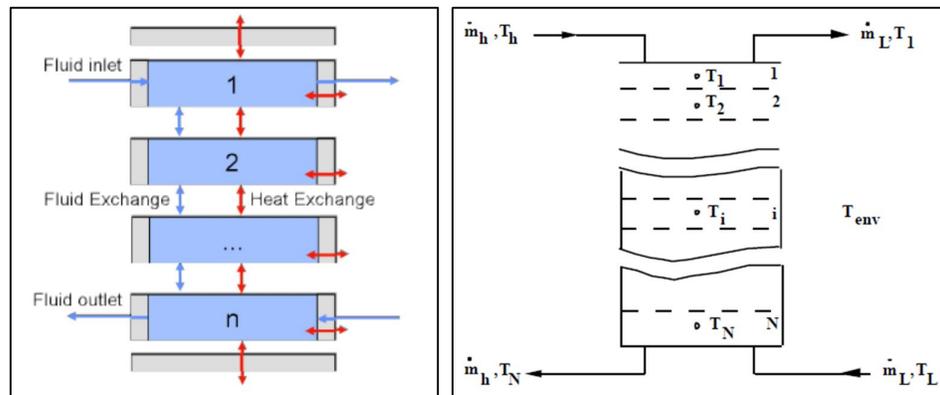
Tanque de Almacenamiento

El tanque de almacenamiento térmico ejerce la función de depósito térmico, y se emplea para manejar la demanda variable de carga térmica. El modelado de este elemento fue realizado bajo un criterio unificado, este consiste en un tanque de almacenamiento de energía térmica sensible con dos entradas y dos salidas fijas. El volumen del tanque es dividido en 6 volúmenes iguales que representan segmentos de fluidos (Ver Figura 2.14). Las capas están unidas entre sí de modo que permiten transferencia de calor y masa entre ellas.

Asumiendo que un 70% del volumen del tanque puede ser extraído a una temperatura útil (el otro 30% restante es degradada por la mezcla en el tanque), el volumen requerido por el tanque se determina a partir del consumo promedio diario determinado en la Sección 2.1.4:

$$S_t = \frac{44 \text{ gal}}{0.7} = 62.85 \text{ gal} \therefore 65 \text{ gal}$$

$$S_t = 0.246 \text{ m}^3$$



**Figura 2.14. Modelo Tanque de Almacenamiento
(Huchtemann & Muller, 2009)**

Para el volumen calculado, se obtiene un tanque con la siguiente geometría: (1) altura igual a 1.5 m y (2) diámetro igual a 0.45 m. Adicionalmente, el tanque simulado se encuentra equipado con dos resistencias eléctricas de 0.75 kW ubicadas a una altura de 0.3 m y 1.0 m con respecto al fondo del tanque.

Tabla 10
Características del modelo para alternativa 1

Calentador Eléctrico	
Resistencias Eléctricas (2 unid.)	0.75kW c/u
Eficiencia	0.9
Volumen	0.246 m ³ (65 gal)
Aislamiento	R=1.5 m ² °C/W
Controlador	
ΔT_H	10 °C
ΔT_L	5 °C
T_{set}	50 °C
T_{max}	60 °C

El modelo del tanque toma en consideración las pérdidas de energía a través de las paredes del tanque. Se asume una resistencia térmica total igual a 1.5 m²K/W, similar a lo que se esperaría con el empleo de aislamiento de poliuretano en un rango de 30 a 50 mm de espesor.

La configuración del control para el calentador de acumulación por resistencia eléctrica y otras características del sistema se muestran en la Tabla 10.

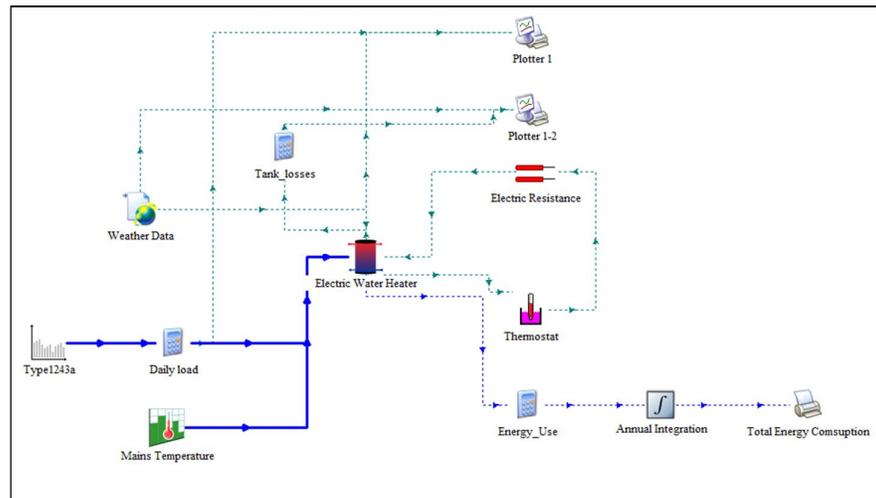


Figura 2.15 Diagrama esquemático de un Tanque de Acumulación por Resistencia Eléctrica

Con estos parámetros, TRNSYS realiza un balance de energía en el tanque asumiendo un fluido completamente mezclado en cada segmento de volumen para evaluar la temperatura del fluido, energía transferida, pérdidas por conducción y la energía consumida. Finalmente el resultado

del modelo del sistema desarrollado en TRNSYS se presenta en la Figura 2.15.

2.5.3. Alternativa 2 - Calentador Instantáneo Alimentado por GLP.

La segunda alternativa involucra un sistema sin almacenamiento operando a base de GLP. Este sistema corresponde a los calefones a gas que se encuentran disponibles en gran número en el mercado local. Estos dispositivos prácticamente no poseen capacidad de almacenamiento y calientan agua conforme está fluye a través del mismo (Ver apéndice B). Debido a que no poseen capacidad de almacenamiento térmico, el equipo debe suministrar la energía suficiente para alcanzar el incremento de temperatura deseado. La Tabla 11 muestra algunas de las propiedades del cilindro de GLP (15 kg) disponible para uso residencial.

Tabla 11
Características del Cilindro 15 kg de GLP

Propiedad	GLP (Comercial)
Temperatura de Ebullición °C (P = 1 Atm)	(-42.1, -0.5)
Densidad, kg/L	0.56
Contenido Energético/ Cilindro	205 kWh

El procedimiento para el dimensionamiento de un calentador de agua instantáneo toma en cuenta el hecho que, debido a la poca capacidad de control de la temperatura como consecuencia de la ausencia de almacenamiento térmico, a menudo la temperatura del agua en el punto de uso final es mayor a la necesaria, y el usuario recurre a mezclar agua caliente y fría para alcanzar la temperatura deseada.

La ecuación (9) (ASHRAE, 2011) se deriva de un balance de energía para una mezcla de agua caliente y fría. Se emplea para determinar el flujo real en el calentador para valores específicos de temperatura de agua fría, caliente y temperatura para uso final.

$$\dot{v}_a = \frac{\dot{m}_{mixed} (T_{mixed} - T_{hot,in})}{(T_{hot,out} - T_{hot,in})} \quad (9)$$

Dónde:

$\dot{v}_a \equiv$ Flujo volumétrico de agua caliente real.

$\dot{m}_{mixed} \equiv$ Flujo másico de mezcla

$T_{mixed} \equiv$ Temperatura de la mezcla de agua

ASHRAE, en su publicación “ASHRAE Handbook – HVAC Applications” especifica un valor mínimo recomendado de \dot{m}_a para calentadores instantáneos igual a 0.65 L/s. Además menciona que para aplicaciones de agua caliente, 43°C representa la temperatura mínima aceptable para uso residencial. Con esta información, se determina la capacidad del calentador de agua alimentado por GLP:

- Quito:

$$\dot{v}_a = \frac{(0.065 \text{ L/s}) (43^\circ\text{C} - 15.6^\circ\text{C})}{(50^\circ\text{C} - 15.6^\circ\text{C})}$$

$$\dot{v}_a = 0.052 \text{ L/s} \cong 3 \text{ L/min}$$

Consecuentemente, aplicando la ecuación (1) se determina la capacidad nominal para el calentador asumiendo una eficiencia de 60%, típica para unidades alimentadas por combustibles fósiles:

$$Q_{GF,1} = \frac{\left(52 \times 10^{-3} \frac{\text{L}}{\text{s}}\right) \left(\frac{1 \text{ kg}}{\text{L}}\right) \left(\frac{4.186 \text{ kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}\right) (50^\circ\text{C} - 15.6^\circ\text{C})}{0.60}$$

$$Q_{GF,1} = 12.5 \text{ kW}$$

- Guayaquil:

$$Q_{GF,2} = \frac{\left(52 \times 10^{-3} \frac{\text{L}}{\text{s}}\right) \left(\frac{1 \text{ kg}}{\text{L}}\right) \left(\frac{4.186 \text{ kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}\right) (50^\circ\text{C} - 26.4^\circ\text{C})}{0.60}$$

$$Q_{GF,2} = 8.56 \text{ kW}$$

Tabla 12
Modelos Calefones Potencia vs Temperatura de entrega

Modelo	Tipo de gas	Consumo calorífico nominal kW	Caudal de agua caliente Lts/min	Rango de presión de gas (mbar)		Rango de presión de agua bar	Conexiones de agua	Conexión de gas
				GLP	GN			
GWH6 B31/B23	GLP	13.5	6	28 mbar	18 mbar	0.3 - 10	G1/2"	G1/2"
GWH10 B31/B23	GN	22.4	10	30 mbar	20 mbar			
GWH13 B31/B23	GN	29	13					

En la Tabla 12 se presenta las potencias nominales para diferentes modelos de calefones comerciales (BOSCH, 2012) que operan por GLP. La información incluye también la cantidad de agua caliente en L/min que podrá obtenerse del calentador instantáneo según su potencia útil para una temperatura de salida de 55°C, teniendo una temperatura de entrada de 10°C.

Con los valores obtenidos, se selecciona la unidad con una capacidad nominal de 13.5 kW para el calentador de agua alimentado por GLP (modelo GWH6 B31/B23). Las características del sistema modelado se muestran en la Tabla 13.

Tabla 13
Características del modelo para alternativa 2

Potencia Calorífica	13.5 kW
Eficiencia	0.6
Capacidad	6 L/min
T_{Set}	55 °C

El diagrama del modelo del sistema desarrollado en TRNSYS se muestra en la Figura 2.16.

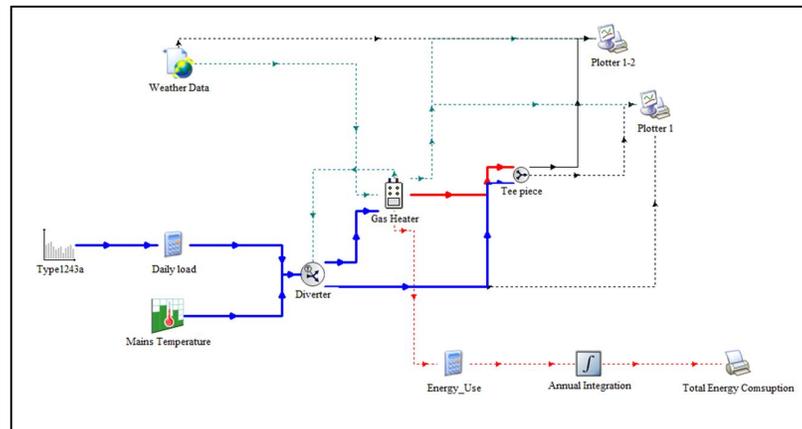


Figura 2.16 Diagrama esquemático de un Calentador Instantáneo por GLP

2.5.4. Alternativa 3 - Calentador de Agua Termo solar.

La configuración propuesta para la tercera alternativa se presenta en la Figura 2.17. El sistema se compone de: (1) colector solar de placa plana estacionario; (2) un tanque del almacenamiento con dos resistencias de respaldo; (3) una bomba de circulación y (4) un controlador (on/off).

El aprovechamiento del recurso solar para la producción de agua caliente implica la ejecución de tres procesos:

1. Captación de la irradiación en el colector para generar un aumento en la temperatura del agua circulante.
2. Acumulación del agua en tanque de almacenamiento para su disposición por el usuario.
3. Incorporación de un mecanismo de soporte (resistencia eléctrica), para proveer calentamiento auxiliar al colector en caso que la radiación solar no sea suficiente.

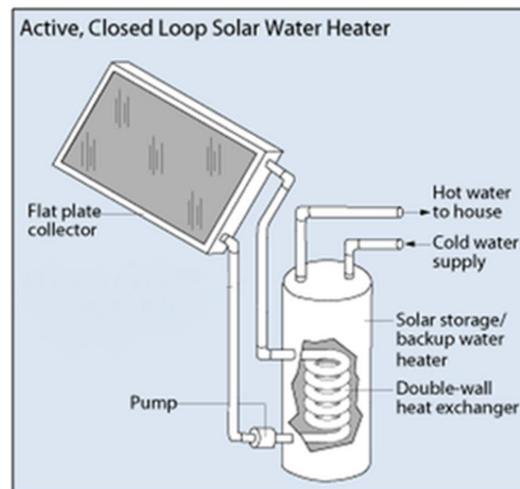


Figura 2.17 Calentador de Agua Residencial Termo solar (DOE, 2012)

El diseño de un sistema de calentamiento solar de agua depende de (1) Recurso solar disponible; y 2) tipo de colector empleado. Se debe seleccionar una combinación apropiada de estos factores, pues estos determinan en gran parte el costo del sistema. Debido a su ubicación geográfica, en el Ecuador se presenta poca variación en la posición del sol durante el año. Esto favorece el aprovechamiento del recurso solar para la producción de servicios térmicos, pues se tiene en promedio 12 horas al día de irradiación solar.

Dimensionamiento de Sistema

El rendimiento de un colector solar, se evaluar por medio de su eficiencia, esta última puede ser expresada mediante:

$$\eta_s = \frac{\dot{Q}_R}{A_c I} \quad (10)$$

Dónde:

$\eta_s \equiv$ Eficiencia del colector

$\dot{Q}_R \equiv$ Capacidad de calentamiento requerida, kJ/s

$I \equiv$ Radiación incidente en el colector, kJ/s

$A_c \equiv$ Área de colectores, m².

Esta expresión mide la relación entre la energía útil o absorbida por el agua y la incidente en el captador (irradiación total) sobre la superficie.

La demanda energética para la producción de agua caliente se calcula en función del consumo promedio diario y las temperaturas de consigna y de red de agua potable:

$$\dot{Q}_R = \dot{V}_{Colector} \rho_w c_p (T_{hot,in} - T_{hot,out}) \quad (11)$$

Dónde:

$\dot{V}_{Colector} \equiv$ Consumo promedio diario de agua caliente, L/día

$\rho_w \equiv$ Densidad del agua, 1 kg/L

$c_p \equiv$ Calor específico del agua, 4.186 kJ/(kg.K)

$T_{hot,in} \equiv$ Temperatura del agua que entra a la unidad, °C

$T_{hot,out} \equiv$ Temperatura del agua que sale de la unidad, °C

Previamente se determinó el valor de *AGPD* igual a 0.246 m³ (65 gal) y una temperatura $T_{hot,out}$ igual a 50 °C.

Con el valor de *AGPD*, se procede con la determinación del flujo volumétrico promedio que circula por la tubería que suministra el agua caliente hacia la vivienda. No obstante, para el cálculo del flujo volumétrico se estima un aprovechamiento solar equivalente solo a 9 horas diarias como valor medio anual, consecuentemente:

$$\bar{V}_{Colector} = \frac{0.246 \text{ m}^3 \times \frac{1000 \text{ L}}{\text{m}^3}}{9 \text{ h}} = 27.3 \text{ L/h}$$

Habiendo sido determinado el caudal necesario para abastecer la demanda de agua caliente sanitaria, es posible definir el área del colector solar a ser implementado. La Norma Ecuatoriana de Construcción – NEC 10 Parte 14-1 “Energía Renovable – Sistemas de calentamiento de agua con energía solar para uso sanitario en el Ecuador” (CEDEC, 2009) presenta los valores de irradiación global promedio anual para diferentes regiones del país, de esta información se extrajeron los valores para las localidades estudiadas en el presente trabajo (Ver Tabla 14).

Tabla 14
Valores Promedio de Irradiación Solar para sitios de análisis

Provincia	Ciudad	Wh/m ² día	Zona
Guayas	Guayaquil	4370	III
Pichincha	Quito	4990	IV

La ecuación (10) relaciona el recurso solar disponible y la demanda requerida, a través de la eficiencia. Asumiendo un valor de 0.8 para el colector, se puede encontrar el área de captación necesaria para el calentamiento del agua.

$$A_c = \frac{\dot{Q}_R}{\eta I}$$

Reemplazando los valores de temperatura de red de agua potable e irradiación total para la ciudad de Quito se obtiene:

$$A_{c,Quito} = \frac{\left(\frac{246L}{día}\right) \left(1 \frac{kg}{L}\right) 4.186 \frac{kJ}{kg^{\circ}C} (50^{\circ}C - 15.6)}{4.99 \frac{kWh}{m^2 día} \times \frac{3600kJ}{1 kWh}}$$

$$A_{c,Quito} = 1.97 m^2$$

Aplicando el mismo procedimiento para la ciudad de Guayaquil el área de recolección requerida es igual a:

$$A_{c,Guayaquil} = \frac{\left(\frac{246L}{día}\right) \left(1 \frac{kg}{L}\right) 4.186 \frac{kJ}{kg^{\circ}C} (50^{\circ}C - 26.4)}{4.37 \frac{kWh}{m^2 día} \times \frac{3600kJ}{1 kWh}}$$

$$A_{c,Guayaquil} = 1.6 m^2$$

Debido al movimiento constante del sol, es necesario emplear criterios para determinar la orientación más adecuada del panel en función del sitio de instalación. Esta orientación está determinada por dos ángulos: (1) el acimut y (2) la inclinación o altitud.

El objetivo es emplear una inclinación que maximice el ajuste entre la captación y la demanda de energía. La inclinación del panel viene dado por la ecuación:

$$\beta = |\theta| + 10^{\circ} \quad (12)$$

Donde θ es la latitud en la que se encuentra el lugar a ser analizado. Para las ciudades de Quito y Guayaquil se asumen latitudes de -1° y -3° respectivamente. Se obtienen dos valores de β iguales a 11° y 13° respectivamente, sin embargo por recomendaciones técnicas se fija una inclinación del colector igual a 15° , a partir de la cual se desarrollará los cálculos de transferencia de energía.

Consecuentemente, se selecciona un colector solar con las siguientes características (EU SOLAR, 2012):

Tabla 15
Características técnicas del colector solar

Marca	EU SOLAR
Modelo	HP65/20
Inclinación mínima	15°
Inclinación máxima	90°
Eficiencia	0.73
Coefficiente de pérdidas	$1.16 \text{ m}^2\text{C/W}$
Dimensiones	1980 x 1450 x 165 mm
Superficie Absorbente	2.0 m^2
Superficie Total	2.5 m^2

El sistema modelado opera bajo un termostato diferencial; dos sensores de temperatura censan la temperatura del agua en la salida de los colectores y en el fondo del tanque de almacenamiento. Mientras la diferencia entre estas temperaturas sea mayor a 10°C , el sistema está encendido. Cuando esta diferencia alcanza un valor menor a 5°C , el controlador apaga el sistema.

Bomba de Recirculación

Aunque ciertos sistemas de calentamiento emplean convección natural para circular flujo, la mayoría de equipos cuentan con bombas de circulación que transportan el agua a través de las tuberías y de regreso al calentador. Para el sistema de calentamiento termo solar, será suficiente el empleo de una bomba de agua para uso residencial, disponibles en el mercado local generalmente bajo las siguientes características:

- Potencia Motor: 0.375 kW
- Caudal: 5 - 30 L/min
- Cabezal Máximo: 30 m

Tabla 16
Características del modelo para alternativa 3
Colectores de placa plana

Área del colector	2.0 m ²
Inclinación del colector	15°
Eficiencia del Colector	0.73
Flujo Bomba	20 L/min
Potencia Bomba de circulación	0.375 kW
Coeficiente de pérdidas	1.16 m ² °C/W
Tanque de almacenamiento	
Volumen	0.246 m ³
Aislamiento	R = 1.5 m ² °C/W
R. Eléctricas (2 unid.)	0.75kW c/u
Controlador	
ΔT_H	10 °C
ΔT_L	5 °C
T_{set}	50 °C
T_{max}	60 °C

Finalmente las características del sistema se resumen en la Tabla 16. Es importante mencionar que el objetivo de este trabajo no es determinar una configuración óptima para el sistema termo solar, sino representar con una precisión aceptable un calentador solar con características similares a los que se encuentran disponibles a nivel local.

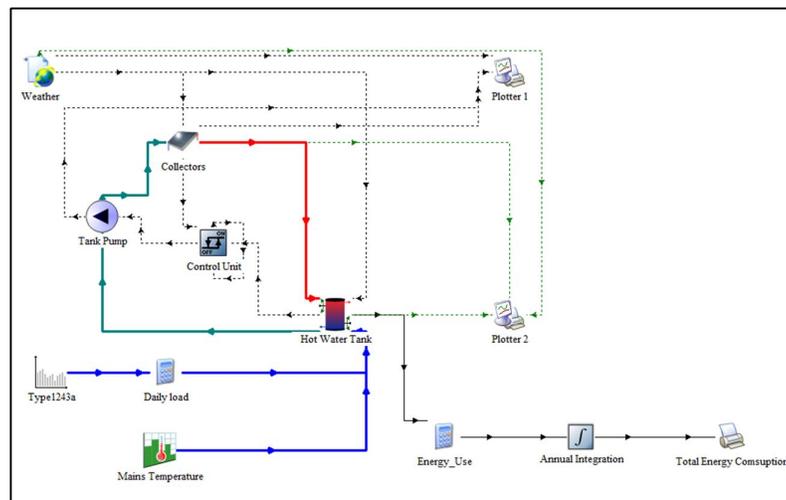


Figura 2.18 Calentador de Agua Residencial Termo solar

2.5.5. Alternativa 4 - Calentador por Bomba de Calor Alimentada por Aire.

La tercera alternativa analizada representa una bomba de calor alimentada por aire. Esta alternativa involucra la aplicación de aire ambiente como fuente de energía para el calentamiento de agua produciendo un enfriamiento de dicho aire. Este puede ser luego usado para efectos de climatización o expulsado al aire ambiente. La primera configuración puede ser empleada en climas cálidos (costa) para disminuir la carga térmica necesaria para enfriamiento de espacios, siendo poco deseable en condiciones climáticas como las que presenta Quito, donde comúnmente es necesario equipamiento para calefacción. El agua es transportada del tanque de almacenamiento al condensador de la bomba de calor donde el refrigerante transfiere la energía necesaria para calentar el agua, la cual luego retorna al tanque de almacenamiento donde es útil para el usuario final.

Bomba de Calor

Existe una cantidad importante de modelos disponibles para sistemas que operan bajo el ciclo inverso de Carnot (compresión de vapor), sin embargo, todos aquellos que proveen las ventajas de los enfoques determinísticos requieren de información que va más allá de lo que normalmente se encuentra en catálogos de fabricantes. Por lo tanto, es útil emplear un modelo que use una técnica determinística pero que solo requiera información habitualmente entregada por el fabricante.

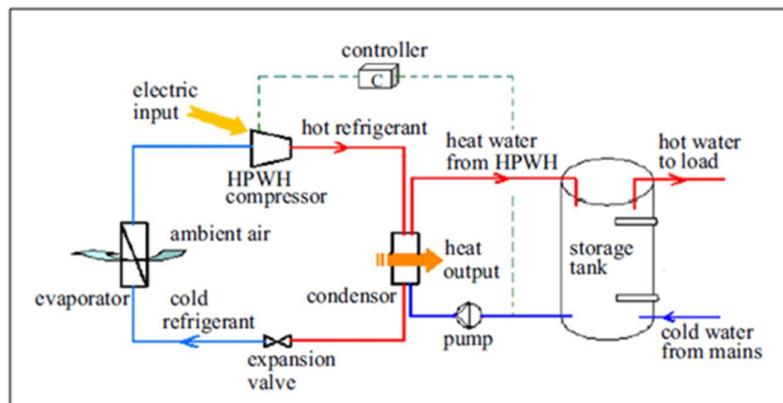


Figura 2.19. Calentador de Agua por Bomba de Calor alimentada por aire

Para simular el comportamiento de una bomba de calor, TRNSYS implementa un modelo de “caja negra”, el cual consiste de dos intercambiadores de calor conectados a un módulo que calcula el flujo de calor y la potencia del compresor a partir de curvas de rendimiento

normalizadas y que se referencian en datos de fabricantes. Esta información de rendimiento es proporcionada en puntos de operación estandarizados. TRNSYS luego realiza un procedimiento de estimación de parámetros, en el cual minimiza la diferencia entre los resultados del modelo y los datos del fabricante a través de un ajuste sistemático de los parámetros de entrada y una función objetivo. El concepto básico de este modelo se presenta a continuación en la Figura 2.20 (Huchtemann & Muller, 2009).

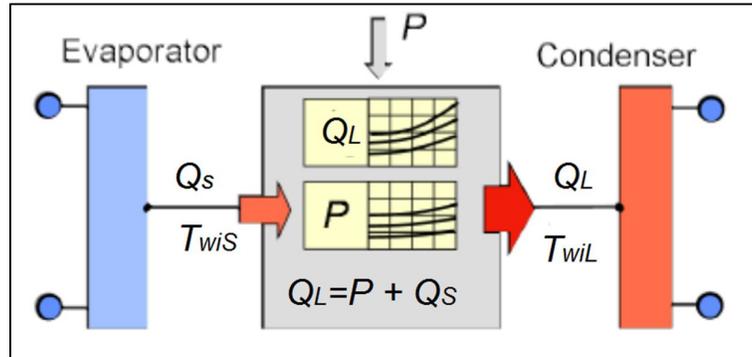


Figura 2.20 Esquema de un modelo de Bomba de Calor basado en datos del fabricante

El modelo determina entonces las temperaturas de salida para cada flujo de fluidos. Este enfoque de modelado presenta la ventaja de no requerir información o datos experimentales que no van más allá de lo publicado en catálogos de fabricantes de bombas de calor. Un diagrama de flujo para la implementación del modelo se presenta en la Figura 2.21.

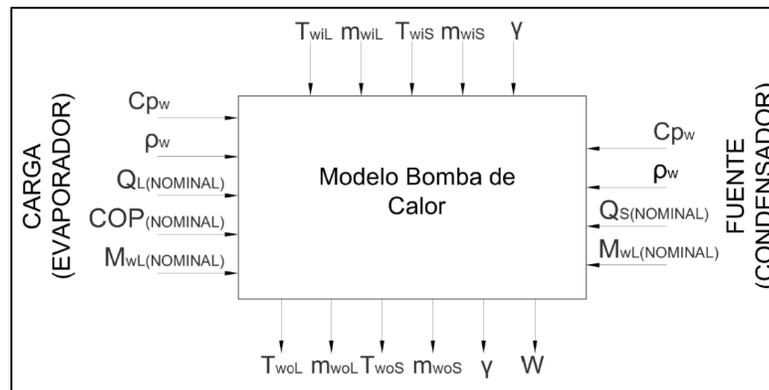


Figura 2.21 Diagrama de flujo para implementación de modelo de Bomba de Calor

La capacidad nominal para la bomba de calor se determina a partir de la ecuación 3:

- Quito:

$$Q_{ASHP,1} = \left(10.11 \times 10^{-3} \frac{L}{s}\right) \left(\frac{1kg}{L}\right) \left(\frac{4.186kJ}{kg.K}\right) (50^{\circ}C - 15.6^{\circ}C)$$

$$Q_{ASHP,1} = 1.46 kW$$

- Guayaquil:

$$Q_{ASHP,2} = \left(10.11 \times 10^{-3} \frac{L}{s}\right) \left(\frac{1kg}{L}\right) \left(\frac{4.186kJ}{kg.K}\right) (50^{\circ}C - 26.4^{\circ}C)$$

$$Q_{ASHP,1} = 0.99 kW$$

Para aplicaciones residenciales, la capacidad mínima que ofrecen los fabricantes de bombas de calor alimentadas por aire corresponde a 1.5 kW. A partir de una revisión exhaustiva para diferentes fabricantes se elige el modelo HUBBEL – PBX65SL que presenta características próximas a los requisitos de almacenamiento y capacidad de calentamiento (Ver Tabla 17).

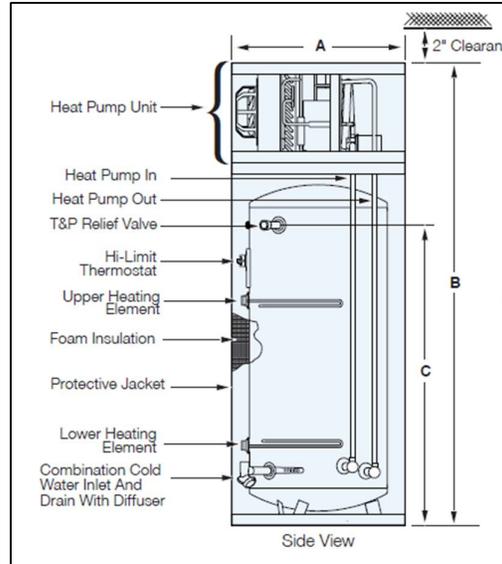


Figura 2.22 Bomba de Calor Aire – Agua Marca HUBBEL

La operación de la bomba de calor es regulada a través de un controlador cuya función es encender el compresor y la bomba de circulación cuando la temperatura en el sensor del fondo del tanque es menor a 40°C. El sistema se apaga cuando esta temperatura alcanza 50°C, el mismo controlador fue empleado para las alternativas 1 y 3 revisadas

anteriormente. La Tabla 18 presenta las principales características del sistema a simular.

Tabla 17
Modelos Bomba Calor Aire - Agua

Storage Capacity (Gallons)	Base Model Number	Dimensions (Inches)				Shipping Weight (lbs.)
		Overall Diameter "A"	Overall Height "B"	Floor to T&P and HW Outlet "C"	Floor to CW Inlet "D"	
40	PBX40SL	28	49	26	9	270
50	PBX50SL	25	66	43	9	325
65	PBX65SL	28	63	40	9	365
80	PBX80SL	28	73.5	50	9	440
119	PBX120SL	30	84	61	9	525

Heating Capacity Chart (BTU/Hr)				
Ambient Air Temp	BTU/Hr Rating in Various Operating Modes			
	Economy	Hybrid	Electric	Super
50°F	3,240	12,965	12,965	16,205
70°F	5,400	12,965	12,965	18,365
90°F	7,020	12,965	12,965	19,985

Tabla 18
Características del modelo para alternativa 3

Bomba de Calor	
Capacidad Nominal	1.5 kW
COP	2
Caudal Recirculación	5 L/min (70 gal/h)
Potencia del Ventilador	680 W
Flujo de Aire	212 L/s (450 CFM)
Tanque de almacenamiento	
Volumen	0.246 m ³ (65 gal)
Aislamiento	R = 1.5 m ² °C/W
Controlador	
ΔT_H	10°C
ΔT_L	5°C
T_{set}	50°C
T_{max}	60°C

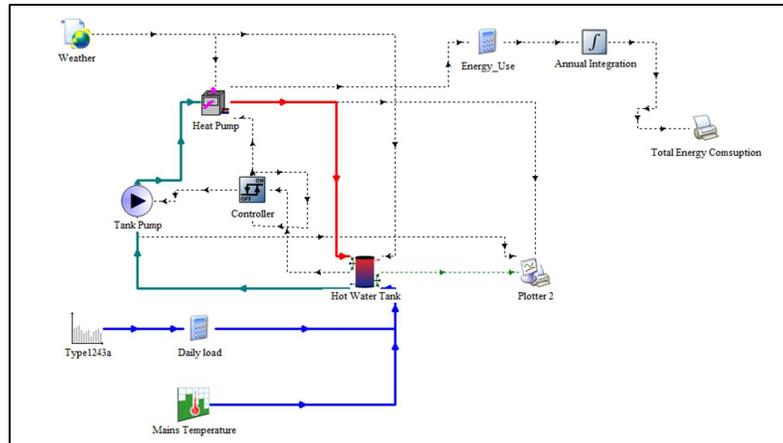


Figura 2.23 Sistema de Calentamiento de Agua por Bomba de Calor alimentada por aire

2.5.6. Alternativa 5 - Calentador de Agua con Batería Térmica.

Esta alternativa representa la integración de una bomba de calor con dos depósitos térmicos para agua caliente y fría con el propósito de proveer calentamiento y enfriamiento simultáneo para una residencia típica. Con esto se pretende aprovechar el enfriamiento de la bomba de calor en el evaporador. En el tanque de agua fría, calor es extraído por la bomba de calor, haciendo las funciones de fuente de energía, mientras que el tanque caliente se emplea como depósito térmico donde se almacena el calor generado por la bomba de calor.

El tanque de agua fría se emplea para evaluar su potencial uso como fuente para servicios de acondicionamiento de espacios. Por esta razón, el modelo contempla la utilización de un intercambiador de calor aire - agua conectado al tanque de almacenamiento. El sistema estudiado en este trabajo se presenta esquemáticamente en la Figura 2.24 (Al-Zahrani, Tan, & Choo, 2012).

El funcionamiento de la bomba de calor está condicionada al perfil de consumo de la Figura 2.7, esto con el propósito de que el tiempo de operación del sistema siga horas de trabajos normales en una residencia.

Como la función primordial del sistema es el calentamiento de agua, la capacidad de la bomba de calor se diseña para satisfacer la demanda de energía térmica para este servicio. En adición, el volumen de los tanques almacenamiento se calcula de tal forma que sean suficientes para proveer la temperatura requerida durante periodos de demanda pico. El dimensionamiento de los dos tanques de almacenamiento y el balance de

la transferencia de calor entre ellos son importantes factores de diseño para mantener temperaturas de servicio aceptables.

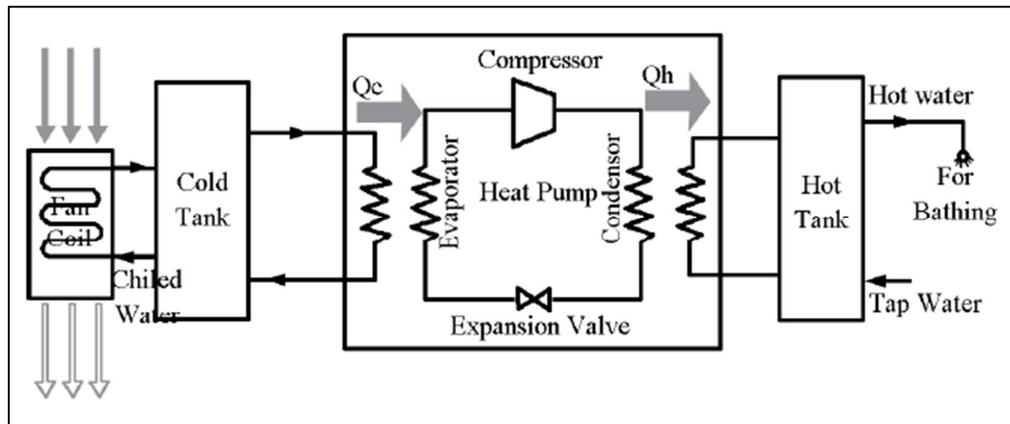


Figura 2.24 Bomba de Calor para calentamiento y enfriamiento simultáneo

Para la simulación del funcionamiento de la bomba de calor agua – agua, se emplea el modelo de una bomba de calor alimentada por un fluido en estado líquido, contenido dentro de la librería estándar de TRNSYS. El componente se basa en un archivo de datos elaborado a partir de catálogos de fabricantes. Este contiene información normalizada de las capacidades de calentamiento y potencia consumida; basadas en las temperaturas y flujos de entrada a la bomba de calor. Las características principales del modelo de bomba de calor agua – agua contenido en TRNSYS y que se emplean en esta alternativa, se presentan a continuación en la Tabla 19.

Tabla 19

Características del modelo de bomba de calor

Bomba de Calor

Capacidad Nominal	4.0 kW
COP	3
Caudal en Lado Carga	28 L/min
Caudal en Lado Fuente	35 L/min

Tanque de almacenamiento

Volumen	0.400 m ³
Aislamiento	R = 1.5 m ² °C/W

Se procede por lo tanto a definir el circuito de agua fría, el cual involucra tres variables: (1) volumen de almacenamiento del tanque frío; (2) flujo de agua de recirculación y (3) flujo de suministro aire.

Un sistema de acondicionamiento de aire implica mezclar aire frío y aire caliente del exterior, antes de que la mezcla entre al recinto acondicionado de una manera estacionaria. El requerimiento mínimo de aire para una construcción residencial se especifica como 0.35 cambios de aire por hora (ASHRAE, 2009). Es decir, debe sustituirse el 35 por ciento de todo el aire que contenga una residencia, por aire fresco de la intemperie, cada hora. La Figura 2.25 muestra el diagrama de un sistema de aire acondicionado con retorno.

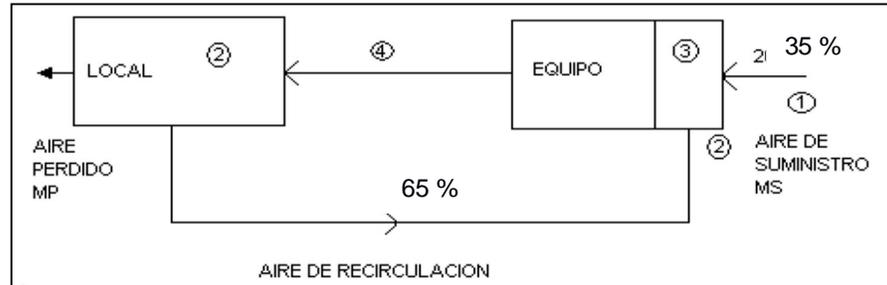


Figura 2.25 Diagrama de un sistema de aire acondicionado con retorno

Dónde:

- 1: Aire de suministro
- 2: Condición local
- 3: Condiciones de mezcla
- 4: Aire a la salida del equipo

Para determinar el flujo de suministro de aire en el intercambiador de calor, tomamos como referencia lo especificado por Wang (Wang, 2001) en su publicación *“Air Conditioning and Refrigeration”*, en ella se especifica un procedimiento para el cálculo de cargas térmicas, el cual se puede resumir por las siguientes expresiones:

$$\dot{Q}_{AC} = \dot{Q}_{se} + \dot{Q}_l \quad (13);$$

$$\dot{Q}_{se} = \dot{V}_{air} \rho_{air} c_{p,air} (T_4 - T_2) \quad (14);$$

$$\dot{Q}_l = \dot{V}_{air} \rho_{air} (w_2 - w_4) h_{fg} \quad (15);$$

$$RCS = \frac{\dot{Q}_{se}}{\dot{Q}_{se} + \dot{Q}_l} = \frac{c_{p,air} (T_4 - T_2)}{h_4 - h_2} \quad (16)$$

Dónde:

$\dot{Q}_{AC} \equiv$ Carga térmica Total, kJ/s

$\dot{Q}_{se} \equiv$ Carga térmica sensible, kJ/s

- $Q_l \equiv$ Carga térmica latente, kJ/s
- $RCS \equiv$ Relación de calor sensible
- $\dot{V}_{air} \equiv$ Flujo volumétrico de suministro de aire, m³/s
- $\rho_{air} \equiv$ Densidad del aire de suministro, 1.2 kg/m³
- $T_2 \equiv$ Temperatura de entrada del aire en intercambiador, °C
- $T_4 \equiv$ Temperatura de salida del aire en intercambiador, °C
- $w_4 \equiv$ Radio de humedad de salida del aire en intercambiador, kg/kg
- $w_2 \equiv$ Radio de humedad de entrada del aire en intercambiador, kg/kg
- $h_4 \equiv$ Entalpía de salida del aire en intercambiador, kJ/kg
- $h_2 \equiv$ Entalpía de entrada del aire en intercambiador, kJ/kg
- $h_{fg} \equiv$ Calor latente de vaporización a 32 °F (0 °C), 2483 kJ/kg

La figura 2.26 (ASHRAE, 2009) presenta el efecto de diferentes parámetros psicométricos en el nivel de confort térmico de un individuo. De este gráfico se puede inferir para alcanzar un estado de comodidad el aire suministrado por un sistema para acondicionamiento de aire debe estar en el rango de 70 a 75°F (21 a 24 °C). Valores altos de humedad tienden a incrementar también la sensación de estrés térmico, por lo que ASHRAE recomienda humedades relativas que no superen el 60% y un radio de humedad máximo de 0.012 lb_{H2O}/lb_{aire}. Aplicando estos lineamientos con una temperatura de suministro o salida del intercambiador igual a 24°C (75°C) se procede a determinar el flujo o suministro de aire.

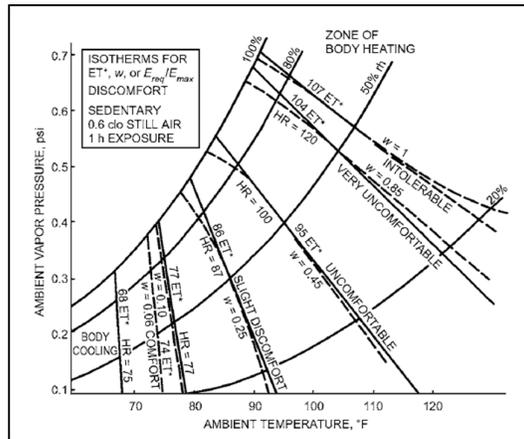


Figura 2.26 Efecto del ambiente térmico en el estrés térmico

A partir de información revisada en los anuarios meteorológicos (INAMHI, 2012), se obtienen valores de temperatura y humedad relativa máxima promedio de 31.4°C y 72% respectivamente, ambos en función de una base anual.

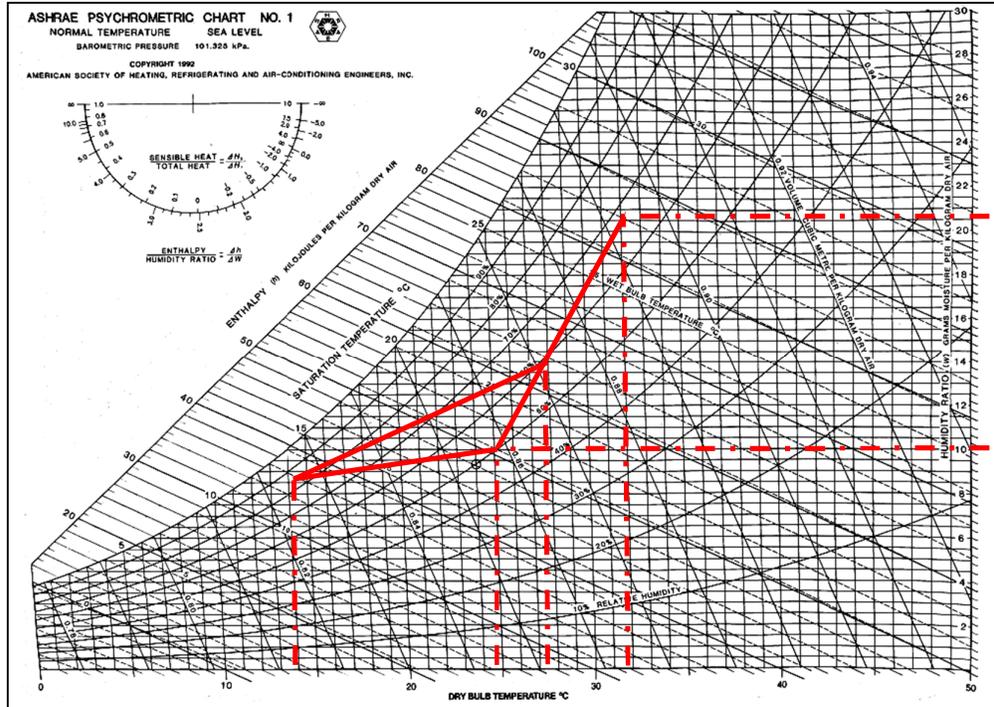


Figura 2.27 Carta Psicométrica ASHRAE No. 1

Definidas las condiciones interiores y exteriores, es posible determinar las condiciones de mezcla del aire en la entrada del intercambiador:

$$T_m = \frac{m_2 T_2 + m_1 T_1}{m_1 + m_2} \quad (17)$$

$$T_m = \frac{(0.65)(24^\circ\text{C}) + (0.35)(31.4^\circ\text{C})}{0.65 + 0.35}$$

$$T_m = 26.6^\circ\text{C}$$

Estos valores sirven como entrada para la carta psicométrica que se muestra en la Figura 2.27 (ASHRAE, 2009), las cuales permiten determinar los estados 1, 2 y 3.

	T_{bs} (°C)	T_{bh} (°C)	Humedad Relativa (%)	Entalpía (KJ/kg)	W (kg _{water} /kg _{air})	V (m ³ /kg)
1	31.4	27	72	85	0.0205	0.8920
2	24	18	60	50	0.0102	0.8550
3	26.6	19.7	50	64	0.0113	0.8700

Se calcula la temperatura de inyección por medio de la carta psicométrica, obteniendo un valor T_4 igual a 13.3°C. El propósito de emplear un tanque

de agua fría es remplazar una unidad de acondicionamiento de aire residencial típica, para lo cual, se asume una capacidad del acondicionador igual a 12000 BTU/h con una relación de calor sensible RCS igual a 0.75. Se tiene entonces:

$$RCS = 0.75$$

$$RCS = \frac{c_{p,air}(T_4 - T_2)}{h_4 - h_2} \therefore h_4 = \left(h_2 - \frac{c_{p,air}(T_4 - T_2)}{RCS} \right)$$

$$h_4 = \left[50 \frac{kJ}{kg} - \frac{\left(1 \frac{kg}{kg^\circ C} \right) (24^\circ C - 13.3^\circ C)}{0.75} \right]$$

$$h_4 = 35.73 \frac{kJ}{kg}$$

Finalmente, reordenando la ecuación (14) se puede calcular el flujo de suministro de aire

$$\dot{V}_{air} = \frac{\dot{Q}_{se}}{\rho_{air} c_{p,air} (T_4 - T_2)}$$

$$\dot{V}_{air} = \frac{0.75 \left[12000 \frac{BTU}{h} \times \frac{1h}{3600s} \times \frac{1.05 kJ}{1 BTU} \right]}{\left(0.855 \frac{kg}{m^3} \right) \left(1 \frac{kJ}{kg^\circ C} \right) (24^\circ C - 13.3^\circ C)}$$

$$\dot{V}_{air} = 0.287 \frac{m^3}{s} \equiv 608 CFM$$

$$\therefore \dot{m}_{air} = 245 \frac{kg}{s} \equiv 883 \frac{kg}{h}$$

El suministro de aire debe cumplir también la función de diluir olores y contaminantes, así como ciertos requisitos metabólicos de los ocupantes de forma que se mantenga una calidad de aire aceptable del aire en el recinto o habitación.

Cuando se emplea ventilación por dilución como mecanismo de control de aire en un recinto, la producción de CO₂ (\dot{V}_{CO_2}) de un ocupante sedentario es 0.3 L/min (0.0106 cfm). La cantidad de aire exterior requerido por cada ocupante $\dot{V}_{o,oc}$ puede ser calculada por:

$$\dot{V}_{o,oc} = \frac{\dot{V}_{CO_2}}{C_{i,CO_2} - C_o} \quad (18)$$

Donde $C_{i,CO_2} - C_o$ representa la diferencia de concentración entre el aire exterior e interior, típicamente este valor no supera los 700 ppm, obtenemos entonces:

$$\begin{aligned} \dot{V}_{o,oc} &= \frac{0.0106}{0.0007} \\ &\approx 15 \text{ cfm} \equiv \frac{7 \text{ L/s}}{\text{persona}} \times 3 \text{ personas} = 21 \text{ L/s} \end{aligned}$$

Vemos que el flujo de suministro de aire cumple con el límite mínimo permisible para evitar la contaminación de un recinto o habitación por concentración de CO_2 .

Por otro lado, el flujo de agua fría en el intercambiador de calor puede estimarse a partir de un balance de energía básico:

$$\dot{Q}_{AC} = \dot{m}_{ws} c_{p,H_2O} (T_{cold,out} - T_{cold,in}) \quad (19)$$

Dónde:

\dot{m}_{air} \equiv Flujo másico de aire en Intercambiador de calor kg/h

$c_{p,air}$ \equiv Calor específico del aire, 1.0 kJ/(kg.K)

\dot{m}_{ws} \equiv Flujo másico de agua en el intercambiador de calor

c_{p,H_2O} \equiv Calor específico del agua 4.198 kJ/(kg.K)

$T_{cold,in}$ \equiv Temperatura de salida del agua en el tanque frío, °C

$T_{cold,out}$ \equiv Temperatura de salida del agua en el intercambiador de calor, °C

Asumiendo temperaturas de 12°C y 16°C para el agua entrando y saliendo del intercambiador de calor respectivamente, se tiene:

$$\dot{m}_{ws} = \frac{\left[12000 \frac{BTU}{h} \times \frac{1h}{3600s} \times \frac{1.05 kJ}{1 BTU} \right]}{\left(\frac{4.186 kJ}{kg \cdot K} \right) (16^\circ C - 12^\circ C)}$$

$$\dot{m}_{ws} = 0.209 \text{ kg/s}$$

Esto es equivalente a un flujo másico de 752 kg/hr.

Para el volumen del tanque de agua frío, se presume una operación de diaria de 8 am a 7 pm, compatible con un sistema típico de acondicionamiento de aire. Con esta información se dimensiona la

capacidad del tanque de almacenamiento para un abastecimiento de al menos 1 hora y con un 75% de volumen útil de almacenamiento:

$$S_{c,s} = \frac{752 \frac{L}{h} \times 1h}{0.75} \quad (20)$$

$$S_{c,s} = 1000 L$$

Consecuentemente el volumen de almacenamiento para el tanque de agua fría $S_{c,s}$ se define igual a 1 m^3 . La Tabla 20 muestra las capacidades y características de los equipos usados en el modelo.

La estrategia de control que regula la operación del sistema se realiza mediante dos termostatos diferenciales de similares características a los que se emplean para las alternativas 1, 3 y 4. TRNSYS simulará la presencia de dos controlares para monitorear las temperaturas en los tanques de almacenamiento de agua fría y caliente, generando una señal de salida que será usada como condición para la operación de la bomba de calor. El resultado del proceso de modelado en TRNSYS se ilustra en la Figura 2.28.

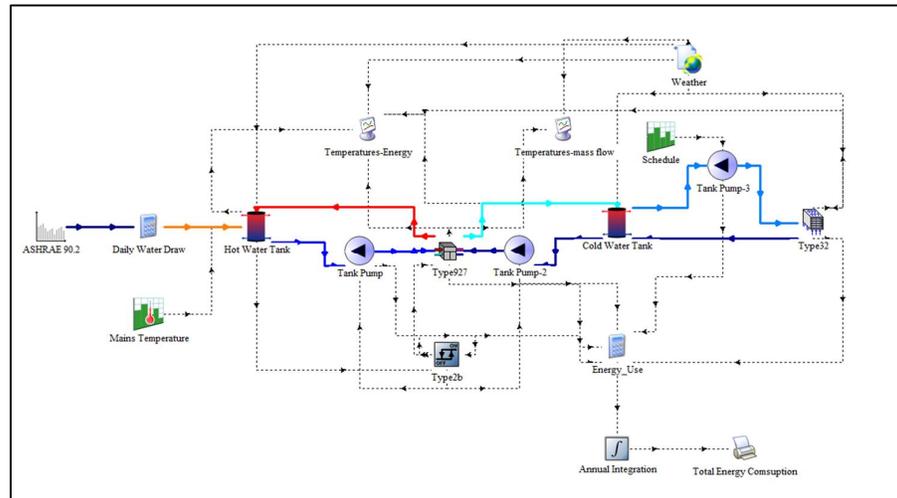


Figura 2.28 Esquema de Alternativa 5 - TRNSYS.

Tabla 20
Características del modelo para alternativa 5

Bomba de Calor	
Capacidad Nominal	4 kW
COP	3
Caudal Agua en circuito Carga	1700 L/h
Caudal Agua en circuito Fuente	2100 L/h
Bomba Circuito Frío	0.375 kW
Flujo másico de agua en intercambiador de calor	752 kg/h
Flujo másico de aire	883 kg/h
Tanque de almacenamiento caliente	
Volumen	0.4 m ³
Aislamiento	R = 1.5 m ² C/W
Tanque de almacenamiento frío	
Volumen	1 m ³
Aislamiento	R = 1.5 m ² C/W
Controlador	
ΔT_H	10°C
ΔT_L	5°C
T_{set}	50°C
T_{max}	60°C

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS

Las fases de análisis y evaluación de resultados se encargan de reconocer la naturaleza multidimensional de la aplicación que se investiga, poniendo énfasis en las dimensiones energéticas y económicas. Este capítulo presenta los resultados de las simulaciones y comparaciones del ahorro energético de cinco diferentes configuraciones para producir agua caliente en una residencia compuesta por tres habitantes. Las simulaciones se llevan a cabo para un año completo, a partir de una escala de tiempo de una hora.

El alcance del presente trabajo no incluye los aspectos sociales y de comportamiento aplicables al proyecto.

3.1. Análisis Comparativo de las Alternativas

Los resultados de los modelos simulados se muestran en la Figuras 3.1 a 3.19. Las curvas que se presentan hacen referencia a las temperaturas y tasas de transferencia de calor para un periodo comprendido entre el 1 al 7 (168 horas) de Enero de un año típico meteorológico. Se elige el mes de enero al ser este representativo de condiciones meteorológicas promedio, donde típicamente no se presentan temperaturas picos inferiores o superiores.

Finalmente se presentan los resultados anuales de temperatura de suministro, temperatura ambiente y energía consumida para cada alternativa estudiada.

Alternativa 1 – Calentador de Acumulación por Resistencia Eléctrica

La Figuras 3.1 y 3.2 muestran el historial de las temperaturas de entrega (Top Tank) y promedio en el tanque de almacenamiento para el calentador por resistencia eléctrica. Además se muestra la temperatura ambiental y la tasa de calentamiento (heating rate) del sistema. De las gráficas se puede deducir la efectividad del sistema de control empleado en la operación del sistema, garantizando que la temperatura de entrega al punto de uso final no sea inferior a los 45°C.

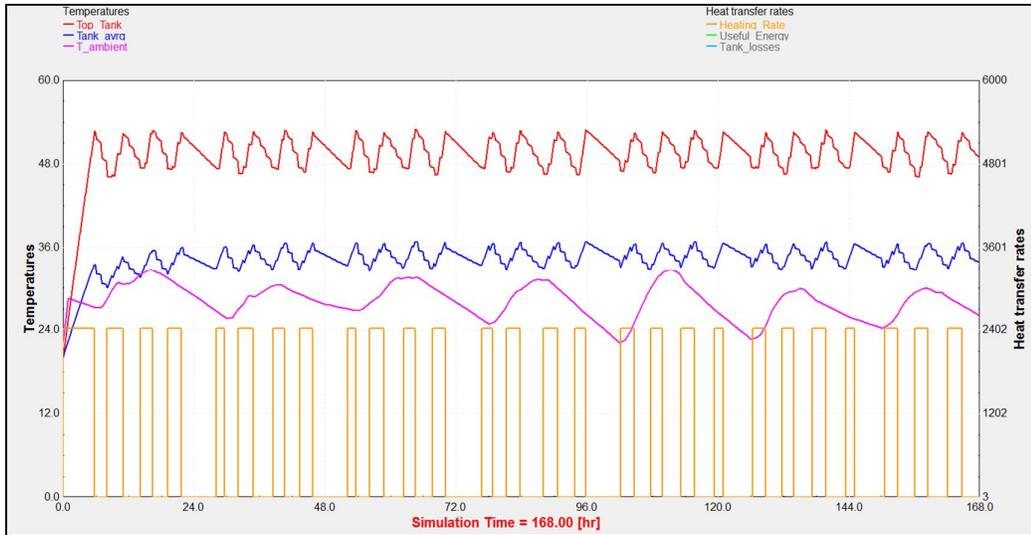


Figura 3.1 Resultados Calentador Eléctrico por Acumulación - Guayaquil

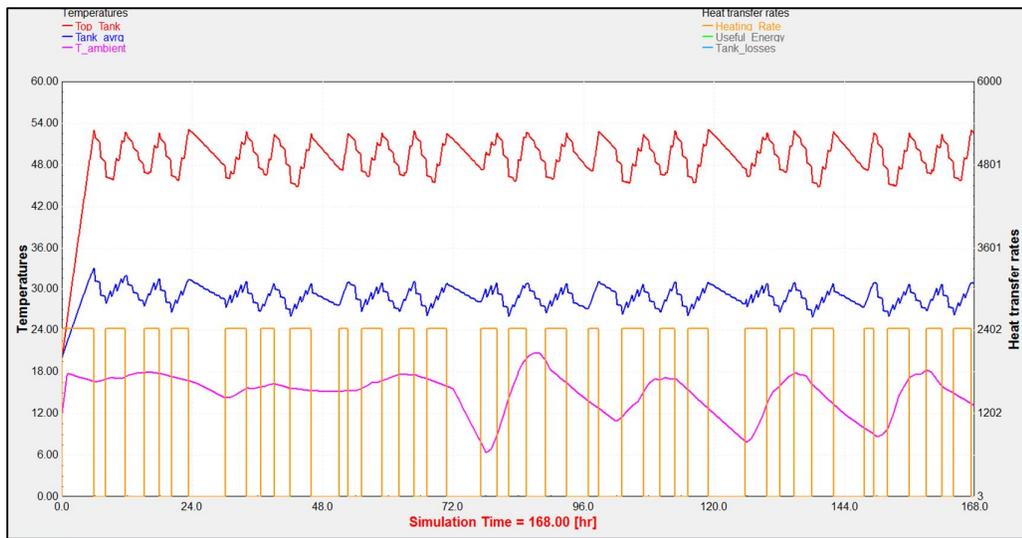


Figura 3.2 Resultados Calentador Eléctrico por Acumulación - Quito

Adicionalmente, las Figuras 3.1 y 3.2 ilustran el hecho que parte de energía térmica en el tanque de almacenamiento se conserva hasta el siguiente día, por lo que las resistencias de inmersión en el tanque solo se encenderán al día siguiente, cuando la temperatura alcance su límite inferior permisible.

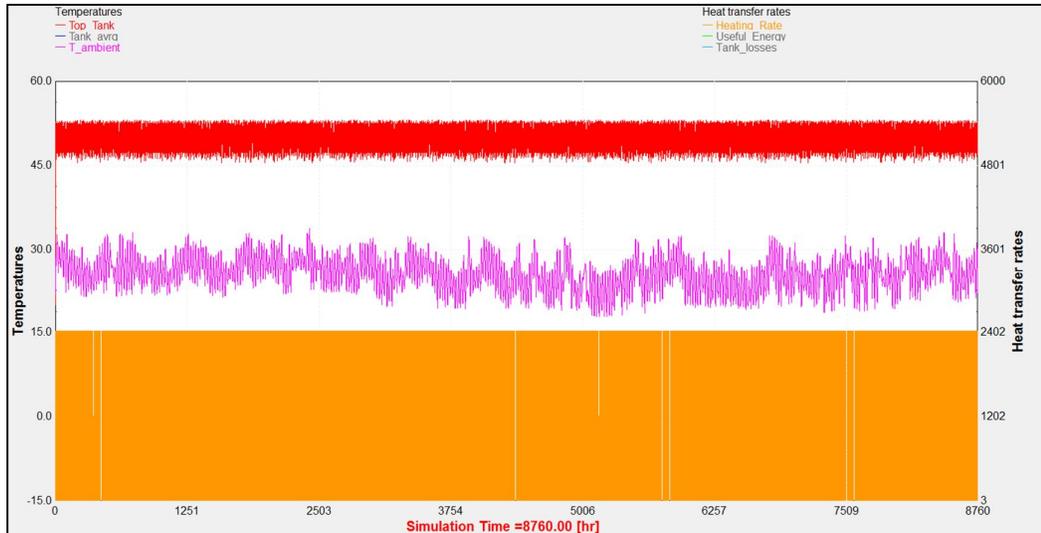


Figura 3.3 Resultado anual para Calentador Eléctrico por Acumulación - Guayaquil

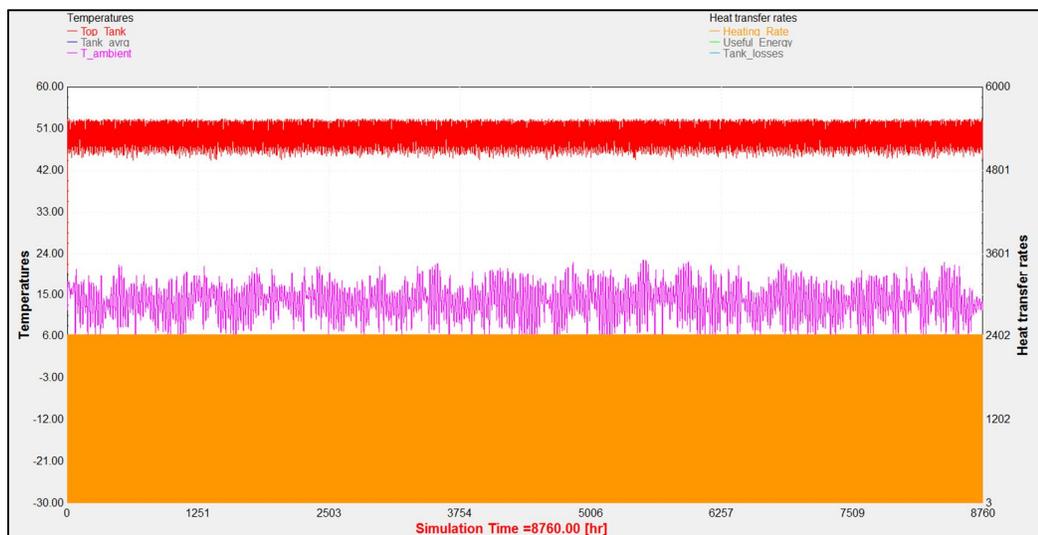


Figura 3.4 Resultado anual para Calentador Eléctrico por Acumulación - Quito

Alternativa 2 - Calentador Instantáneo Alimentado por GLP

Para la alternativa 2, se puede inferir fácilmente la influencia que tiene la temperatura de la red pública de agua potable, esto provoca un aumento en el consumo pico de energía, alcanzando los 7 kW en la ciudad de Quito en comparación con un pico de 4.2 kW presente en la ciudad de Guayaquil. Esto es consecuencia de la naturaleza instantánea del proceso de calentamiento, lo que se ve reflejado también en amplias fluctuaciones en las temperaturas de mezcla resultantes.

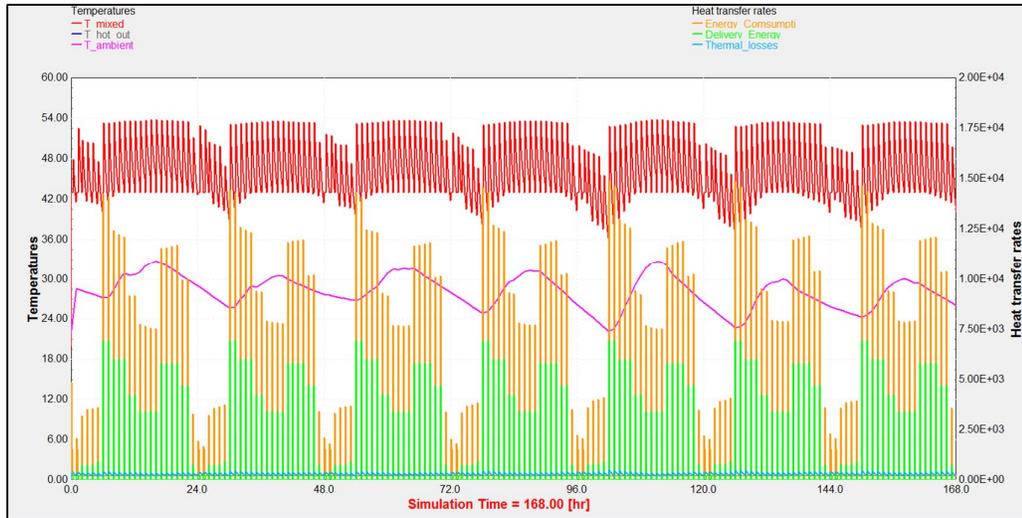


Figura 3.5 Resultados Calentador Instantáneo por GLP - Guayaquil

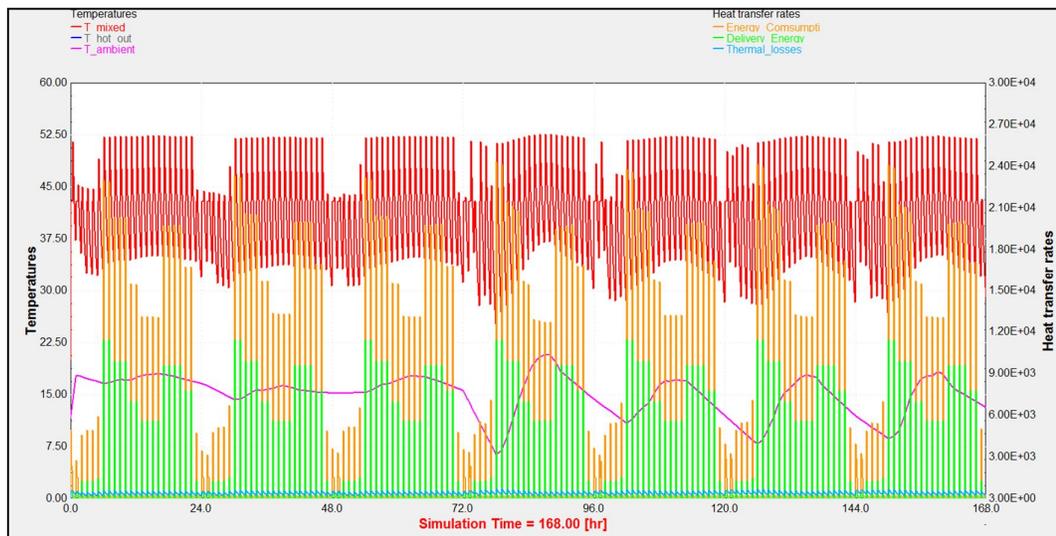


Figura 3.6 Resultados Calentador Instantáneo por GLP – Quito

Durante cada ciclo de encendido, el calentador instantáneo experimenta pérdidas de energía (asociadas con el encendido del quemador y calentamiento del intercambiador de calor), convirtiendo al número de arranques, en un elemento crítico para la determinación del consumo de energía para el calentamiento de agua.

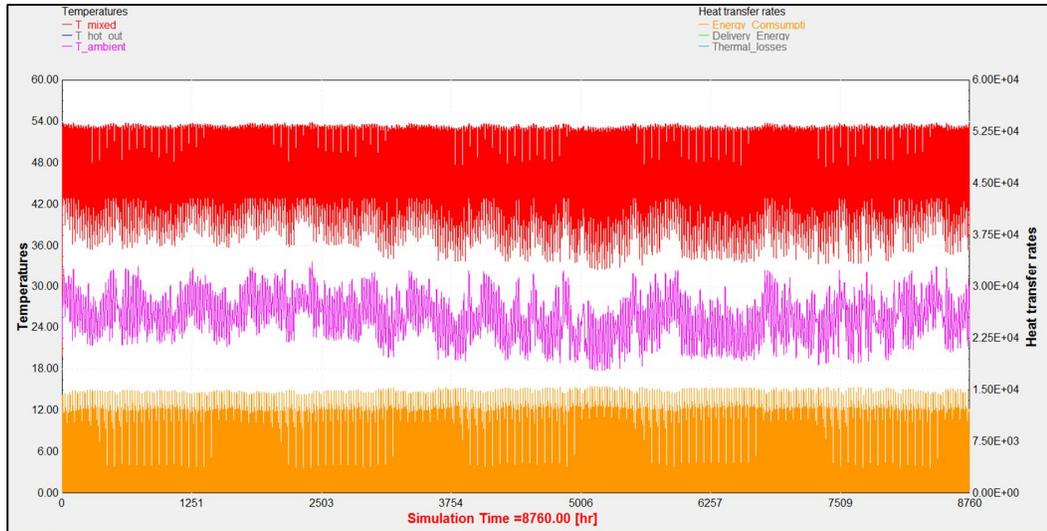


Figura 3.7 Resultado anual Calentador Instantáneo por GLP – Quito

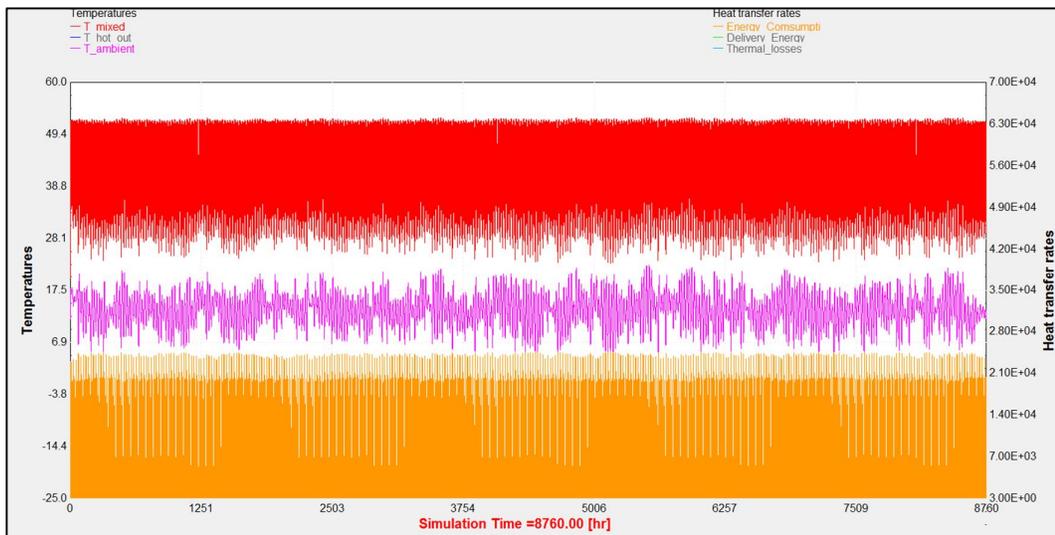


Figura 3.8 Resultados Calentador Instantáneo por GLP - Quito

Alternativa 3 - Calentador de Agua Termo solar

La alternativa tres, que hace referencia a un calentador termo solar se muestra en las Figuras 3.5 y 3.6. En estas se pueden revisar los siguientes parámetros:

- Temperatura de entrega para uso final, TDWH.
- Temperatura promedio en tanque de almacenamiento, Tank_avg
- Temperatura en el fondo del tanque de almacenamiento, TBottom.
- Temperatura del agua en la salida del colector, ToColl.

- Calentamiento Auxiliar, Q_{Aux}
- Energía Sensible transferida al agua en el colector, G_{Coll} .

De los resultados se puede deducir que aunque el panel termo solar aporta con una mayor cantidad de energía durante la operación del calentador, debido a la naturaleza discontinua y variable de la irradiación incidente, esta energía resulta insuficiente para cumplir con el suministro de agua caliente, siendo incapaz de superar rangos de temperatura que vayan más allá de los 40°C.



Figura 3.9 Resultados Calentador Termo solar con resistencia de respaldo - Guayaquil

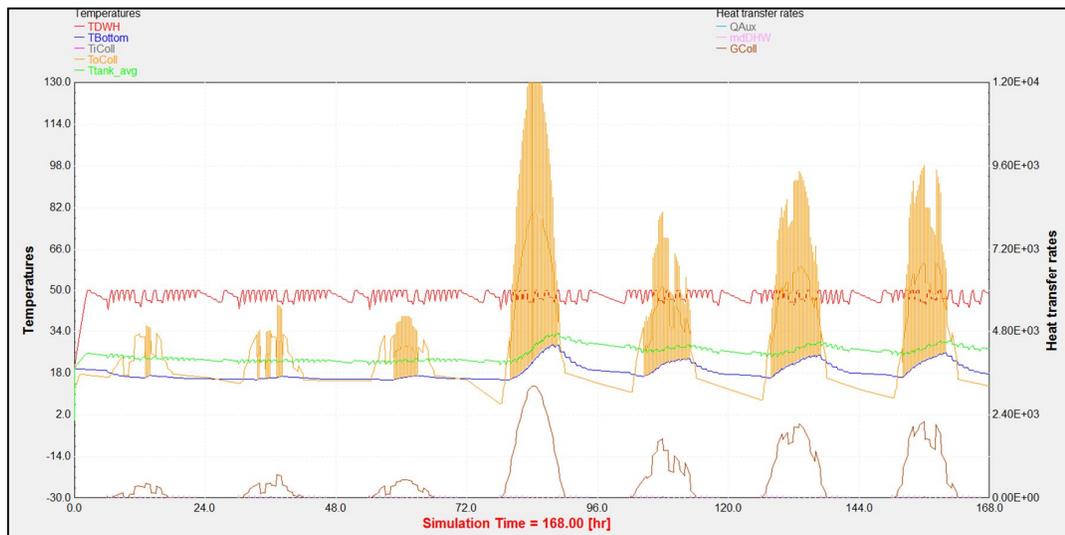


Figura 3.10 Resultados Calentador Termo solar con resistencia de respaldo - Quito

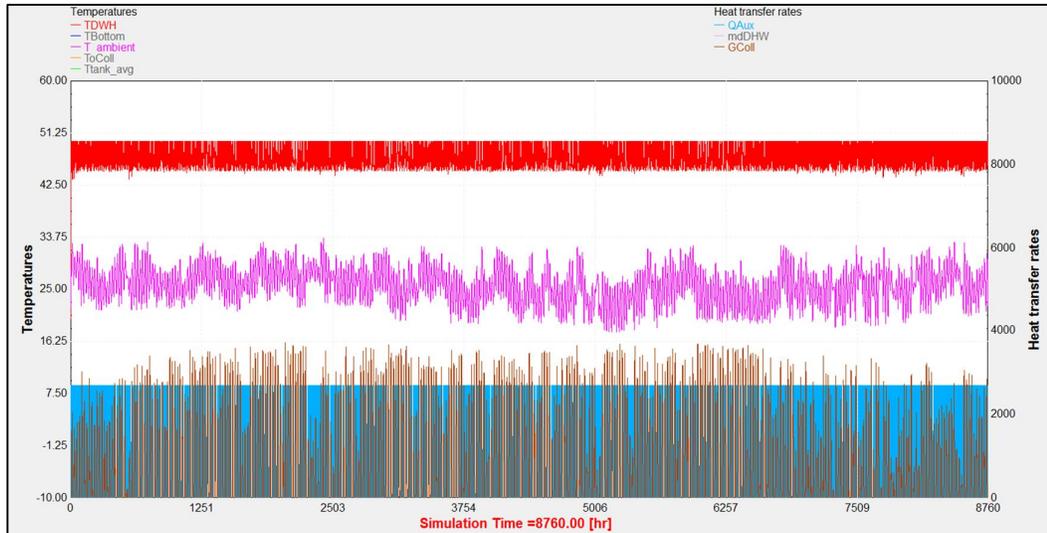


Figura 3.11 Resultado anual Calentador Termo solar con resistencia de respaldo - Guayaquil

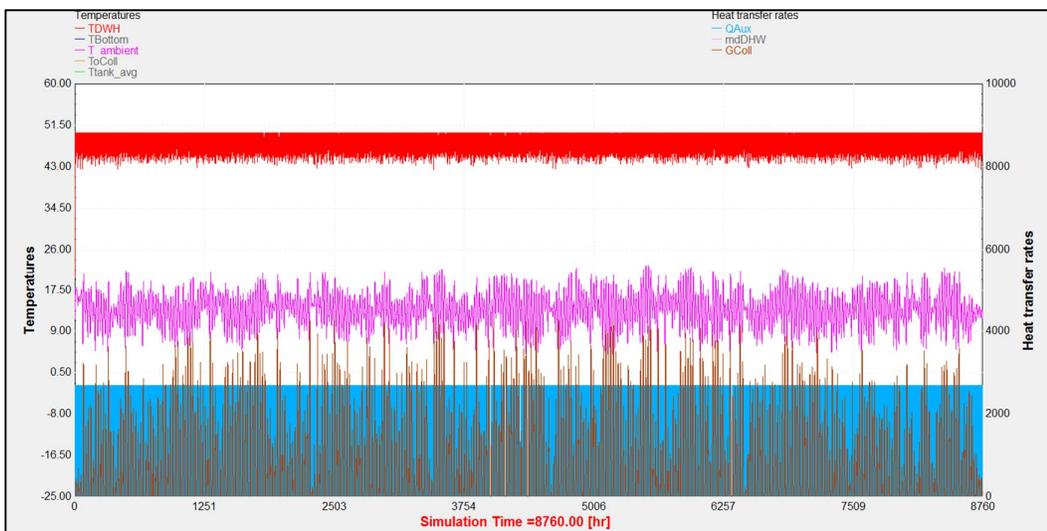


Figura 3.12 Resultado anual Calentador Termo solar con resistencia de respaldo - Quito

Alternativa 4 - Calentador por Bomba de Calor Alimentada por Aire

Las Figuras 3.13 y 3.14 muestran los resultados para la bomba de calor alimentada por aire. Una rápida mirada permite adquirir una idea de la magnitud de la influencia de la temperatura del aire en la eficiencia del sistema. En general, puede evidenciarse que la bomba de calor alimentada por aire posee un mayor rendimiento en zonas con temperaturas ambientales altas como Guayaquil.

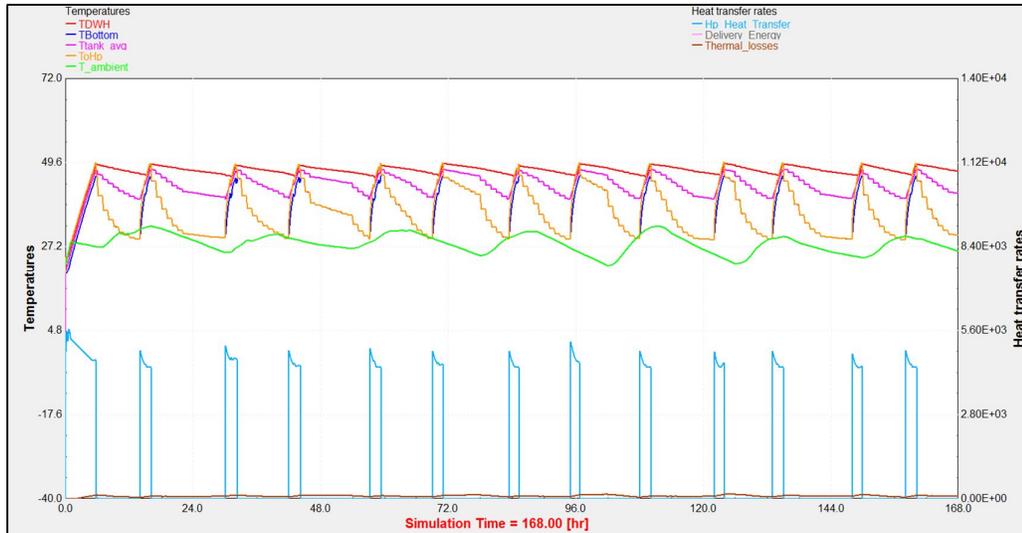


Figura 3.13 Resultados Calentador por Bomba de Calor alimentada por aire - Guayaquil

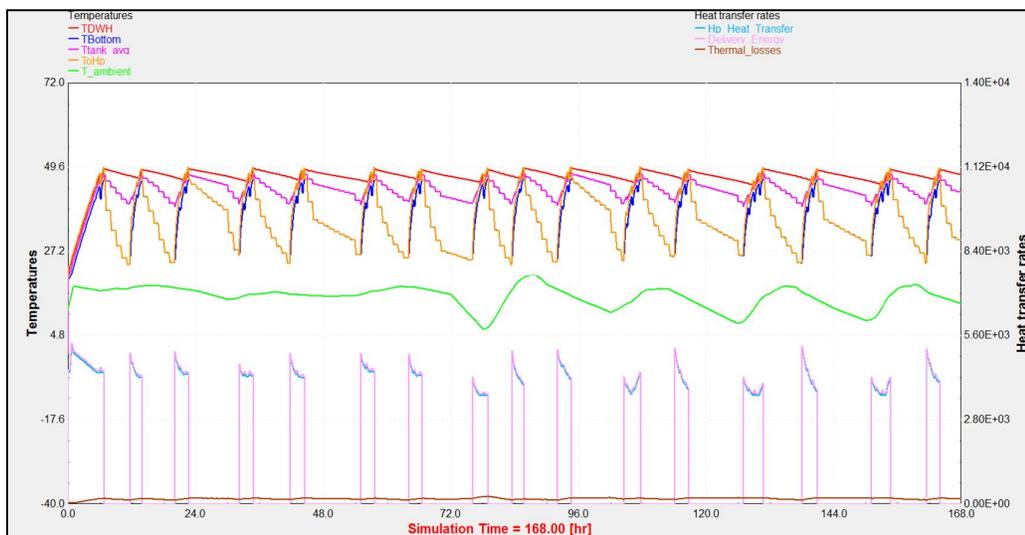


Figura 3.14 Resultados Calentador por Bomba de Calor alimentada por aire – Quito

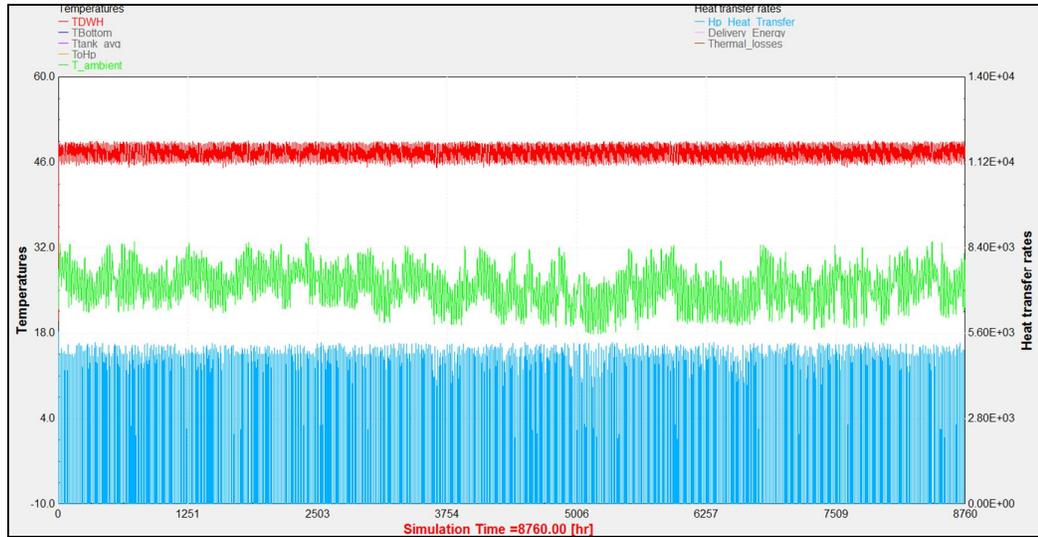


Figura 3.15 Resultado anual Calentador por Bomba de Calor alimentada por aire - Guayaquil

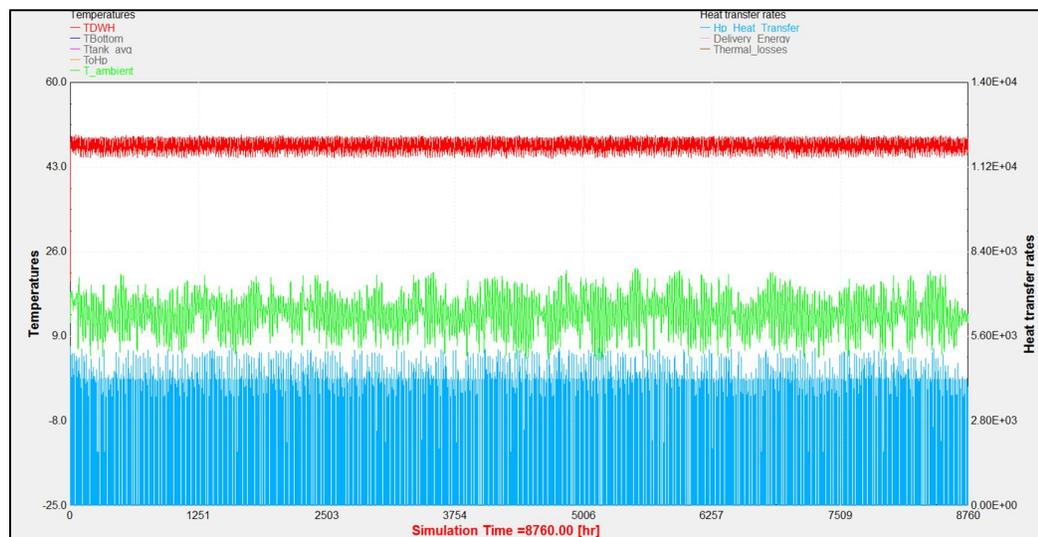


Figura 3.16 Resultado anual Calentador por Bomba de Calor alimentada por aire - Quito

Alternativa 5 - Calentador de Agua con Batería Térmica

Los resultados de la simulación en la Figura 3.17 (Guayaquil) muestran que con el empleo de un tanque de almacenamiento de agua fría; aire puede ser enfriado entre los 20 a 24°C durante el día, cuando el calentador opera en máxima demanda. La temperatura ambiental en conjunto con otros parámetros meteorológicos usados en el modelo fueron provistos por Meteonorm y aplicados en el entorno de TRNSYS.

Para la temperatura del aire de suministro, se debe prestar atención a los periodos que corresponden de 8:00 am a 19:00 pm, donde el aire será enfriado en el intercambiador para producir aire frío a ser empleado en un recinto. Cambios repentinos en la temperatura del aire se observan durante los periodos de arranque y detenido del enfriador de aire.

Los cambios en la temperatura del tanque de agua frío durante el encendido y apagado son de menor magnitud durante la operación nocturna en comparación con la del día, debido principalmente a la poca variación en la demanda de agua caliente durante ese periodo.

La diferencia en los tamaños de los tanques de almacenamiento es consecuencia del desbalance de las cargas térmicas de calentamiento y enfriamiento. La bomba de calor se emplea para enfriar un recinto, y al mismo tiempo para proveer agua caliente sanitaria. La carga térmica debida al calentamiento de agua es menor en comparación con la carga de enfriamiento, debido a esto se emplea un tanque de almacenamiento frío de mayor tamaño.

La producción de agua caliente mediante Batería térmica representa la alternativa con menor demanda de energía eléctrica con un máximo de 2.26 kW y 2.18 kW para Guayaquil y Quito respectivamente. Esto representa una reducción en comparación con los 4.2 kW y 7kW obtenidos para la alternativa 2 de al menos un 50% en la demanda de energía eléctrica por hogar.

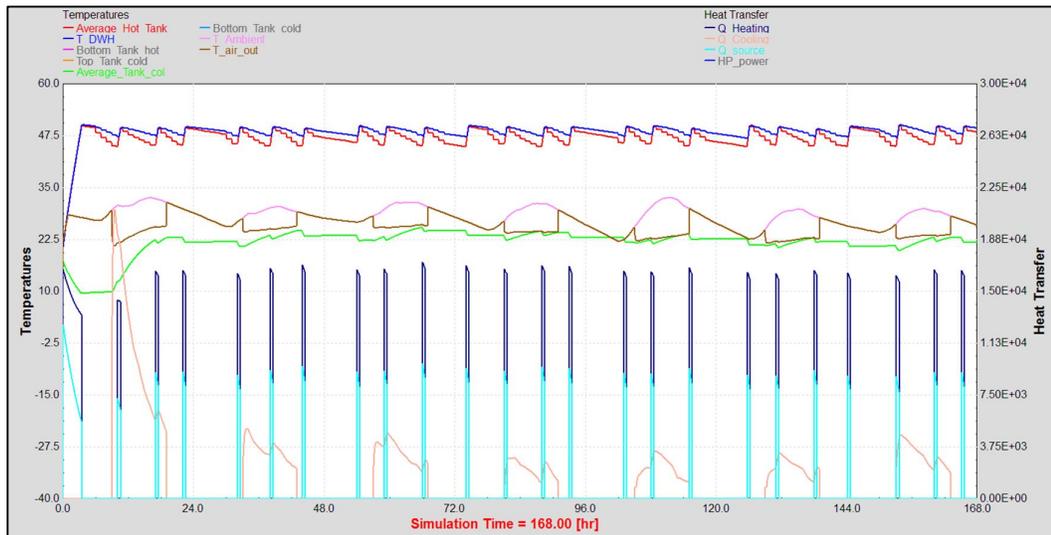


Figura 3.17 Resultados Calentador por Batería Térmica - Guayaquil

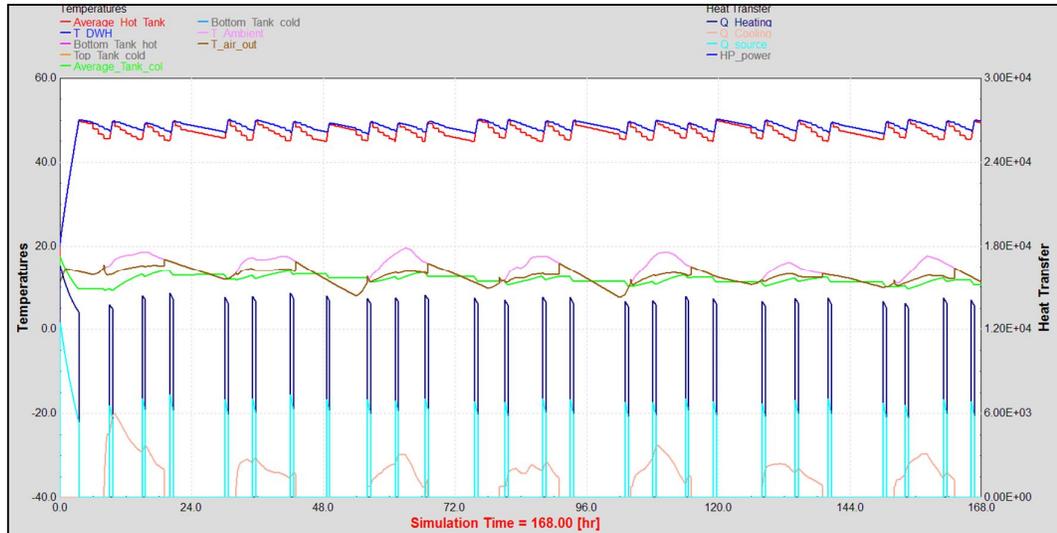


Figura 3.18 Resultados Calentador por Batería Térmica – Quito

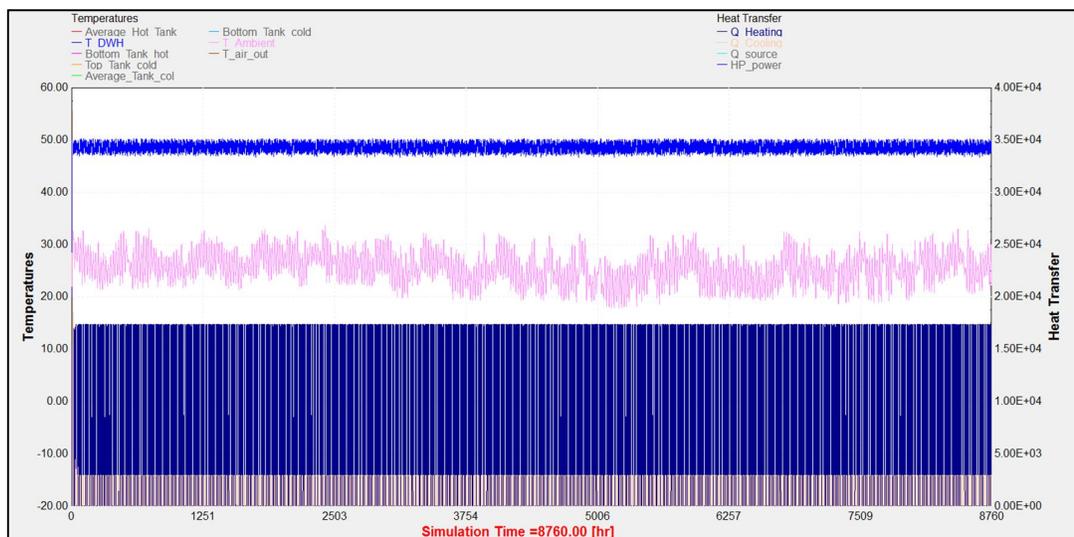


Figura 3.19 Resultado anual Calentador por Batería Térmica - Guayaquil

3.1.1. Consumo de Energía

La tabla 21 muestra en resumen los flujos de energía que se obtuvieron para las alternativas estudiadas en Guayaquil y Quito. Para la localidad de Quito, el calentamiento de agua por calefón requiere 4 978 kWh de electricidad por año, mientras que empleando una bomba de calor alimentada por aire esta actividad se puede realizar con un 53% menos de electricidad (2291 kWh). La producción de agua caliente con colectores solares requiere solo 2316 kWh de energía eléctrica, mientras la combinación de bomba de calor con almacenamiento térmica consume

640 kWh, esta última es capaz de proveer dos servicios de forma simultánea.

Tabla 21
Consumos de Energía Anuales

Descripción		Energía Consumida kWh	Energía Entregada kWh
C. Resistencia Eléctrica	Quito	3 103.59	2 793.23
	Guayaquil	2 379.84	2 141.86
C. Instantáneo GLP	Quito	4 978.49	3 023.69
	Guayaquil	3 265.92	1 996.14
C. Termo solar	Quito	2 316.63	2 303.78
	Guayaquil	1 369.35	1 588.00
Bomba de calor alimentada por aire	Quito	2 291.61	2 735.53
	Guayaquil	1 192.85	1 800.49
Batería Térmica	Quito	1 609.21	5 439.87
	Guayaquil	970.86	4 482.97

Como muestran las Figuras 3.20 y 3.21, el ranking de las cinco alternativas para Guayaquil es el mismo que para Quito. Un calentador por batería térmica representa la mejor alternativa desde un punto de vista de consumo energético con apenas 970.86 kWh para Guayaquil y 1 609 kWh para Quito. La bomba de calor alimentada por aire le sigue de cerca con 1 192 y 2 291 kWh. En este caso particular, es importante notar que la batería térmica disminuye las necesidades de acondicionamiento de espacios, mientras que la bomba de calor alimentada por aire únicamente provee servicio de calentamiento de agua.

Una comparación entre las localidades de Guayaquil y Quito indica que un calentador por batería térmica requiere un 40% menos de energía eléctrica en Guayaquil. Esto se debe principalmente a las características climáticas (clima cálido) y a una temperatura de red de agua pública promedio más alta.

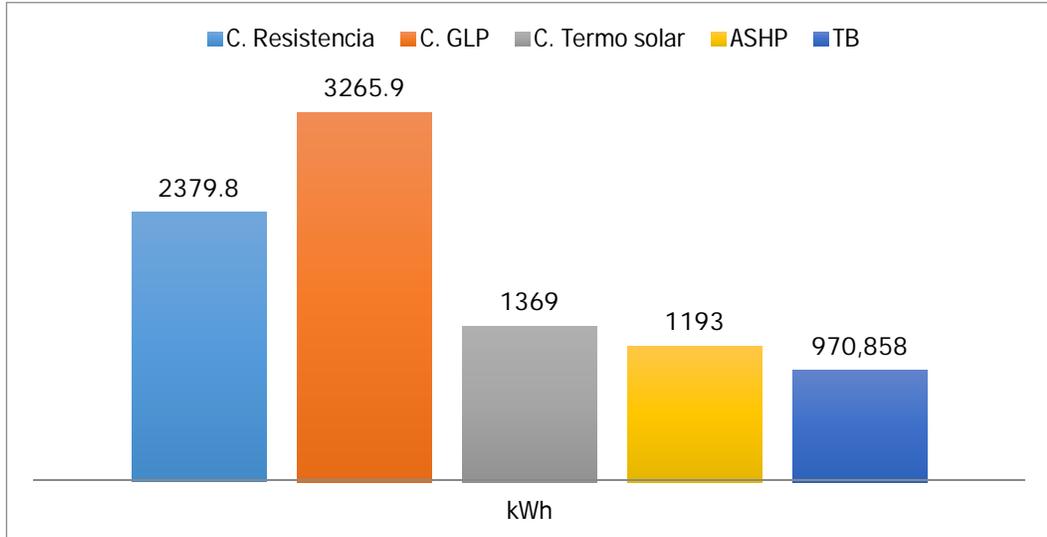


Figura 3.20 Consumo Anual de Energía para diferentes medios de producir agua caliente - Guayaquil

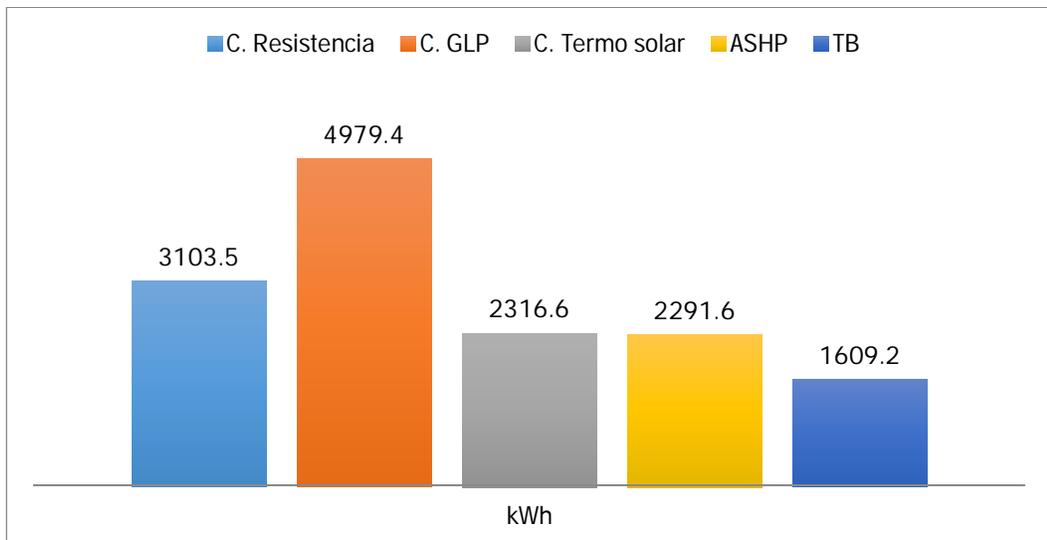


Figura 3.21 Consumo Anual de Energía para diferentes medios de producir agua caliente - Quito

3.1.2. COP – Coeficiente de Rendimiento

Las Figuras 3.22 y 3.23 presentan el rendimiento promedio anual \overline{COP} anual de las cinco alternativas estudiadas. El valor más bajo de COP se alcanza para el calentador alimentado por GLP, seguido por el calentador de acumulación por resistencia eléctrica. El calentador de agua por batería térmica representa la alternativa más atractiva alcanzando un valor de COP promedio anual de 4.62 para Guayaquil y 3.38 para Quito.

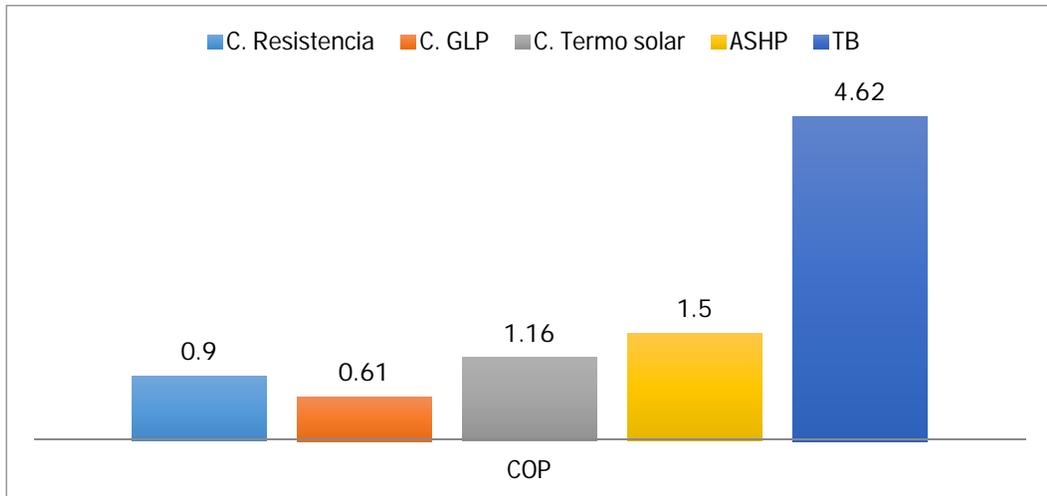


Figura 3.22 COP Anual - Guayaquil

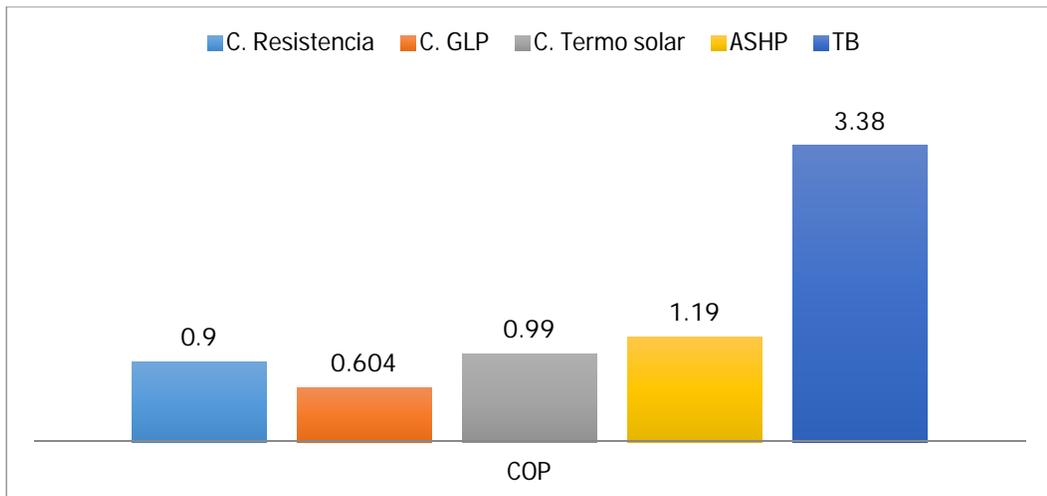


Figura 3.23 COP Anual - Quito

3.2. Emisiones de CO₂

Para el cálculo de emisiones de toneladas de CO₂ se ha tomado en consideración los factores de emisión tanto para la generación termoeléctrica de electricidad como para la combustión de G.L.P, siendo 0.5289 kg CO₂/kWh y 5.56 kg CO₂ / gal GLP respectivamente.

Las Figuras 3.24 y 3.25 muestran los resultados de emisiones de CO₂ para diferentes medio de producción de agua caliente.

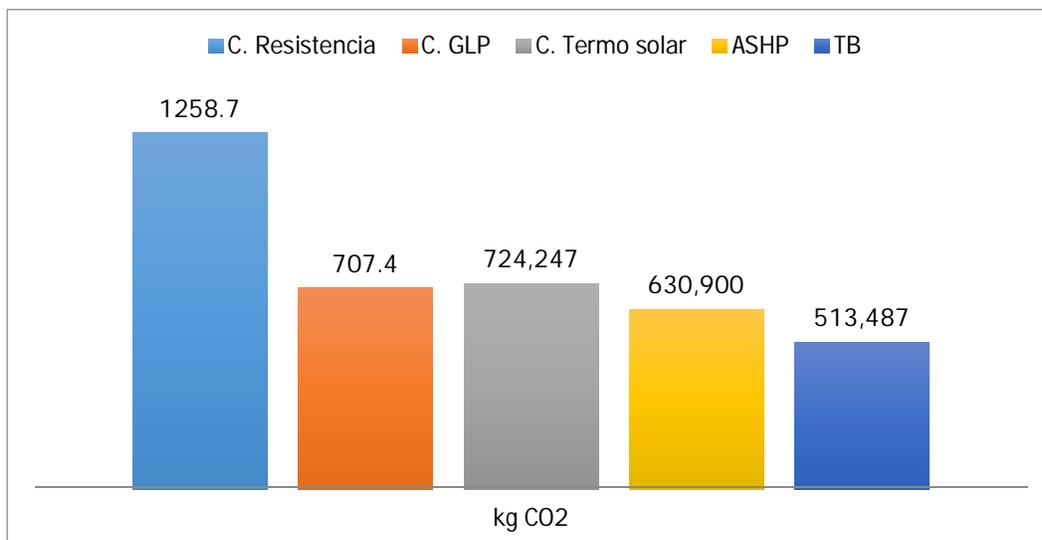


Figura 3.24 Emisiones Anuales de CO2 por hogar - Guayaquil

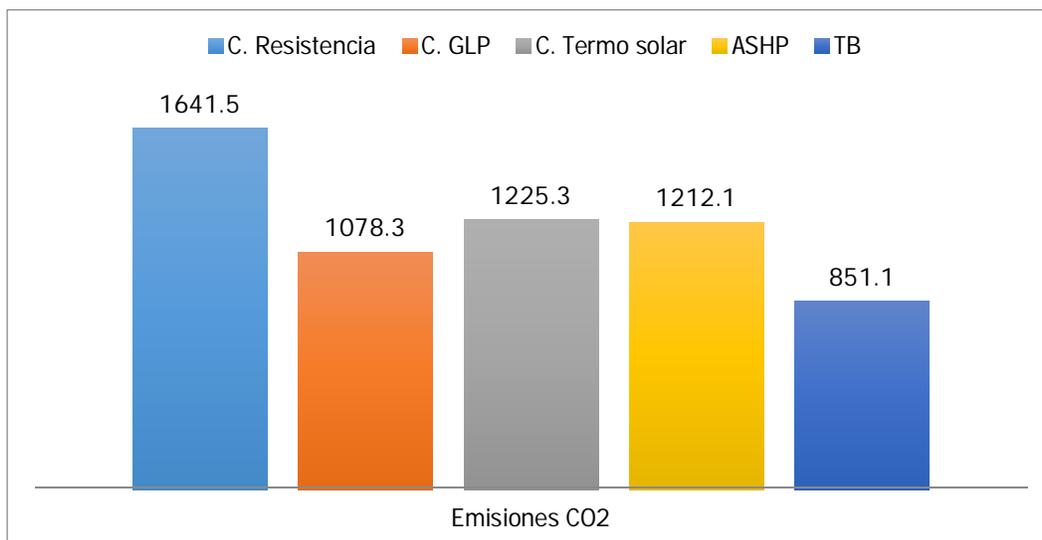


Figura 3.25 Emisiones Anuales de CO2 por hogar- Quito

Certificados de Reducción de Emisiones

Los Certificados de Reducción de Emisiones de CO₂, son créditos por reducción de emisiones a través de iniciativas de Mecanismos de Desarrollo Limpio (MDL), el cual representa un acuerdo en virtud del Protocolo de Kyoto para el compromiso por parte de un grupo países industrializados de invertir en proyectos de reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero en los países en desarrollo. De acuerdo al régimen de comercio de Emisiones de la Unión Europea, el precio de tonelada de CO₂ se establece en 1,36 euros (USD 1,86 dólares).

La Tabla 22 presenta a manera de resumen las estimaciones para las emisiones de CO₂ atribuibles a la operación de un calentador instantáneo por GLP y a una batería térmica. La tabla muestra los valores de emisiones anuales por hogar, así como las emisiones totales al año. Para esto se asume que en el mercado nacional existen 350 000 unidades de calentamiento por GLP, de las cuales el 70% se encuentran distribuidas en la región sierra y el 30% restante en la costa, por lo tanto, las ciudades de Guayaquil y Quito son empleadas como localidades representativas de estas dos regiones para realizar la estimación de las emisiones totales de CO₂ como consecuencia del empleo de estas dos alternativas

Tabla 22
Cálculo de Emisiones Totales de CO₂

Descripción		E. Consumida kWh/hogar	CO ₂ Kg/hogar	E. CO ₂ Ton
C. Instantáneo GLP	Quito	4 978.49	1 078.27	264 176
	Guayaquil	3 265.92	707.35	173 300
Batería Térmica	Quito	1 609.21	851.11	89 366
	Guayaquil	970.86	513.49	53 916

A partir de estos valores, el remplazo de los calefones alimentos por GLP por baterías térmicas para calentamiento de agua residencial implica aproximadamente una reducción anual igual a 294 192 Ton de CO₂, equivalentes a USD 547 200.

3.3. Costo de la Energía

A partir de los resultados obtenidos en el análisis comparativo de las alternativas propuestas, se realizó el análisis costo/beneficio para evaluar si la alternativa propuesta en el presente proyecto representa una opción con superior beneficio que otros sistemas utilizados para el calentamiento de agua.

El costo del consumo del gas G.L.P. para una residencia típica empleando un cilindro de 15 Kg se establece en USD 1.6 como precio de venta oficial al público, sin embargo el precio real o de importación por el cilindro es igual a USD 12.20, esta información de la obtuvo a partir de investigaciones realizadas por Castillo (2007). Antes las iniciativas gubernamentales que apuntan hacia la sustitución de sistemas a GLP por unidades eléctricas, para el presente trabajo se analizó un escenario sin subsidio energético, es decir, se emplea un valor de USD 12.20 para el costo del cilindro de GLP.

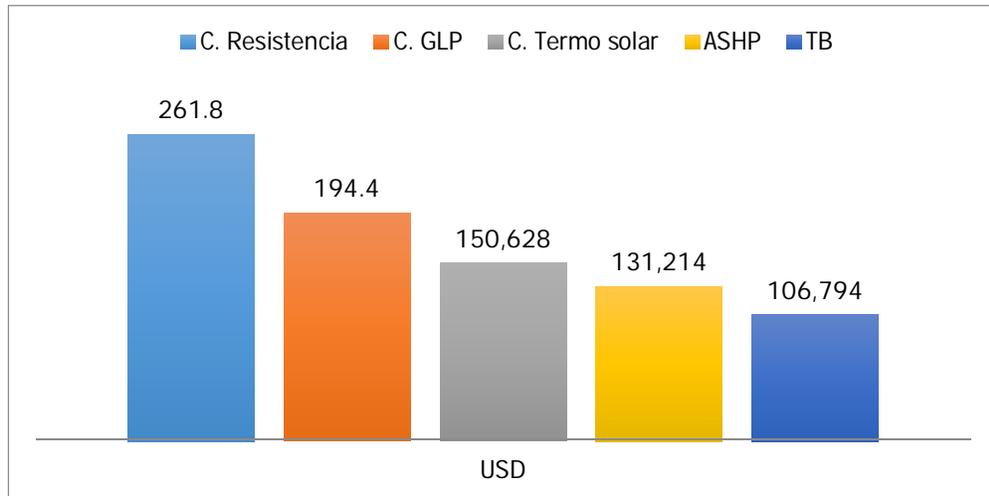


Figura 3.26 Costo Anual de energía por hogar – Guayaquil

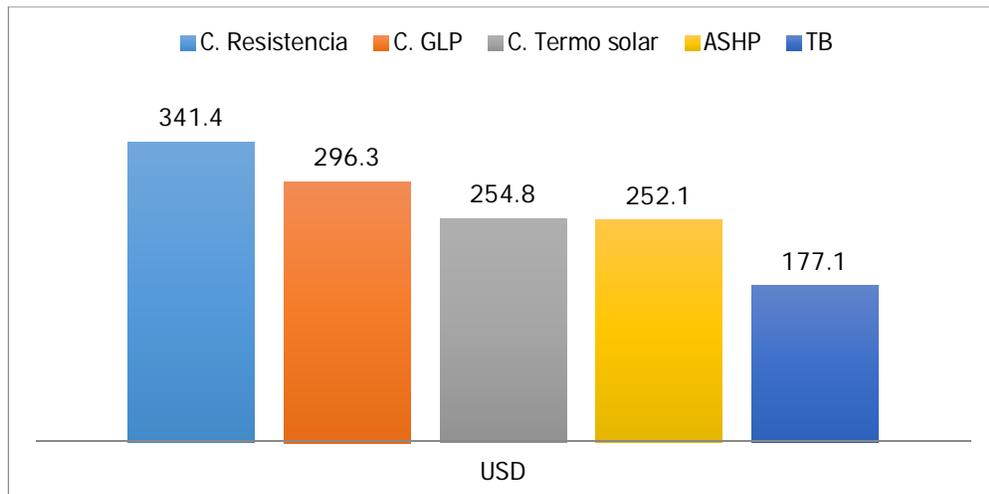


Figura 3.27 Costo Anual de energía por hogar – Quito

Por otro lado, el costo de la energía eléctrica usada para calentamiento de agua, de acuerdo último pliego tarifario aprobado por Consejo Nacional de Electricidad (CONELEC) en el 2015 corresponde a 0.11 USD/kWh.

Con estos valores se determina el costo anual de energía por hogar para las alternativas analizadas, los mismo se presentan en las Figuras 3.26 y 3.27.

El costo operativo para la batería térmica se determina en USD 106 para Guayaquil y USD 177 para Quito, de esta forma, el sistema propuesto ofrece reducciones significativas en los costos operacionales en comparación con otras opciones disponibles. Se estima que el reemplazo de las unidades a GLP por bombas de calor con almacenamiento térmico representaría un ahorro equivalente a 38 millones dólares, asumiendo un costo de USD 12.20 por cilindro de GLP.

Finalmente se realiza el análisis costo / beneficio para determinar si la alternativa propuesta representa una alternativa de inversión atractiva.

3.4. Análisis del Costo Beneficio

Valor Actual Neto – VAN

Este criterio permite determinar el valor presente de un determinado número de flujos de caja futuros producidos por una inversión. El cual viene dado por la siguiente formula.

$$VAN = C_o + \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{(1+r)^i} \quad (21)$$

Dónde:

n = número de periodos

C_i= flujos efectivo en cada periodo i

r = Tasa de referencia

C_o = Flujo inicial efectivo (Negativo por ser una salida de efectivo)

Una vez obtenido el valor actual neto (VAN) se debe interpretar el resultado, el cual nos va a servir para tomar una decisión sobre si el proyecto es aceptable:

Tasa Interna de Retorno – TIR

El TIR es un indicador de rentabilidad de un proyecto, el cual se lo relaciona con la tasa de referencia, si este tiene un valor mayor se puede decir que el proyecto es aceptable caso contrario se rechaza el proyecto, para obtener este valor utilizamos la siguiente expresión:

$$TIR = \frac{-C_o + \sum_{i=1}^n C_i}{\sum_{i=1}^n C_i \times i} \quad (22)$$

Donde los valores de C_o, C_i e i fueron determinados anteriormente.

El costo de El costo de implementar el sistema de batería térmica aproximadamente de USD 1700, el cual comprende los siguientes rubros:

Tabla 23
Costos de adquisición e instalación

Bomba de Calor Agua – Agua (Incluye tanque de 400 L)	USD 1 100
Tanque de Almacenamiento de Agua 1000 L	USD 500
Instalación	USD 100

Tabla 24
Análisis Económico para Implementación de Batería
Térmica - Guayaquil

Consumo Anual	970 kWh
Costo Anual	USD 106
Aprovechamiento enfriamiento Kwh	2871 kWh
Ahorro por Enfriamiento USD	USD 315
Período de Análisis	10 años
Tasa de descuento	14%
Costo de inversión USD	USD 1 600
VAN	USD 435.07
TIR	21%

Tabla 25
Análisis Económico para Implementación de Batería
Térmica - Quito

Consumo Anual	1609 kWh
Costo Anual	USD 177
Aprovechamiento enfriamiento Kwh	2430 kWh
Ahorro por Enfriamiento USD	USD 267
Período de Análisis	10 años
Tasa de descuento	14%
Costo de inversión USD	USD 1 600
VAN	USD 540.31
TIR	23%

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

Este trabajo presenta un modelo para un calentador de agua por Batería Térmica para su uso en cálculos energéticos de sistemas residenciales. El modelo fue desarrollado de manera que requiera únicamente datos comúnmente disponibles de catálogos de fabricantes. En comparación con modelos determinísticos más detallados, el modelo no requiere información de parámetros o variables internas.

El modelo de calentador de agua residencial por Batería Térmica representa una alternativa que garantiza el suministro y satisface las necesidades de agua caliente sanitaria y acondicionamiento de espacios de una forma que se alinea con los conceptos y premisas de eficiencia y ahorro energético en instalaciones residenciales.

La integración del almacenamiento de energía térmica con estrategias de control apropiadamente diseñadas toma ventaja las altas eficiencias de una bomba de calor para proporcionar servicios de calentamiento y enfriamiento a bajos costos y / o emisiones de carbono.

El grado de significancia del potencial de ahorro energético del sistema propuesto, es tal que este no solo representa un ahorro económico importante para el usuario final, de igual forma el ahorro se traslada de forma significativa los costos inferidos con la producción de energía. Se determina que la batería térmica es capaz de reducir el consumo de energía en un 53% en comparación con un calentador a GLP y 30% para un calentador termo solar.

La combinación de bomba de calor con depósitos térmicos de agua caliente y fría representa la alternativa más eficiente con valores de COP promedio iguales a 4.62 (Guayaquil) y 3.38 (Quito), superiores a los desarrollados por las demás alternativas estudiadas.

Se determina que la aplicación del concepto de batería térmica permitiría reducir las emisiones de CO₂ atribuibles al empleo de calefones por GLP en un valor aproximado a 294 192 Ton de CO₂.

De forma análoga, la implementación de batería térmica para calentamiento de agua permitiría alcanzar reducciones en el costo de la energía, beneficiando al estado con un ahorro equivalente a 38 millones de dólares

Estimado un costo de inversión de USD 1700 para la batería térmica, se determina que esta alternativa representa una opción eficiente no solo desde un punto de vista energético sino también económico para la sustitución de unidades que operan con resistencia eléctrica o por medio de combustión de GLP.

Los modelos para calentamiento de agua residencial desarrollados en el presente trabajo permiten una detallada simulación energética y estimación precisa de los consumos de energía, costos de energía y otros parámetros asociados con su operación.

4.2. Recomendaciones

Considerar para trabajos futuros durante la etapa de modelado de un sistema para calentamiento de agua, las diferentes influencias e interacciones dinámicas de forma cuidadosa, pues la operación de la unidad calentadora depende no solamente de factores termo hidráulicos, adicionalmente es sensible a factores climáticos, geológicos, tipo de control y patrones de demanda o consumo de los usuarios. Para lograr la representación óptima del sistema, se requiere por lo tanto un análisis global del sistema y de estrategias de control integrales para el acople de todos los componentes.

El modelo de consumo de agua caliente empleado (ASHRAE 90.2) fue desarrollado a partir de datos recolectados en E.E.U.U. durante la década de 1980. Durante el desarrollo del presente proyecto, no se efectúan correcciones para compensar los cambios en el uso de agua caliente en los últimos 30 años. Se recomienda desarrollar programas de monitoreo con mediciones en sitio y estrategias para la colección de datos que puedan maximizar la información sobre el consumo de agua caliente a nivel residencial. El propósito de un programa de medición de uso final es la caracterización de los patrones de consumo existentes a nivel local. Para ello, es necesario un adecuado conocimiento de los aspectos técnicos, demográficos, sociales, culturales, geográficos y demás factores que motivan o impulsan el uso de agua caliente en una residencia.

Incluir dentro del alcance del programa de monitoreo, mediciones sobre el rendimiento del sistema empleado para calentamiento de agua bajo condiciones normales de operación. El objetivo de esta medida es proveer una base para el análisis y evaluación de medidas o acciones para reducir el

consumo y emisiones asociadas con el calentamiento de agua en el sector residencial.

BIBLIOGRAFÍA

- INEC. (2013). *Sitio Web del INEC*. Recuperado el 2013, de <http://www.ecuadorencifras.gob.ec/proyecciones-poblacionales/>
- Al-Zahrani, S., Tan, F., & Choo, F. (2012). A TRNSYS Simulation Case Study on Utilization of Heat Pump For both Heating and Cooling. *Energy Science and Technology*, P. 84-92.
- ARCH, & CONELEC. (2011).
- ASHRAE. (2009). Chapter 1 - Psychrometrics. En R. a. American Society oh Heating, *ASHRAE Handbook - Fundamentals* (pág. p 1.15).
- ASHRAE. (2009). Thermal Confort. En R. a. American Society of Heating, *ASHRAE Fundamentals* (págs. p. 9.1 - 9.30).
- ASHRAE. (2011). Service Water Heating. En R. a. American Society oh Heating, *ASHRAE HANDBOOK - Heating, Ventilating, and Air Conditioning Applications*. Atlanta.
- Blarke, M. (2012). Thermal Battery with CO2 compression heat pump: Techno-economic optimization of high-efficiency Smart Grid option for buildings. *Energy and Buildings*, p. 130.
- Borgnakke, C., & Sonntag, R. (2009). The Second Law of Thermodynamics. En C. Borgnakke, & R. Sonntag, *Fundamental of Thermodynamics* (Séptima Edición ed., pág. p.242). E.E.U.U.
- BOSCH. (2012). Obtenido de <http://www.boschecuador.com/portal/html/gallery/Tecnova/Manual-Calefones-Bosch-Confort-10-5-17-4-22-7kw-de-tiro-natural.pdf>
- Bourdouxhe, J.-P. (1994). toolkit for primary HVAC system energy calculation Part 2: Reciprocating chiller models. *ASHRAE Transactions* 100, 774-786.
- Carmo, C. (Mayo de 2012). Thermal battery concept: Investigation and optimization of CO2 heat pump system for simultaneous heating and cooling with storage tanks. Denmark.
- Castillo, J. (2007). Una nota acerca de los subsidios, la política y la economía. *Cuestiones Económicas, Volumen 23*(No. 3:3-3), 173.
- CECU. (2012). *Confederación de Consumidores y Usuarios*. Obtenido de <http://www.cecua.es>
- CEDEC. (2009). NORMA ECUATORIANA DE CONSTRUCCIÓN NEC-10. *PARTE 14-1 Energía Renovable. Sistemas de Calentamiento de agua con Energía Solar para uso sanitario en el Ecuador*.
- DNSAHC. (2009). *Factor de Emsión del Sistema Nacional Interconectado de Ecuador*.
- Fairey, P., & Parker, D. (20 de Julio de 2004). A Review of Hot Water Draw Profiles Used in Perfomance Analysis of Residential Domestic Hot Water Systems. *Florida Solar Energy Center*.

- Gazzoni, D. (2010). Energía Sustentable en América Latina y el Caribe: Potencial para el Futuro. (C. I. ICSU, Ed.) *Ciencia para una vida mejor: Desarrollando Programas Científicos Regionales en áreas prioritarias en América Latina y el Caribe*, 3, 27.
- Hepbasli, A., & Kalinci, Y. (2008). A review of heat pump water heating systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volumen 13, 1211-1229.
- Huchtemann, K., & Muller, D. (2009). Advanced simulation methods for heat pump systems. *Proceedings 7th Modelica Conference*, (págs. p. 798-803). Como.
- IEA. (2011). *Sitio Web de la International Energy Agency*. Recuperado el 2014, de <http://www.iea.org/>
- INAMHI. (2012). *Anuario Meteorológico 2009*. Quito.
- MCPEC. (2010). *Los Subsidios Energéticos en el Ecuador - Informe Final*.
- MICSE. (2012). *Estudio de Acompañamiento para el cambio de Matriz Energética*.
- RHEEM AUSTRALIA PTY LTD. (2006). *Hot Water Manual*.
- Solar Energy Laboratory. (2012). *TRNSYS website*. Obtenido de <http://sel.me.wisc.edu/trnsys>
- Splitter, J., & Hui, J. (2002). A Parameter Estimation Based Model of Water-to-Water Heat Pumps for Use in Energy Calculation Programs. *ASHRAE Transactions*, p. 3 - 17.
- UNSD. (2005). *Nation Master*. Obtenido de <http://www.nationmaster.com/>
- VDI - Richtline 465. (2009). *Calculation of heat pumps - simplified method for the calculation of the seasonal performance factor of the heat pump*. Dusseldorf: Verein Deutscher.
- Wang, S. (2001). *Handbook of Air Conditioning and Refrigeration*. McGraw - Hill.

APÉNDICE A

Perspectiva Mundial de la Situación Energética

Los indicadores y estadísticas energéticas muestran un aumento progresivo en el consumo de energía primaria a nivel global. Esta tendencia se presenta como resultado de un incremento en las actividades productivas de ciertas regiones, las cuales han experimentado un crecimiento económico importante en los últimos años (China, Brasil, India). Como consecuencia de este crecimiento económico, aparece una mejora en el estilo de vida de los individuos, lo que a menudo significa mayores requerimientos de energía.

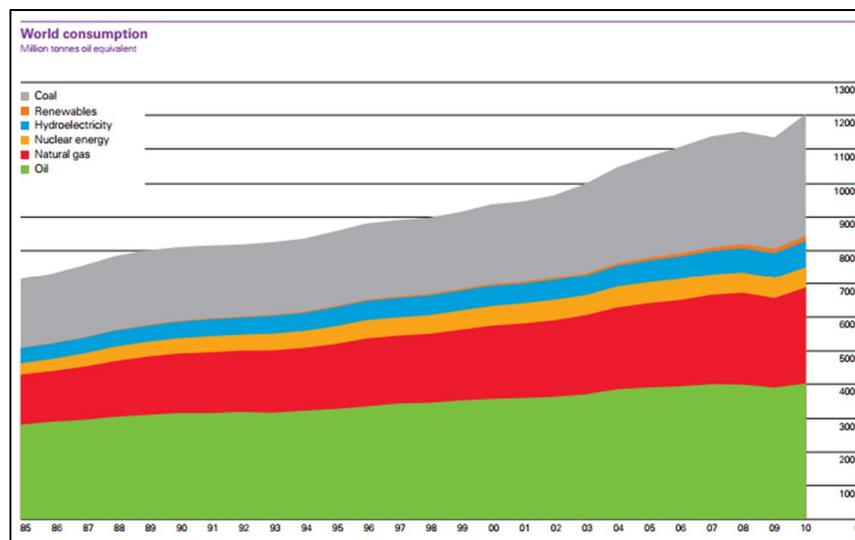


Figura 1. Consumo mundial de energía primaria por fuente (MTpe)³.

La Figura 1 muestra la participación de diferentes fuentes en el suministro de energía primaria global. El carbón mineral ha adquirido gran importancia en la última década, mientras que el uso del petróleo se ha mantenido relativamente estable, cediéndole espacio al gas natural. Esto puede atribuirse a las políticas y convenios energéticos y ambientales que se han aplicado, aunque los incrementos en el precio del barril de petróleo y sus elevados costos de extracción, transporte y distribución probablemente sean los factores de mayor peso. Las participaciones de las energías hidroeléctrica y nuclear presentan también un incremento sostenido, mientras que por otra parte las energías renovables siguen por ahora siendo marginales.

³ British Petroleum. "BP Statistical Review of World Energy- Primary Energy". 2011.

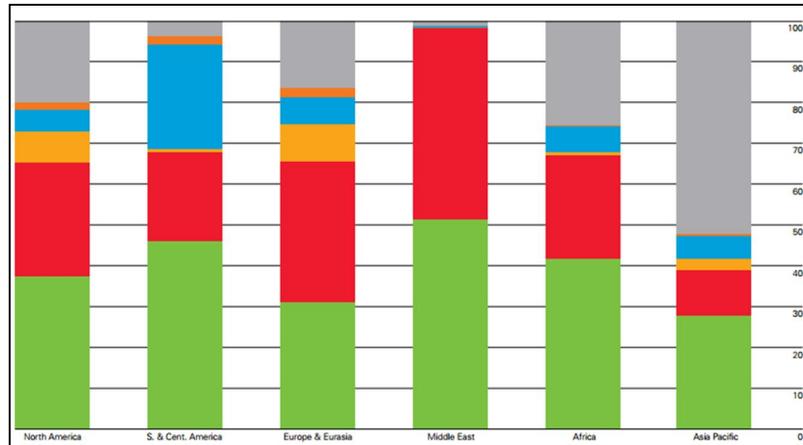


Figura 2. Patrones de consumo de energía primaria por región (Porcentaje)².

La Figura 2 identifica los consumos por tipo de energía primaria en diferentes regiones del planeta. Se puede apreciar que en Norteamérica las fuentes principales son el petróleo y el gas natural. Esta tendencia se mantiene en América Central y América del Sur, aunque inversiones realizadas por parte de algunas de sus naciones para el aprovechamiento del recurso hídrico, le ha dado a la hidroelectricidad una participación importante.

En el medio oriente, como era de esperarse, las principales fuentes de energía primaria están representadas por el petróleo y el gas natural asociado, siendo prácticamente inexistente la participación de otras fuentes. La preferencia por un tipo de fuente o tecnología está influenciada por factores que van más allá de lo económico o lo técnico, involucra también aspectos sociales, legales, políticos, geográficos que afectan la toma de decisiones y el manejo de la energía en general.

Si bien fue precisamente un intensivo consumo de combustibles fósiles lo que permitió alcanzar altísimas tasas de desarrollo y mejores condiciones en los niveles de vida durante el siglo XX. En las tres últimas décadas, la tasa mundial de descubrimiento de nuevos campos petrolíferos ha sido inferior a la tasa de consumo de petróleo, siendo las nuevas reservas probadas equivalentes a apenas 27% del consumo real.

Estas tendencias y la dependencia de países consumidores que importan petróleo y gas natural, sobre todo el procedente de Oriente Medio y Rusia, son las causales del aumento constante de las emisiones de gases de efecto invernadero (GHG, por sus siglas en inglés). La mayor parte de las emisiones de GHG que se observan en las Figuras 3 y 4 se atribuyen especialmente a la generación de energía eléctrica y transporte.

Este escenario genera preocupaciones respecto al cambio climático y la seguridad energética. Durante las primeras etapas, la extracción es una actividad fácil y de bajo costo, el petróleo superficial es puro y fácil de refinar, sin embargo conforme se avanza

en profundidad, la actividad se dificulta y el petróleo pierde calidad, incrementándose los costos por refinación y transporte. Esta situación es el principal tema de preocupación en materia energética; las autoridades y encargados de la toma de decisiones no están estrictamente preocupados por un agotamiento de los combustibles fósiles, sino más bien del costo que implica seguir dependiendo de ellos.

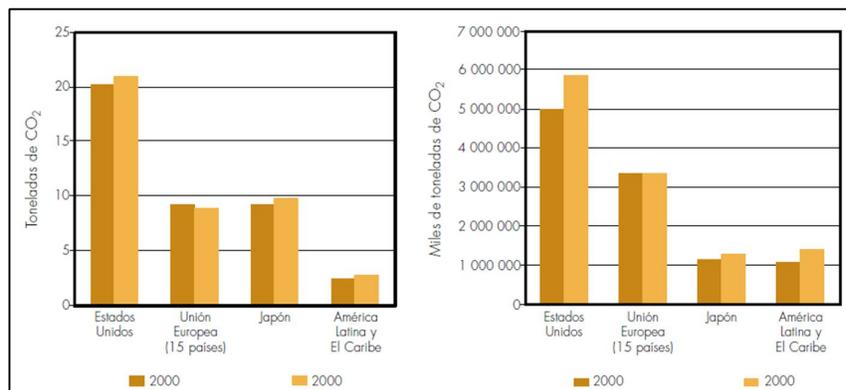


Figura 3. Emisiones mundiales de dióxido de carbono per cápita y globales⁴

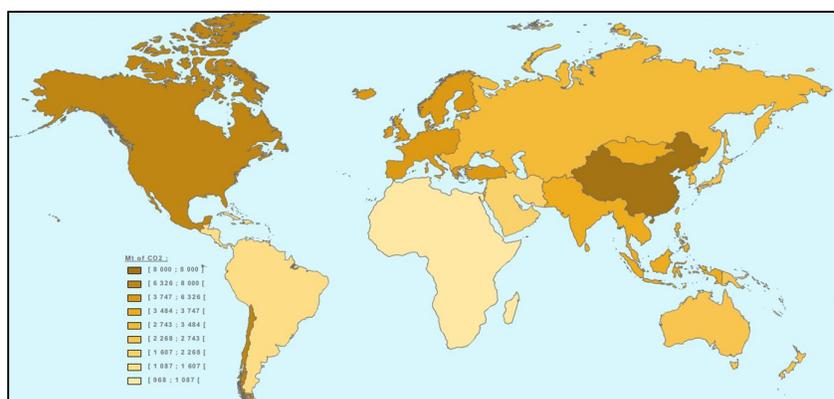


Figura 4. Distribución mundial de las emisiones de CO₂ (millones de toneladas). Año 2011⁵

La problemática energética es uno de los temas de mayor discusión y relevancia a nivel internacional. Hay un creciente consenso sobre que el principal desafío en el sector energético es iniciar una transición hacia un sistema energético que transforme las maneras en las que producimos, distribuimos y consumimos energía útil, pero sin comprometer las capacidades para el desarrollo económico y social.

En la Figura 5 se resalta los niveles mundiales del indicador intensidad energética. La intensidad energética mide la cantidad total de suministro de energía primaria sobre el

⁴ GAZZONI, Décio, et al. "Energía Sustentable en América Latina y el Caribe: Potencial para el futuro". Consejo Internacional para la Ciencia-ICSU. *Ciencia para una vida mejor: Desarrollando Programas Científicos Regionales en áreas prioritarias para América Latina y el Caribe*. 2010, vol 3, p 25.

⁵ International Energy Agency, IEA. "Energy Balance Flow Statistics". 2011.

monto total para producir bienes y servicios o Producto Interno Bruto (PIB), y está influenciado principalmente por dos dimensiones: (1) actividades económicas y (2) eficiencia energética. Este indicador es una herramienta que nos permite diferenciar y comparar la estructura de los sistemas energéticos entre dos o más países o regiones.

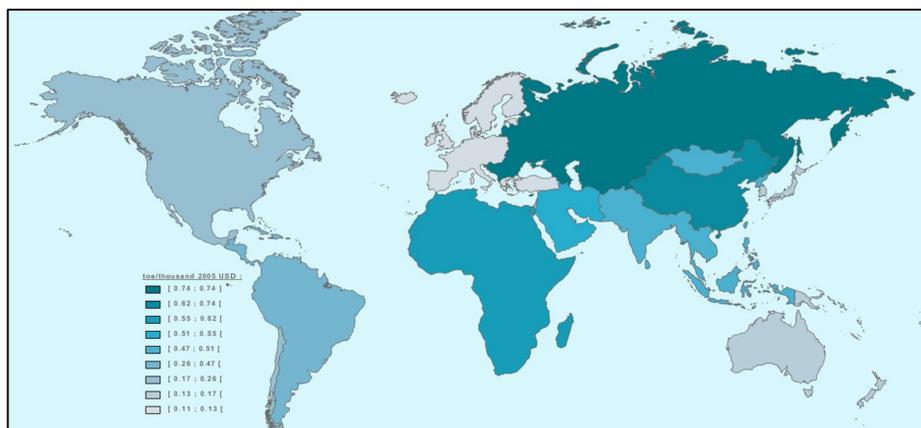


Figura 5. Distribución mundial de la intensidad energética. Año 2011⁶

En la figura podemos notar que África emplea o utiliza una gran cantidad de energía por dólar de PIB, esto es un indicativo de que la tecnología en dicho continente es obsoleta e ineficiente, y se desperdicia una cantidad significativa de energía por dólar de su PIB. Rusia presenta los niveles más altos de intensidad energética, consecuencia de subsidios energéticos que llevaron a un consumo ineficiente, sumado a una industria pesada de alto consumo, a sus condiciones climáticas y la aparición de sistemas económicos de climatización.

Por otro lado, Japón, Alemania, Australia y el Reino Unido destacan por los menores consumos de energía por dólar de PIB. Este comportamiento se atribuye a varias razones, entre ellas, altos precios de la energía que limitan el consumo, residencias más pequeñas, altas densidades demográficas, lo que resulta en menores consumos energéticos, a pesar de que existen importantes actividades de producción.

En resumen, es vital identificar oportunidades para desarrollar la eficiencia energética a corto plazo, principalmente porque esta es la manera más económica y rápida de aliviar o mitigar los efectos de los altos consumos de petróleo, y por ende la emisión de CO₂. Ante este desafío y las perspectivas y visiones que se empiezan a debatir y configurar en el panorama global, es necesario hacer una lectura crítica de la matriz y política energética en Ecuador y su proyección a corto plazo.

⁶ International Energy Agency, IEA. "Energy Balance Flow Statistics". 2011.

APÉNDICE B

Tipos de Calentadores de Agua Residenciales

Calentadores de Acumulación Alimentados por Gas

En el sector residencial nacional, la producción de agua caliente se realiza en su mayoría a través de calentadores de acumulación que utilizan la combustión como fuente de energía, si bien en el Ecuador se emplea casi en su totalidad GLP, el gas natural también es un combustible utilizado habitualmente.

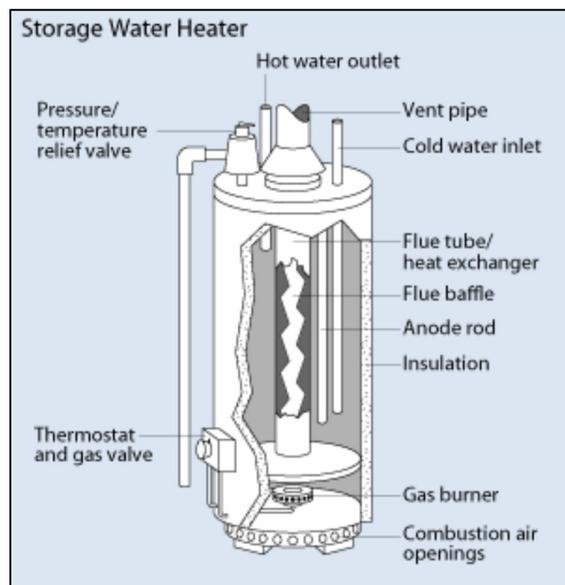


Figura 6. Calentador de acumulación a gas (DOE, 2009)

Un calentador de agua a combustión emplea un quemador de gas para llevar a cabo la combustión, mientras la transferencia de calor se realiza gracias a un soplador que desplaza los productos de combustión hacia la superficie de transferencia de calor donde entra en contacto con el volumen de agua a calentar. El tanque de almacenamiento debe estar aislado para minimizar las pérdidas de calor por convección o radiación con el ambiente.

El diseño más común de un calentador alimentado por gas se muestra en la Figura 6. La superficie efectiva para transferencia de calor corresponde a la superficie inferior del tanque y a la superficie interna de la longitud sumergida del conducto de gases. Otras configuraciones incrementan el área efectiva mediante el uso de aletas o múltiples conductos (Ver Figura 7)

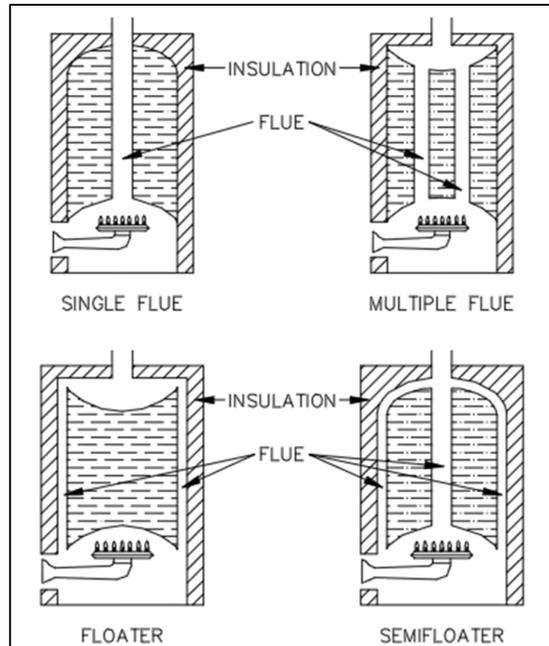


Figura 7. Configuraciones para calentadores de acumulación alimentados por gas⁷

El quemador de gas se sitúa debajo del tanque y puede recalentar el agua mientras está fluye o durante la fase de captación; de esta manera, el calentador regula la potencia adaptándose a las demandas repentinas de agua caliente, variando la altura de la llama según el caudal circulante. Este proceso de regulación se ejecuta a mediante estrategias apropiadas de control o a través de una válvula manual; mientras el control de la temperatura del agua se realiza mediante termostatos. La Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2603:2012 – Calentadores de Agua a Gas expone los requisitos mínimos aceptables de rendimiento para estos sistemas, los cuales se presentan en la siguiente tabla.

rendimiento mínimo para calentadores domésticos y comerciales.

Eficiencia Energética		
Tipo de Calentador	Volumen	Eficiencia
Almacenamiento	1 – 40	76
	40 – 62	77
	62 – 102	79
	106 – 400	82
Instantáneo	-	84

⁷ RHEEM AUSTRILIA PTY LTD. "Hot Water Manual". 2006

Calentadores de Acumulación por Resistencia Eléctrica

En adición a los sistemas alimentados por gas, se emplean también calentadores de agua que utilizan la conversión de energía eléctrica. Un calentador de acumulación eléctrico emplea elementos de resistencia eléctrica sumergidos dentro del tanque de acumulación. Estos elementos pueden instalarse en diferentes números y configuraciones, aunque generalmente poseen un elemento calentador primario que se ubica en la parte inferior del tanque de almacenamiento, y un elemento secundario en su parte superior. Cada elemento es controlado por su propio termostato, interconectados de tal manera que solo se permite la operación de uno de ellos para limitar el consumo de energía.

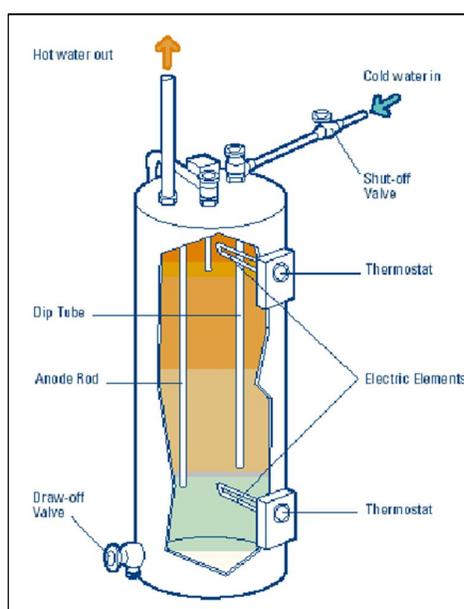


Figura 8. Calentador de acumulación eléctrico

Los calentadores de acumulación por resistencia eléctrica para aplicaciones residenciales son aquellos cuya capacidad alcanza hasta los 12 kW. Un calentador de agua típico se muestra en la Figura 8.

Si bien los calentadores de agua eléctricos poseen eficiencias cercanas al 99% en la conversión de energía eléctrica a térmica, se presentan pérdidas durante la fase de almacenamiento del agua, lo que se traduce en disminución de la temperatura. En comparación los sistemas de a gas que oscilan entre el 70% y el 80% de eficiencia debido a las pérdidas de calor en los gases de combustión (Williamson & Clark, 2001).

Calentadores Instantáneos o por Demanda

Estos sistemas son diseñados para calentar el agua proveniente de la red pública mientras fluye a través del mismo, proveyendo un suministro de agua caliente. La presión de la red de distribución empuja el agua fría a través de la sección del

calentador de agua, luego a través del intercambiador de calor y finalmente hacia al grifo o dispositivo de uso final. El flujo de agua activa una válvula o switch causando que fluya el combustible o electricidad que alimenta el sistema (Ver Figura 9). Se encuentran en capacidades que varían entre 1.5 kW hasta 38 kW, dependiendo de los requerimientos de flujo y temperatura; sin embargo a pesar de sus capacidades, de forma general los sistemas instantáneos, sean por elementos de resistencia eléctrica o alimentados por gas no son adecuados para aplicaciones múltiples (Ej: emplear el calentador para una ducha y un lavavajillas al mismo tiempo puede sofreesforzar el equipo). Aunque los calentadores instantáneos a gas normalmente tienen una mayor capacidad que los modelos eléctricos, su limitación general es el flujo, el cual se encuentra un rango de 7 – 15 l/min. Como resultado, los calentadores de agua instantáneos son apropiados para hogares de baja demanda. Con un apropiado sistema de control, pueden emplearse para lavavajillas, duchas, bañeras de hidromasaje, lavadoras, o como boosters para ciertos sistemas de recirculación.

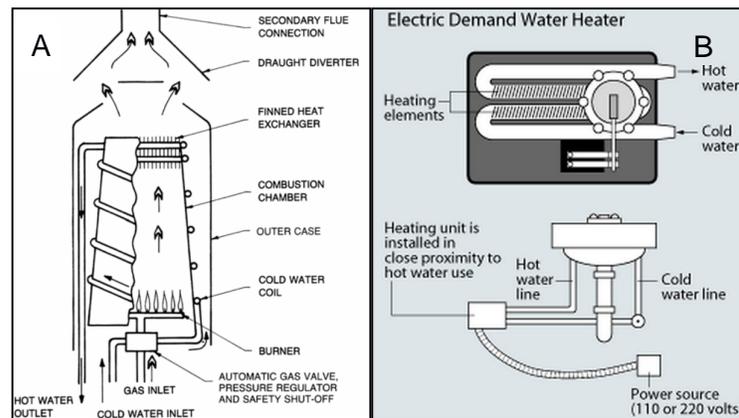


Figura 9. Calentadores instantáneos A) Por gas⁸ y b) Por resistencia eléctrica⁹

Como norma general el método más eficiente y económico para calentar agua es utilizando la combustión como fuente de calor. Los calentadores por elementos de resistencia eléctrica aunque poseen altas eficiencias de conversión de energía, la electricidad empleada tiene su origen en una combustión efectuada en una central térmica. Debido a la antigüedad de estas centrales térmicas, estas requieren grandes cantidades de energía para generación y consumo interno. Normalmente producen una unidad de energía en forma de electricidad por cada tres en forma de combustible, dos de las cuales son rechazadas hacia la atmósfera sin ningún aprovechamiento. Las fases transferencia y distribución de energía también generan importantes pérdidas de energía. De este modo resulta obvio que emplear sistemas a base de combustión para el calentamiento de agua es más rentable que los sistemas por conversión de energía

⁹Department of Energy – DOE. 2009

eléctrica, debido a las pérdidas que se generan durante la generación, transmisión y distribución.

Calentadores de Agua Termosolares

En el escenario global actual, donde los costos relacionados con la producción de energía continúan escalando, el aprovechamiento de la energía solar como fuente primaria empieza a convertirse en una alternativa atractiva, especialmente con la aplicación de incentivos gubernamentales preferenciales enfocados en la sostenibilidad. En el Ecuador la Norma Ecuatoriana de Construcción NEC-11, Capítulo 13 - Eficiencia Energética en la Construcción en Ecuador fue creada con el propósito de promover y estandarizar el uso y fabricación de los sistemas de calentamiento de agua residencial con energía solar. Esta menciona que cuando el uso final de la energía en las edificaciones sea de tipo térmico, se debe contar con una contribución mínima de energía renovable o recuperación de calor residual, de acuerdo a la siguiente tabla.

Aporte de fuentes renovables de acuerdo al uso	
Uso final de Energía	Porcentaje de aporte con energía renovable
Calefacción	25%
Agua Caliente Sanitaria	75%
Piscina cubierta	60%
Piscina descubierta	90%

La aplicación de los sistemas solares para calentamiento de agua dependen de (1) patrones climáticos y geográficos; (2) necesidades de energía auxiliar; (3) orientación de colectores; (4) área de colectores; (5) temperatura de la red pública; (6) costo de instalación y (7) capacidad de almacenamiento.

Un calentador de agua termosolar se constituye por cinco elementos básicos: (1) colectores, (2) tanque de almacenamiento, (3) sistema de tuberías, (4) controles de temperatura, (5) circuladores y (6) un medio de transferencia (generalmente agua). El agua u otro fluido circula a través de uno o varios colectores (Ver Figura 12 y 13), los cuales captan la energía radiante del sol y la transforman en energía en forma de calor, siendo luego transferida al agua mediante conducción. La energía se almacena en forma de calor sensible en un tanque de acumulación, desde el cual se dispone conforme la demanda de agua caliente. En la mayoría de los casos, el recurso solar disponible no es suficiente o no se ajusta al patrón de consumo de agua caliente; para estos escenarios, la energía suministrada por los colectores se utiliza como fuente para el precalentamiento de agua, utilizándose sistemas convencionales para alcanzar los requisitos de temperatura finales.

Los sistemas solares pueden clasificarse de varias formas, en el caso de aplicaciones para calentamiento de agua sanitaria, esta clasificación se basa en método de

circulación del agua, que puede ser natural (**sistemas pasivos**) o forzada (**sistemas activos**).

Entre los sistemas pasivos se encuentran los calentadores tipo **termosifón** (Ver Figura 10); estos emplean el principio de convección natural para circular el agua o fluido de transferencia a través de colector(es). El tanque de almacenamiento se coloca a un nivel por encima del colector(es), de esta forma el agua circula por diferencia de temperatura a través del circuito. Los sistemas pasivos operan con flujos pequeños aunque, en general, su rendimiento es superior al de sistemas activos en climas templados para flujos comparables (ASHRAE, 2010).

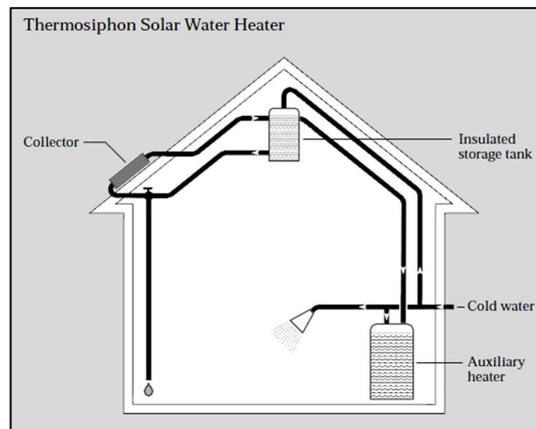


Figura 10. Calentador solar por termosifón (DOE, 1996)

Los sistemas activos emplean una bomba y controles para la circulación del fluido de transferencia a través de los colectores. Existen dos tipos de calentadores termo solares activos: sistemas directos y sistemas indirectos.

En los sistemas directos, el agua proveniente de la red pública circula a través de colector y el tanque de almacenamiento por medio de una bomba, estos calentadores se utilizan en regiones donde las temperaturas no son muy bajas.

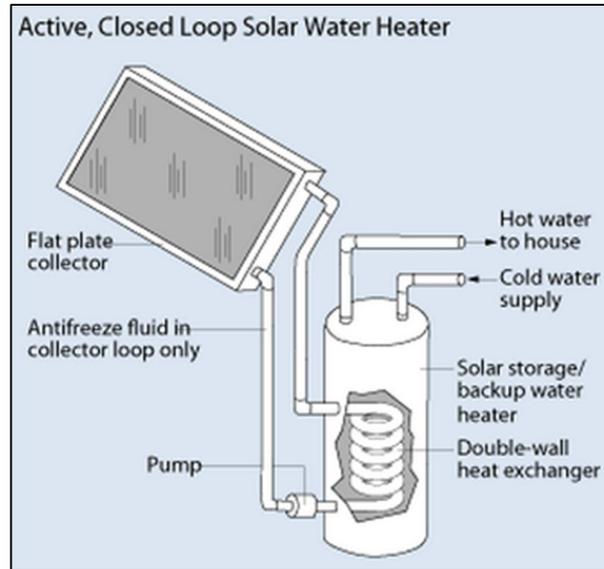


Figura 11. Calentador solar directo (DOE, 2012)

En los sistemas indirectos, el fluido circulante en los colectores es un líquido anticongelante; agua de la red pública circula en un circuito independiente, interactuando con el circuito del colector por medio de un intercambiador de calor. Estos sistemas son recomendables cuando el agua de alimentación presenta características de alta dureza o cuando es necesaria una mayor protección contra condiciones ambientales que puedan generar congelación en el fluido de transferencia.

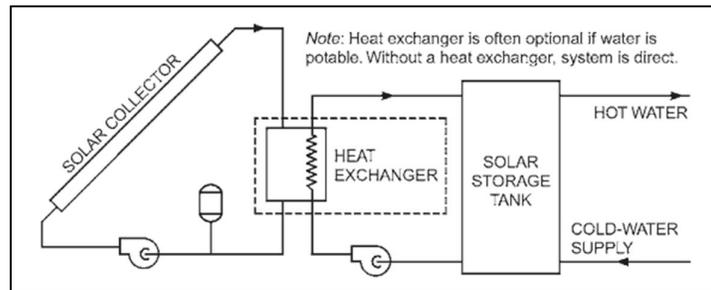


Figura 12. Calentador solar Indirecto¹⁰

Aunque estos sistemas pueden alcanzar a cumplir los requerimientos de temperatura de servicio, a menudo requieren elementos auxiliares (eléctricos o a gas). El costo de capital para estos sistemas es elevado en comparación con otros equipos, sin embargo sus bajos costos de operación los hacen económicamente viables.

¹⁰ American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning-ASHRAE. ASHRAE Applications.2011

APÉNDICE C

Caracterización de localidades de análisis

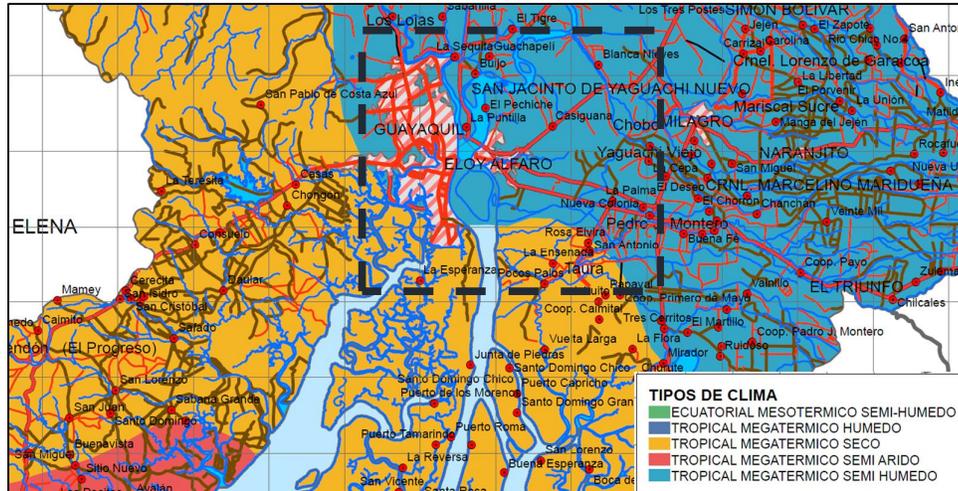


Figura 13. Regiones climáticas en el sitio de estudio - Guayaquil¹¹

El área del cantón Guayaquil, se encuentra ubicada en la zona de planificación 8 definida por SENPLADES (2011) dentro de la cual se desarrolla una tipología climática tropical megatérmica húmeda. Estas características climáticas determinan la existencia de dos estaciones diferenciadas: húmeda entre enero y abril; y seca entre junio y diciembre. Durante el periodo de enero a abril, las masas de aire húmedo se desplazan hacia el sur, descargando humedadas en forma de fuertes precipitaciones. A fines de abril a diciembre, las masas retroceden hacia el norte. La influencia fresca y seca de la corriente del Perú marca el inicio en la región de la estación seca, a partir de mayo hasta diciembre. Las características en cuanto a temperaturas son moderadas, cuya media anual oscila entre los 24 y los 26 °C. (Ver Figuras 13 y 14).

¹¹ Fuente: MAGAP, 2013. Inventario de Recursos Naturales, Nivel Provincial, Mapa de Tipos de Clima, Provincia de Manabí.

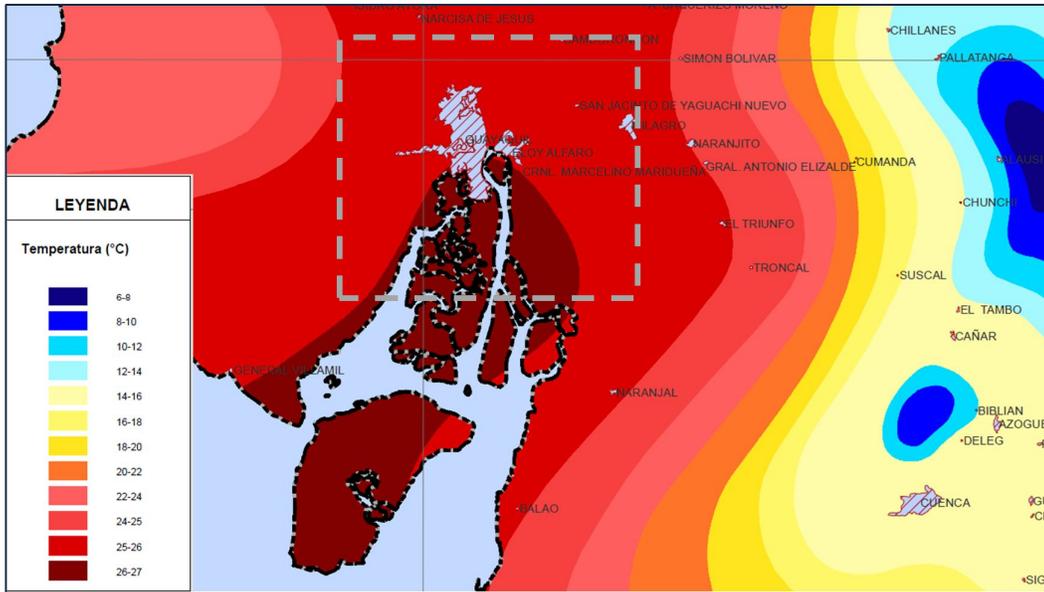


Figura 14. Distribución de temperatura media anual en Guayaquil¹²

Por otra parte el Distrito Metropolitano de Quito se asienta sobre la zona de planificación 9 (SENPLADES 2011), dentro de las cual se presenta dos tipologías de climáticas (Ver Figuras 15 y 16), La temperatura fluctúa entre los 5°C (o menos) y 26°C, con precipitaciones anuales promedio de 300 mm.

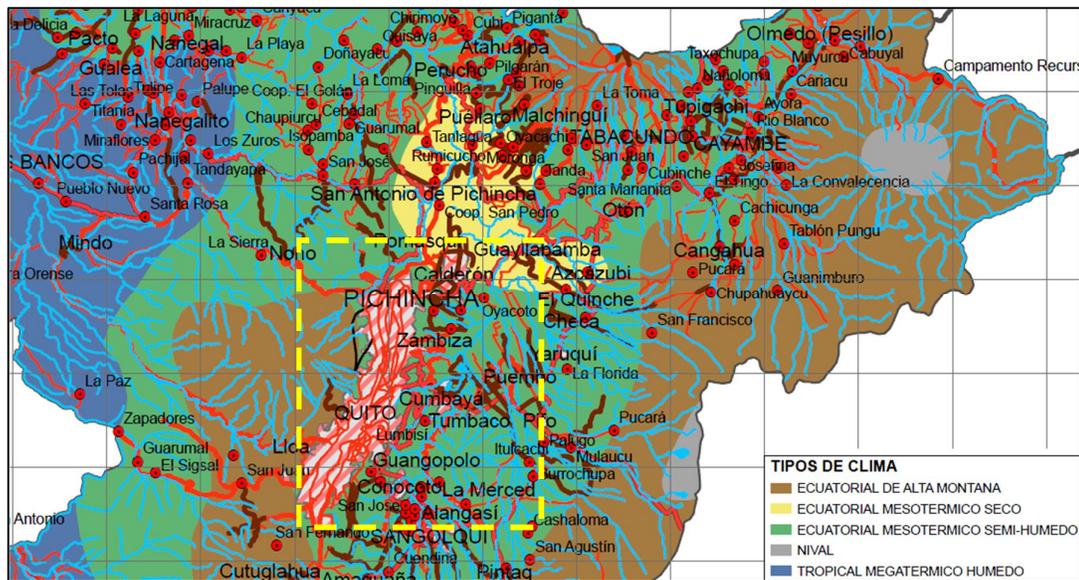


Figura 15. Regiones climáticas en el sitio de estudio - Quito¹³

¹² Fuente: INAMHI, 2013. Mapa de Temperatura Media Multianual Serie 1965-1999, Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología.

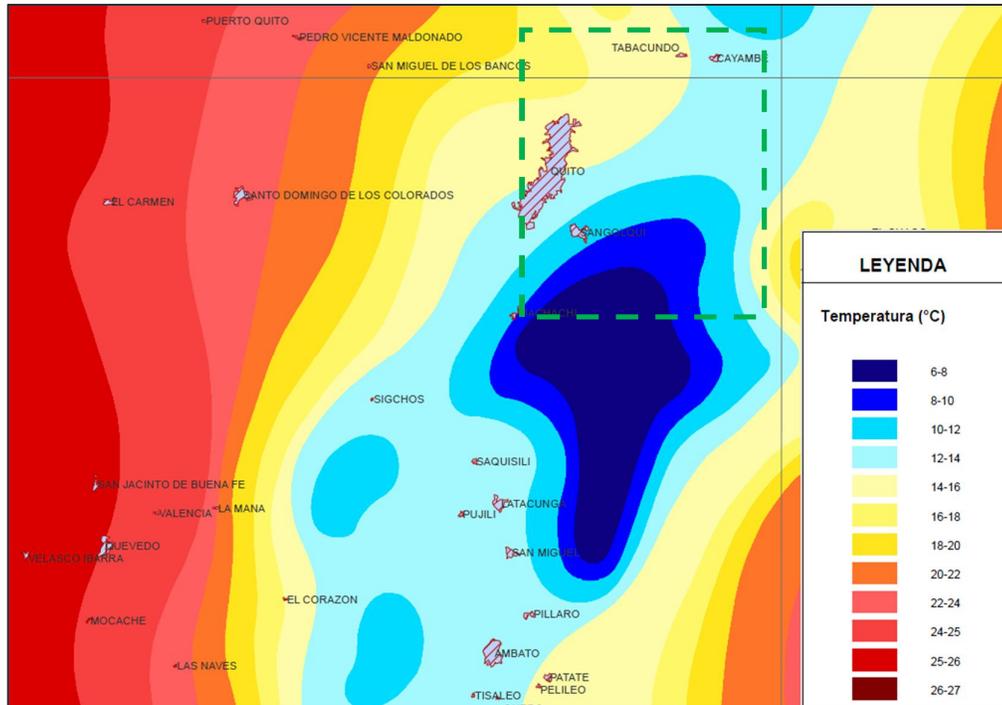


Figura 16. Distribución de temperatura media anual en Quito⁸

Los datos históricos de las estaciones meteorológicas del INAHMI14 permiten inferir que la oscilación térmica del área está entre 7.2 °C a 26.7 °C. Se establece los meses de octubre y noviembre como el periodo de mayor temperatura, y los meses de febrero y marzo como los de temperaturas más bajas.

¹⁴ Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología, INAMHI. "Anuario Meteorológico 2009". Estación Quito INAMHI-Iñaquito, código M024.

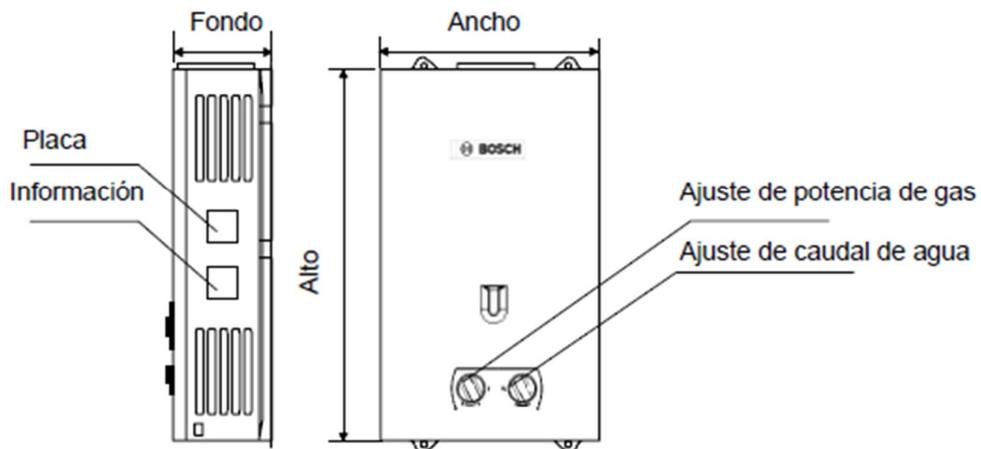
APÉNDICE D

Catálogos de Equipos

Calefones a Gas

Modelo	Tipo de gas	Consumo calorífico nominal kW	Caudal de agua caliente Lts/min	Rango de presión de gas (mbar)		Rango de presión de agua bar	Conexiones de agua	Conexión de gas
				GLP	GN			
GWH6 B31/B23	GLP GN	13.5	6	28 mbar	18 mbar	0.3 - 10	G1/2"	G1/2"
GWH10 B31/B23		22.4	10	30 mbar	20 mbar			
GWH13 B31/B23		29	13					

Modelo	Dimensiones (mm)	Sistema de encendido	Diámetro del ducto de evacuación (pulgadas)	Peso (kg)	
				Neto	Embalado
GWH6 B31/B23	520x320x162	Automático con doble electrodo	Ø 3,5"	7.8	9.5
GWH10 B31/B23	630x340x180		Ø 4,5"	11.9	13.3
GWH13 B31/B23	650x400x190		Ø 5"	13.8	15.5



Bombas de Calor alimentada por Aire

Hubbell™

MODEL PBX

Heat Pump Water Heater

Fully integrated Heat Pump Water Heater (HPWH)
40-119 Gallon Capacity

Features

■ Highest Efficiency

- ✓ Heat Pump transfers heat from surrounding air into the hot water tank
- ✓ Industry leading efficiency
- ✓ Insulated with 3" thick CFC free polyurethane foam insulation to minimize stand-by heat loss

■ Long Life

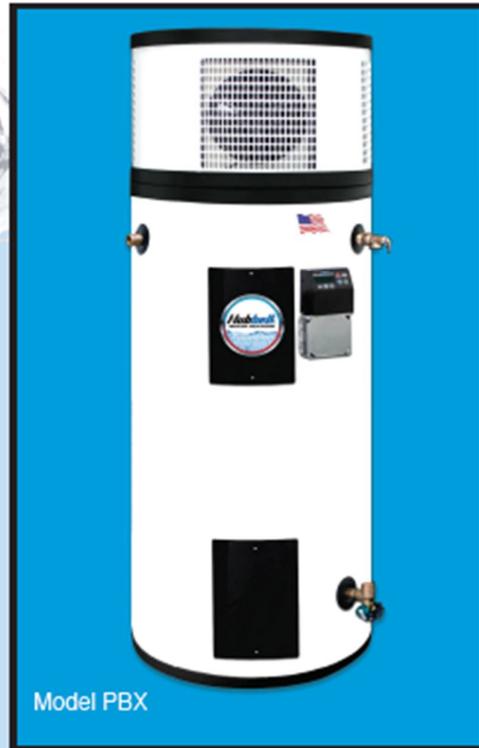
- ✓ Hydrastone Cement lining ensures long tank life
- ✓ Proven Heat Pump technology
- ✓ Incoloy Sheathed back-up electric heaters resist corrosion and mineral build up

■ Simple Operation

- ✓ Fully Integrated water heater easily replaces a standard electric water heater
- ✓ User friendly electronic controller simplifies operation, maintenance, and trouble shooting
- ✓ Low maintenance design
- ✓ Designed for simple installation and service by a professional plumber

APPLICATIONS

- Residential
- Restaurants
- Schools
- Office Buildings



Model PBX

A Long Lasting and Reliable Heat Pump Water Heater

The Hubbell Model PBX water heater incorporates a number of features not found in other conventional heaters which makes it better suited to resist the highly corrosive effects of hot water. The heart of a Hubbell water heater is a superior storage vessel which utilizes a specially formulated Hydrastone cement lining, solid copper-silicon

threaded tank openings and a built-in heat trap device, all of which ensure a longer lasting and energy efficient water heater.

When you specify and install a Hubbell Model PBX, you will have confidence in knowing that the owner will be provided with a long lasting, trouble-free water heater.

Hubbell™

A High Efficiency Long Lasting Water Heater

How the Hubbell Heat Pump Water Heater Works

The Hubbell Model PBX Heat Pump Water Heater uses a small amount of electricity to transfer heat from the air to water. In comparison, traditional electric water heaters use resistive heating elements to directly heat water. The Hubbell Model PBX is significantly more energy efficient compared to a conventional electric water heater because less electricity is required for a heat pump water heater to produce the same amount of hot water as a traditional electric water heater.

Quite simply, a heat pump works like a refrigerator in reverse. A refrigerator moves heat from inside the refrigerator (making things cold) and transfers that heat energy to the surrounding room. A heat pump water heater on the other hand pulls free and essentially unlimited heat from the surrounding air and transfers that heat to the hot water stored in the tank.

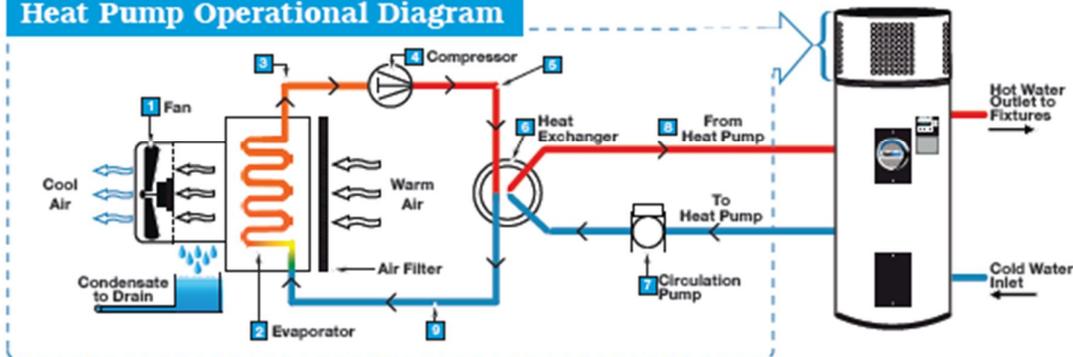
The Hubbell Model PBX Heat Pump Water Heater can pull heat out of air as cool as 40°F, and if it cannot provide enough heating capacity to meet demand, the water heater includes back-up resistive heating elements to ensure the unit provides sufficient hot water. The heat pump process of removing heat from the air and transferring it to the water results in the exhaust of cooler dryer air, with as much as 0.4 gallons per hour of "free" dehumidification provided by the heat pump when the unit is heating water.

Heat Pump Functions

1. The built in fan draws room air into the water heater heat pump compartment and across an evaporator coil, and exhausts cooler and slightly dryer (dehumidified) air.
2. The evaporator coil captures heat energy in the air and transfers that energy to a specially formulated CFC free refrigerant contained within the evaporator.
3. The refrigerant changes from a liquid to a gas as it gets warmer.
4. The refrigerant, now as a warm gas, exits the evaporator and passes into a compressor.
5. The warm gas is compressed, causing it to become a superheated hot gas and then flows to the heat exchanger.
6. The heat exchanger transfers heat energy from the superheated hot gas to the cold water from the tank.
7. The pump circulates cold water from the tank through the heat exchanger resulting in a continuous transfer of heat energy from the superheated gas to the water.
8. Hot water exits the heat exchanger and is stored in the tank.
9. The superheated gas condenses back to a liquid and awaits to repeat the process.



Heat Pump Operational Diagram



Hubbell

Model PBX Water Heater Specifications

Tank:	Hydrastone Cement Lined Steel	Hi-Limit:	190°F Manual Reset
Storage:	40, 60, 65, 80, 119 Gallons	Pressure Rating:	160 psi WP, 300 psi TP
Orientation:	Vertical	First Hour Rating: (Gallons)	
Voltage:	208-240 Volt	PBX40SL:	46
Phase:	1 Φ	PBX60SL:	61
Frequency:	60 Hz	PBX65SL:	70
Inlet Size:	3/4" Female NPT	PBX80SL:	82
Outlet Size:	3/4" Male NPT	PBX120SL:	120
Drain Size:	3/4" GHT	Standby Heat Loss: (°F/hr)	
Condensate Size:	1/4" Tube	PBX40SL:	0.46
Relief Valve Size:	3/4" Female NPT	PBX60SL:	0.36
Relief Valve Type:	T&P, 210°F, 160 psi	PBX65SL:	0.35
Heat Pump:		PBX80SL:	0.28
Refrigerant:	R426A (CFC Free)	PBX120SL:	0.28
ODP:	0	Energy Factor:	2.33
GWP:	1349	COP:	2.36
Over Pressure Safety:	Manual Reset	Average Power Consumption:	
Field Chargeable:	No	High Fan:	680 Watts
Ambient Air:		Low Fan:	614 Watts
Air Flow (High Fan):	450 CFM	Electric Elements:	Incoloy Sheathed 3800 W @ 240V
Air Flow (Low Fan):	250 CFM	Insulation:	3" Polyurethane Foam
Air Filtration:	Washable/Removable	Sound Level:	62db Average @ 3 Feet
Temperature Range:	40-110°F	Warranty:	
Thermostat Range:	50-160°F (°F or °C) \pm 3°F	Tank:	10 Years
Error Indication:	Visual and Audible	Parts:	6 Years
Demand Response Capable:	Yes	Approvals:	cULus
Child Lock Capable:	Yes	Jacket:	High Impact Colorized Composite
		Color:	White with Black Trim

Selectable Operating Modes

Economy

This mode controls the heater such that the heat pump provides essentially all of the heating capacity. This is typically the lowest operating cost mode.

Hybrid

This mode controls the heater in a way to optimize its efficiency and user experience and is the default setting. This mode operates the water heater such that the heat pump provides the vast majority of heating capacity and automatically switches to electric resistance heater mode only when necessary to meet high demand or to optimize efficiency.

Electric

This mode controls the heater such that it only heats using the electric resistance heaters and operates as a traditional electric water heater. The heat pump will not operate in this mode.

Super

This mode controls the heater such that both the heat pump and the electric resistance elements can operate simultaneously. This mode provides the fastest recovery option possible by providing heating capacity from both the heat pump and the electric resistance heaters at the same time.

Vacation

This mode prevents the heater from heating (regardless of what mode it is in) as a way to improve efficiency during long periods of no usage (i.e. vacation). In this mode the only time the heater will heat is if the unit is in danger of freezing. The user sets the number of days to be in vacation mode (adjustable from 2 to 99 days or Off), and the unit resumes its previous mode of operation at the end of this period.

Temporary Modes

Max Heat

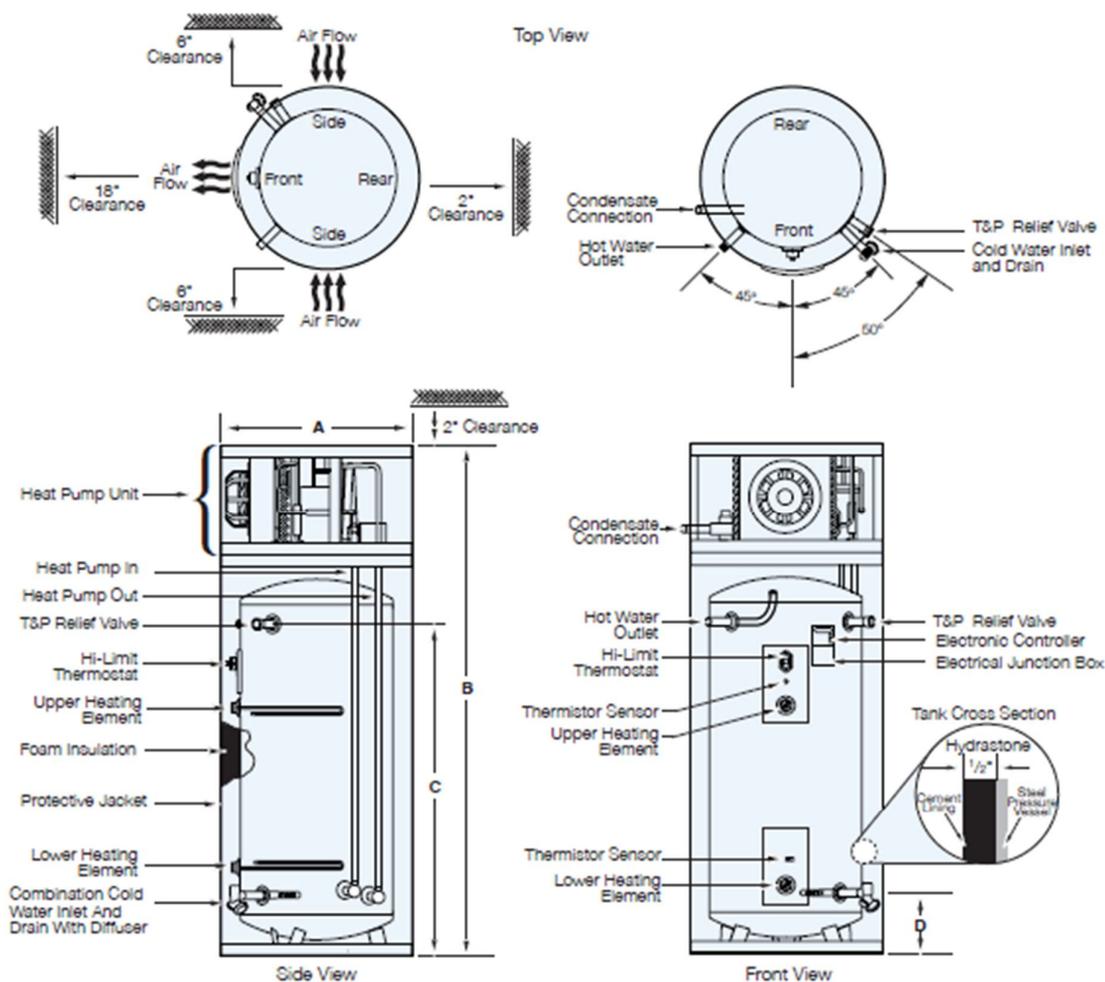
Simply pressing one button maximizes heating capacity by temporarily putting the heater into super mode.

Fan Off

Simply pressing one button temporarily lowers the fan speed which reduces the airflow and minimizes operating noise. Pressing the button twice turns the fan off for a user adjustable time period.

Hubbell

Outline Dimensions



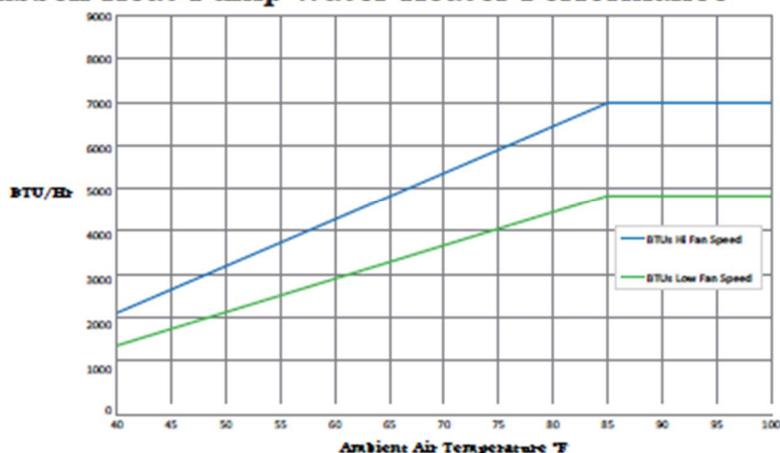
Dimensional Data

Storage Capacity (Gallons)	Base Model Number	Dimensions (Inches)				Shipping Weight (lbs.)
		Overall Diameter "A"	Overall Height "B"	Floor to T&P and HW Outlet "C"	Floor to CW Inlet "D"	
40	PBX40SL	28	49	26	9	270
50	PBX50SL	25	66	43	9	325
65	PBX65SL	28	63	40	9	365
80	PBX80SL	28	73.5	50	9	440
119	PBX120SL	30	84	61	9	525

Hubbell

Performance Chart

Hubbell Heat Pump Water Heater Performance



Energy Consumption Chart

Annual Energy Consumption (EST)										
Ambient Air Temperature	Energy Factor (EF)	Coefficient of Performance (COP)	Annual Energy Consumption and Operating Cost in Various Operating Modes							
			Economy		Hybrid		Electric		Super	
			kW-Hrs	Operating Cost \$	kW-Hrs	Operating Cost \$	kW-Hrs	Operating Cost \$	kW-Hrs	Operating Cost \$
50°F	1.39	1.42	3159	\$336	3159	\$336	4671	\$497	4368	\$465
70°F	2.33	2.36	1884	\$201	1884	\$201	4671	\$497	3851	\$410
90°F	3.07	3.07	1430	\$152	1430	\$152	4671	\$497	3527	\$376

Energy Factor and Average Annual Operating Costs based on 2007 D.O.E. (Department of Energy) test procedures. D.O.E. national average fuel rate electricity 10.65¢/KWH. Energy Factor (EF) based upon heater operating in Hybrid mode.

Recovery Rating Chart

Continuous Recovery Rating (GPH)												
Ambient Air Temp	Continuous Recovery Rating (GPH) in Various Operating Modes											
	Economy			Hybrid			Electric			Super		
	60°F ΔT	70°F ΔT	80°F ΔT	60°F ΔT	70°F ΔT	80°F ΔT	60°F ΔT	70°F ΔT	80°F ΔT	60°F ΔT	70°F ΔT	80°F ΔT
50°F	6.5	5.6	4.9	25.9	22.2	19.4	25.9	22.2	19.4	32.4	27.8	24.3
70°F	10.9	9.4	8.2	25.9	22.2	19.4	25.9	22.2	19.4	36.8	31.6	27.6
90°F	14.2	12.2	10.6	25.9	22.2	19.4	25.9	22.2	19.4	40.1	34.4	30.0

Continuous Recovery rating based upon 240V power supplied to heater and fan operating in high speed mode. ΔT represents the °F temperature rise for hot water.

Heating Chart

Heating Capacity Chart (BTU/Hr)				
Ambient Air Temp	BTU/Hr Rating in Various Operating Modes			
	Economy	Hybrid	Electric	Super
50°F	3,240	12,965	12,965	16,205
70°F	5,400	12,965	12,965	18,365
90°F	7,020	12,965	12,965	19,985

Heating Capacity based on 240V power to heater and fan operating in high speed mode.

These units are designed to meet or exceed ANSI (American National Standards Institute) requirements and have been tested according to D.O.E. test procedures and meet or exceed the energy efficiency requirements of NAECA, ASHRAE standard 90, ICC Code and all state energy efficiency performance criteria for energy consuming appliances.

Hubbell.