



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE RECUPERACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE CALOR PARA UNA VIVIENDA UNIFAMILIAR DE CUATRO PERSONAS

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

OSPINA AGUDELO CARLOS ALBERTO
carlos_ospinaf1@hotmail.com

DIRECTOR:
ING. VACA JIMÉNEZ SANTIAGO DAVID, MSC.
santiago.vaca@epn.edu.ec

CODIRECTOR:
DR. ORDÓÑEZ MALLA FREDDY GEOVANNY, PH.D.
Freddy.ordonez@epn.edu.ec

Quito, junio 2018

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por **CARLOS ALBERTO OSPINA AGUDELO**, bajo mi supervisión.



Ing. Santiago David Vaca Jiménez, Msc.

DIRECTOR DE PROYECTO

Freddy Geovanny Ordóñez Malla, Ph.D.

CODIRECTOR DE PROYECTO

DECLARACIÓN

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

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

Carlos Alberto Ospina Agudelo

DEDICATORIA

Dedico esta meta cumplida primeramente a mis padres que sin su apoyo y esfuerzo durante todos estos años no hubiera sido posible alcanzar esto y ser el hombre de bien que soy ahora.

A mi hermano, para que el presente estudio sea una luz de guía y motivación en su vida, tesis propia y en todo lo que haga con esmero y esfuerzo verdadero. Este triunfo es en especial dedicado a mi abuela que fue única en mi vida y que en su momento le hice la promesa de cumplir con esta meta entre otras para su tranquilidad y alegría en el cielo.

AGRADECIMIENTO

Agradezco primeramente a Dios que, sin su apoyo y gran corazón, no hubiera tenido la oportunidad de estar aquí en este mundo. Por haberme dado la fuerza para haber superado los grandes retos que la vida a puesto en mi camino y no permitirme el lujo de tomar el camino fácil de flaquear a pesar de todas las circunstancias difíciles que he vivido a lo largo de todo mi crecimiento.

Agradezco a mis padres por todo el esfuerzo y entrega que me han brindado a lo largo de nuestras vidas juntos, por ese amor incondicional a pesar de todo lo que hemos podido superar. Por dar el doscientos por ciento en todo lo que hicieron, hacen y harán para que a mí y a mi hermano nunca nos falte nada y tener una vida plena y digna.

Agradezco a mi hermano que siempre ha sido y será mi motivación para seguir adelante y darle el mejor ejemplo y apoyo que me he permitido brindarle. Por siempre estar a mi lado y nunca perder ese cariño y amor de hermanos casi gemelos que tenemos y que me enorgullece día a día.

A mi familia que siempre me han apoyado en todo momento, por siempre estar pendientes de esta meta y no perder la esperanza en mí. Por ser tan maravillosos conmigo y ser un reflejo de todos los valores que nos han inculcado con ahínco en todas nuestras edades durante nuestras vidas para ser personas de bien y humildes.

Al Ing. Santiago Vaca director de esta tesis de grado, que además de haber sido una guía ha sido un amigo en el paso de esta etapa en la universidad. Con su amistad, conocimiento, experiencia y paciencia he logrado aprender muchas cosas que no olvidaré para aplicar en mi vida laboral.

A esos guayperos orgullosos y muy queridos de la mejor facultad del mundo: *Alex Estrada, Jaime Chávez, Pedro Cilio, Sebastián Sarmiento, Raúl Darquea, Mateo González, Álvaro Naranjo, Daniel Paucar, Oscar Meléndez, Kathy Cruz, Sthefanny Salazar, Alejandra Revelo* y para efectos de no alargar mucho la lista ya que son muchos, con su amistad, cariño y bullying siempre han estado en las buenas y en las malas, en las sanas y como no decirlo por supuesto más en las crudas.

RESUMEN

Entre las principales acciones para limitar el calentamiento global y sus graves consecuencias, está el objetivo claro de disminuir en lo posible a cero el uso de combustibles fósiles

El objetivo de este estudio es diseñar y analizar energéticamente un sistema de recuperación y aprovechamiento de calor para una vivienda unifamiliar de cuatro personas que permita la reducción en la utilización de GLP para calentamiento de agua sanitaria.

Con este fin, se realizó un estudio energético y simulación de un sistema de recuperación y almacenamiento de calor en una casa tipo en la ciudad de Quito. Los resultados demostraron que el consumo de GLP se puede disminuir un 25%, con esto no solo se logra solamente el ahorro de este recurso, sino también un ahorro económico significativo para los hogares quiteños. Al mismo tiempo, es importante notar que el sistema puede ser construido en el país y que la inversión positiva tiene un tiempo de retorno de 2.8 años, lo cual es interesante para las perspectivas futuras del sistema.

PALABRAS CLAVE

Recuperador, intercambiador de calor, almacenamiento, consumo, masa de agua, masa de GLP, programación, análisis económico.

ABSTRACT

Among the main actions to limit global warming and its serious consequences, is the clear objective of reducing the use of fossil fuels to zero as much as possible.

The objective of this study is to design and analyze energetically a system of recovery and use of heat for a single-family house of four people that allows the reduction in the use of LPG for heating sanitary water.

For this purpose, an energy study and simulation of a heat recovery and storage system was carried out in a typical house in the city of Quito. The results showed that the consumption of LPG can be reduced by 25%, with this not only the saving of this resource is achieved, but also a significant economic saving for the Quito households. At the same time, it is important to note that the system can be built in the country and that the positive investment has return time of 2.8 years which is adequate.

KEYWORDS

Recuperator, heat exchanger, storage, consumption, mass of water, mass of LPG, programming, economic analysis.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
Pregunta de Investigación.....	6
Objetivo general.....	6
Objetivos específicos.....	6
Alcance	7
1. MARCO TEÓRICO	8
1.1. Calentamiento de agua	8
1.2. Recuperadores de calor	8
1.3. Almacenamiento	9
Almacenamiento por calor latente	10
Almacenamiento por calor sensible.....	10
1.4. Análisis económico.....	10
1.5. Definición del sistema	11
Características generales	11
Detalle del sistema.....	11
1.6. Especificaciones de la vivienda	11
Vivienda	11
Caracterización energética.....	12
Características de la vivienda a estudiar	12
1.7. Calentadores de agua	15
1.8. Esquema del sistema	15
1.9. Características del sistema.....	16
Materiales	16
Funcionamiento	17
Rendimiento.....	17
1.10. Estadísticas de consumo y calor desperdiciado por elemento	17
1.11. Consumo de agua y frecuencia por elemento	17
Duchas.....	17

	Fregadero – cocina.....	18
	Lavabo.....	18
	Máquina de lavar la ropa.....	19
1.12.	Temperatura por Consumo.....	19
1.13.	Consumo total de la vivienda unifamiliar.....	20
	Perfil de consumo.....	20
	Evolución del perfil de temperatura del agua:.....	23
2.	METODOLOGÍA.....	24
2.1.	Análisis energético.....	24
	Estimación de calor máximo del sistema.....	24
	Sistema de calentamiento del sistema.....	24
	Análisis energético del sistema de calentamiento de agua de la vivienda sin sistema de pre-calentamiento.....	25
	Análisis energético del sistema de calentamiento de agua de la vivienda con sistema de pre-calentamiento.....	25
2.2.	Recuperador.....	26
	Dimensionamiento del intercambiador de calor.....	28
	Diferencia logarítmica media de temperaturas.....	28
	Número de Reynolds.....	29
	Número de Prandtl.....	30
	Número de Nusselt.....	30
	Coefficiente de convección.....	30
	Coefficiente global de transferencia de calor.....	31
	Longitud del Intercambiador de calor.....	31
	Área de transferencia de calor.....	32
	Caída de presión.....	32
2.3.	Almacenamiento.....	33
	Disposición del tanque.....	33
	Material.....	33
	Aislamiento del tanque.....	34

	Dimensionamiento del tanque de almacenamiento	35
	Análisis térmico del tanque de almacenamiento.....	37
2.4.	Análisis económico.....	39
	VAN	39
	TIR	40
	Tiempo de retorno de la inversión.....	40
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	42
3.1.	Resultados análisis energético inicial.....	42
	Sistema de calentamiento de agua	42
	Calor requerido por el sistema sin recuperación de calor	43
	Calor requerido por el sistema con recuperación de calor	43
	Dimensionamiento del intercambiador de calor	45
3.2.	Resultados análisis energético real.....	47
	Sistema de calentamiento de agua	48
	Calor requerido por el sistema sin recuperación de calor	48
	Calor requerido por el sistema con recuperación de calor	48
	Dimensionamiento del intercambiador de calor	50
	Almacenamiento de energía térmica sensible.....	52
	Diseño mecánico del sistema.....	54
	Simulación.....	56
	Análisis económico del sistema	73
3.3.	Discusión	76
	Sistema de calentamiento de agua	76
	Recuperador.....	76
	Tanque de almacenamiento	76
	Análisis energético inicial vs. Análisis energético real	76
	Simulación.....	77
	Análisis económico.....	82
4.	CONCLUSIONES	83

Referencias Bibliográficas	84
Anexos.....	88

DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE RECUPERACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE CALOR PARA UNA VIVIENDA UNIFAMILIAR DE CUATRO PERSONAS

INTRODUCCIÓN

Datos y estadística mundial

El consumo mundial de combustibles fósiles, según un estudio realizado por la empresa petrolera British Petroleum, muestra que el 33.1% del consumo mundial de energía está dado por la quema de petróleo y sus derivados, el carbón tiene un 29.9% y el gas natural tiene un consumo de 23.9% (BP, 2012).

Como se observa, del total de energía disponible, el 86.9% depende de los combustibles fósiles. Por esta razón se ve imprescindible crear, cambiar y mejorar tecnologías y procesos para lograr optimizar el uso de la energía y recursos disponibles sin afectar la economía y desarrollo de los países involucrados.

Datos y estadística nacional

El Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos del Ecuador, en su Balance Energético Nacional de 2015 (año base 2014), presenta importantes indicadores sobre el aporte que el petróleo significa en la energía del país, según el balance el petróleo constituye el 88.4% (equivalentes a 324.34 GWh) de la producción total de energía primaria. Este 88.4% de energía primaria se divide en 78.3% proveniente de la suma de los productos derivados de petróleo en la cual se obtiene energía secundaria proveniente de los centros de transformación¹ y el restante 21.7% corresponde a energía eléctrica (MICSE, 2015).

Como se puede observar la obtención de energía por medio de fuentes fósiles es predominante en el Ecuador, por lo que es de primordial importancia, al igual que a nivel mundial, el reducir su producción y optimizar su uso mediante tecnologías que permitan ahorrar estos recursos.

¹ “Los centros de transformación son plantas donde la energía que entra se modifica en procesos especiales de industrialización o conversión energética mediante procesos físicos y/o químicos, entregando una o más fuentes de energía diferentes a la o las de entrada, como, por ejemplo: refinerías, centrales eléctricas, centros de gas, entre otras” (MICSE, 2015).

Para el año 2014, el Ecuador tuvo una producción total de energía primaria equivalente a 227.210 KBEP² (386.12 GWh), de los cuales 96.150 KBEP (163.39 GWh) corresponden a consumo dentro del país (MICSE, 2015)

A nivel residencial, el Ecuador tuvo un consumo 11.921 KBEP (20.26 GWh), además en GLP se consumió 8.347 KBEP (14.18 GWh). Debido a esto, el consumo total de energía en el sector residencial y de GLP suman un total de consumo del 9% de la producción total de energía primaria, y por tanto su uso y posible ahorro es un punto importante para el desarrollo energético en el país. (MICSE, 2015).

Ahora bien, el GLP es utilizado a nivel doméstico para la cocción y para calentar el agua de uso doméstico. Al observar los datos que presenta la figura 1, se puede determinar que el uso de GLP en los hogares es predominante (90.98%), en tanto que la minoría (9.02%) usa otros tipos de combustibles (INEC, 2010).

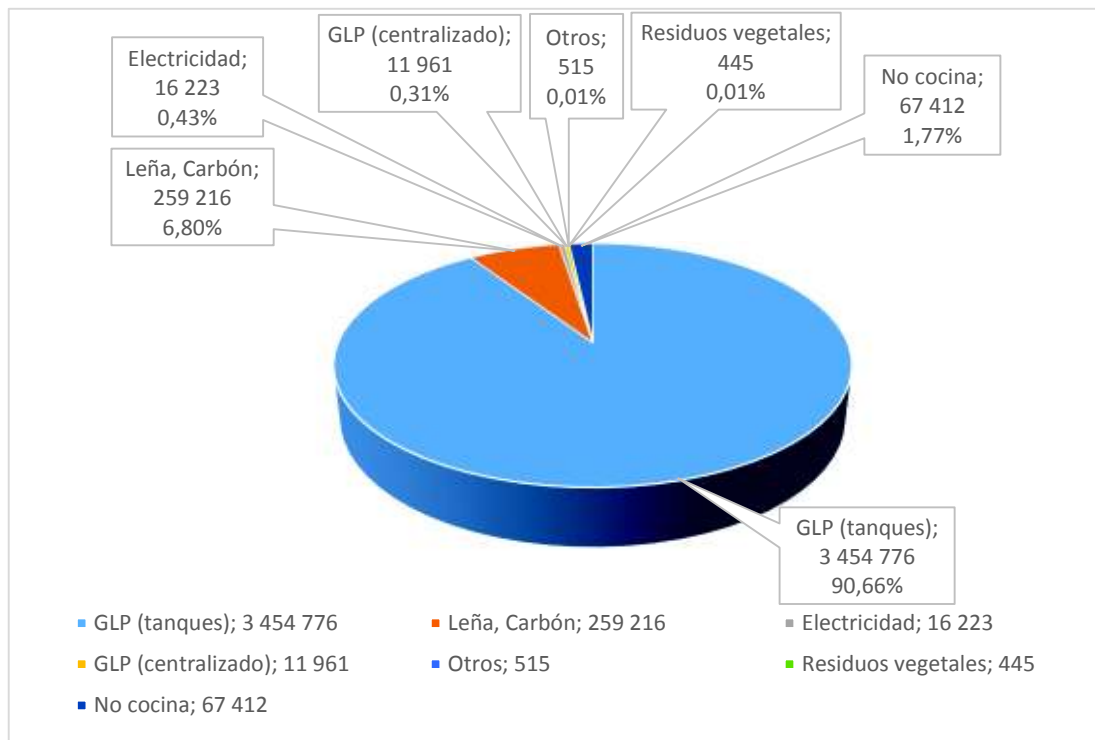


Figura 1. Uso del GLP y otros energéticos en los hogares del Ecuador (INEC, 2010).

² Un KBEP es equivalente a 10³ BEP (1 BEP = 0.13878 TEP).

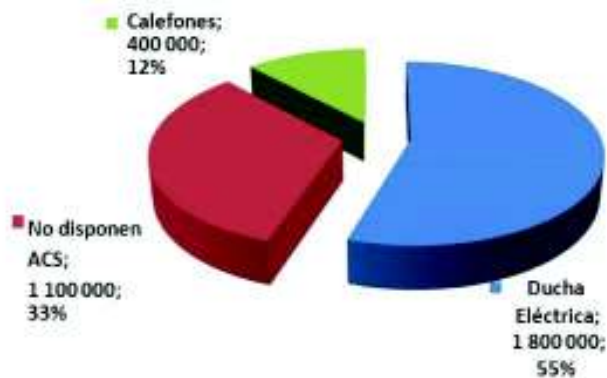


Figura 2. Agua caliente en los hogares ecuatorianos (MEER, 2015).

Como se puede observar en la figura 2, la utilización de recursos como el GLP y la electricidad para calentar el agua es muy importante y representa un costo para los hogares en su adquisición.

En este contexto, este proyecto tiene como objetivo proponer un sistema que permita la reutilización de energía térmica que se desecha en el sector doméstico en los diferentes usos, con la finalidad de reducir gastos económicos y energéticos por el uso del GLP.

Entre las principales ventajas que trae la optimización del uso de este recurso tenemos:

- El calentar el agua en los hogares disminuirá la demanda del GLP y como consecuencia se ahorrará dinero al país en procesos de refinamiento y procesamiento para la obtención del mismo.
- Los hogares al optimizar su uso van a disminuir la cantidad de cilindros que van a comprar mes a mes para abastecerse y suplir su necesidad en el calentamiento de agua.

Este estudio se llevará a cabo tomando en cuenta tecnologías existentes en documentos científico-tecnológico de vanguardia con la idea de adaptar esos conocimientos a la disponibilidad tecnológica y ambiental en el Ecuador. Además, se analizarán las ventajas y desventajas de cada sistema y en base a esto se podrá decidir la clase y tipo de elementos que conformarán el sistema de recuperación de calor adecuado.

Es importante mencionar que se tomará en cuenta la disponibilidad de cada uno de los elementos que conforman el diseño energético en el mercado ecuatoriano, así como los costos para un posterior análisis económico y simulación del sistema que determinará la viabilidad de este.

Revisión bibliográfica

A la fecha, las construcciones de las viviendas en Quito están basadas en el uso de GLP y/o electricidad para el calentamiento de agua sanitaria. En el Ecuador no se tiene la suficiente acogida el tomar en cuenta otras alternativas que pueden ayudar de alguna manera a disminuir esta problemática.

Las investigaciones de reutilización de las aguas residuales para uso térmico son diferentes y muy variadas, como por ejemplo Sebastián Silva, estudiante de la Universidad de Chile, en su proyecto final de carrera realizó un estudio sobre el uso eficiente de la energía en las viviendas. En este estudio realiza el análisis energético y cuantificación de costos y beneficios para aprovechamiento de calor para calefacción, calentamiento de agua sanitaria y servicios. Para realizar esto, tomó muestras de datos en casas de condominio de aproximadamente 250 m² y dividió el estudio en dos fases. En la primera fase, se revisaron térmicamente las viviendas para proponer oportunidades de mejora en la demanda energética tanto en calefacción como en agua caliente sanitaria. En la segunda fase, se presentaron alternativas para reducir dicha demanda. La opción más conveniente después de analizar la estructura y hablar con los condóminos fue utilizar bombas de calor lográndose un ahorro anual del 45%. (Silva Vargas, 2009).

DAS Experto Ambiental S.R.L. en Dresde Alemania, diseñó un intercambiador de calor acorde a la necesidad de agua caliente para sus procesos en Schumacher Packaging GmbH. El proyecto consistió en aprovechar el calor que se desperdiciaba de las aguas residuales de la planta. Para esto el intercambiador de calor tomaba las aguas residuales en su parte interna y el agua precalentada (tomada del río Grosse Mittweida) para sus procesos en las paredes externas, para el tema de mantenimiento instaló internamente en el intercambiador un sistema de cepillos que constantemente se encuentran en rotación. Los cepillos al girar, pasan limpiando las paredes del intercambiador y a su vez crean un flujo turbulento que va en sentido al flujo del agua precalentada limpia mejorando la transferencia de calor. Con esto la planta de GmbH solucionó el problema que presentaba en invierno de que el agua que ingresaba era muy fría (5 °C), además de que redujo el gasto en 40% del volumen de gas que utilizaban para calentar el agua. Con esto, la inversión del sistema se pagó en su totalidad en el primer mes (DAS Experto Ambiental S.R.L. , 2018).

Wong, Mui y Guan de la Universidad Politécnica de Hong Kong, realizaron un estudio sobre recuperación de calor del agua de la ducha en edificios residenciales de gran altura de Hong Kong. Para esto realizan la instalación de un intercambiador de calor horizontal de un solo paso en contraflujo justo debajo del desagüe de la ducha. Una vez realizada la instalación, utilizaron el enfoque efectividad-número de unidades de transferencia (e-NTU) para tomar datos a través de cierto tiempo de

funcionamiento de la ducha y caudal de agua y la técnica de muestreo de Montecarlo, con lo cual evaluaron la temperatura del agua en los cabezales de las duchas, drenajes y tuberías de suministro de agua fría. Los resultados indicaron que el calor de la ducha se puede recuperar de 4-15% con una longitud del intercambiador de calor de 1.5 m y diámetro de 50 mm del tubo (Wong, Mui, & Guan, 2010).

Arnell, Lundin y Jeppsson miembros de la División de Ingeniería Eléctrica y de la Facultad de Ingeniería en Automatización de la Universidad de Lund en Suecia realizaron un análisis de sostenibilidad para la recuperación de calor de aguas residuales. En este análisis toman como punto de partida el hecho que la gestión de agua caliente sanitaria doméstica ocupa hasta el 90% de la energía que se consume en cada hogar. Es por esto por lo que analizan la extracción del calor de las aguas residuales como alternativa a través del uso de intercambiadores de calor, bombas de calor o ambos. Para esto realizan modelos matemáticos para evaluar instalaciones WWHR (Wastewater heat recovery) individuales en las alcantarillas en Suecia, Suiza y América del Norte, tomando en cuenta que en estos sistemas se presentan ciertos obstáculos como por ejemplo obstrucción y contaminación de equipos, impactos potencialmente negativos del sistema y viabilidad económica. Como resultado final, determinan que las bombas de calor alcanzan un coeficiente de rendimiento de 3 a 7, es decir, que por cada kW eléctrico que utiliza la bomba de calor para energizarse y funcionar, produce de 3 a 7 kW térmicos con lo que claramente se puede determinar que el sistema no solamente es adecuado, sino que también se debería recomendar para temporadas de invierno bastante fuertes. Este índice mejora cuando la temperatura del agua residual es mayor (Arnell, Lundin, & Jeppsson, 2017).

Spriet y Hendrick del Departamento de Ingeniería Civil, Estructural y Ambiental de la Universidad Libre de Bruselas analizaron tecno-económicamente en la región de Bruselas las aguas residuales como fuente de calor para el calentamiento individual de una residencia. Para esto realizan una instalación de prueba llamada MYRTES que consta de un intercambiador de calor en el sistema de alcantarillado conectado a una bomba de calor. El intercambiador aumenta la temperatura del foco caliente de las bombas de calor y, por lo tanto, calienta el agua más eficientemente. Al final con ciertas simulaciones, llegan a la conclusión de que este sistema es más económico que los sistemas de bombas de calor tradicional por aire y más costoso que los sistemas de calderas de gas. La eficiencia del sistema es 49% menor que los sistemas de calderas de gas y 13% más bajo que el sistema de bombas de calor por aire. Como consecuencia este sistema es menos eficiente que los sistemas de bombas de calor y calderas de gas tradicionales, el único beneficio es que es más económico que los sistemas de bombas de calor (Spriet & Hendrick, 2017).

La compañía Huber Technology, publicó un artículo en su página web “Huber Technology – Waste Water Solutions”, en el cual utilizaron el calor de las aguas residuales (aguas negras) para calentamiento de agua sanitaria y calefacción mediante un intercambiador de calor llamado RoWin. El intercambiador de calor tiene un sistema automático de limpieza que evita el estar realizando desmontajes y montajes para el mantenimiento de los paneles del intercambiador por medio de módulos (aspas giratorias) que al mismo tiempo generan ondas de turbulencia en el fluido para mejorar la transferencia de calor. Se utiliza una instalación de cribado³ para proteger automáticamente a la bomba y al intercambiador de calor (HUBER Technology, 2018).

En estos estudios, al igual que en este, se busca determinar una nueva opción para el uso del calor desperdiciado de las aguas residuales generadas en la ciudad de Quito. Con esta premisa, este estudio quiere plantear una alternativa tanto en la fuente de calor desperdiciado (aguas grises) como en la tecnología para lograr su aprovechamiento de la manera más eficiente posible (intercambiador de calor).

Pregunta de Investigación

¿Es factible implementar un sistema que permita reducir el consumo de GLP por medio de un intercambiador de calor para calentamiento de agua sanitaria en los hogares quiteños recuperando el calor de las aguas grises?

Objetivo general

Diseñar y analizar energéticamente un sistema de recuperación del calor rechazado por el uso de agua caliente doméstica y sus posibles aplicaciones para una vivienda unifamiliar de cuatro personas en la ciudad de Quito, con el fin de reducir la utilización de GLP en el calentamiento de agua sanitaria.

Objetivos específicos

- Cuantificar el potencial de energía térmica que se puede recuperar en áreas del hogar donde se utilice agua caliente doméstica.

³ Método de realización de pruebas para detección de enfermedades o bacterias.

- Seleccionar, definir y dimensionar un recuperador de calor para precalentamiento de agua sanitaria.
- Definir y dimensionar el sistema de almacenamiento de calor sensible.
- Modelar y simular el sistema mediante dinámica de sistemas para entender su comportamiento causal en situaciones más pegadas a la realidad.
- Realizar un estudio económico del sistema de recuperación y almacenamiento de calor estudiado.
- Determinar la factibilidad que tiene el sistema y definir aplicaciones importantes del mismo.

Alcance

El sistema en estudio será diseñado y analizado con la finalidad de dar una base en cuanto a este tipo de sistemas que puedan suplir esta necesidad de recuperar el calor desechado y reutilizarlo con la finalidad de disminuir costos en el uso de GLP para calentamiento de agua sanitaria, siempre con un enfoque para futuros estudios o proyectos que puedan tomar como referencia el mismo e implementarse en una o varias aplicaciones residenciales o industriales.

1. MARCO TEÓRICO

Actualmente la conciencia de ahorro energético está tomando fuerza dentro de la industria y edificaciones. Esto ha generado el diseño de múltiples aplicaciones con la finalidad de hacer los procesos más eficientes y provechosos en cuanto a uso de recursos, y reducción de gastos innecesarios.

A continuación, se definirán brevemente ciertos aspectos fundamentales para el desarrollo de esta tesis.

1.1. Calentamiento de agua

El sistema térmico de la vivienda unifamiliar para este estudio se enfocará en el calentamiento de agua. En los hogares ecuatorianos se calienta agua para uso sanitario, es decir, duchas y para lavar platos y para lavar la ropa también. Para esto se utilizan principalmente Sistemas de Calentamiento de Agua (ACS) como se detallan a continuación:

1. Calentadores de agua a gas: También llamados calefones a gas, estos equipos están compuestos por un serpentín de material conductor de calor; el cual es sometido a una llama piloto o control electrónico de encendido el cual va a calentar el agua mientras ésta circula por la unidad. Generalmente pueden usar GLP, gas natural o propano (KISENSE, 2016).
2. Calentadores de agua eléctricos: Estos calentadores de agua tienen un funcionamiento automático de encendido y apagado por medio de una sonda al llegar a temperaturas de trabajo entre los 60 °C y los 75°C respectivamente. Su principio de funcionamiento es a través de una resistencia eléctrica en su interior (Certicalia, s.f.).
3. Duchas eléctricas: Estas duchas eléctricas calientan el agua en el cabezal, el cual tienen un espacio definido para que el agua se acumule se caliente por medio de una resistencia eléctrica que se encuentra en su interior (Guerrero, 2007).
4. Otros: En este sector calientan el agua de diversas formas (madera, en cocina, etc.) para su aseo.

1.2. Recuperadores de calor

Los sistemas de recuperación de calor son definidos para reducir la utilización de recursos y para generar ahorros económicos. Estos no son más que intercambiadores de calor en los cuales se utiliza

el calor contenido en un fluido que será desechado de un proceso principal, para calentar un fluido en un proceso secundario.

Los recuperadores pueden ser utilizados en un rango amplio de aplicaciones, desde los industriales hasta los domésticos. Por esta razón existen también muchos tipos de sistema ya definidos para múltiples funciones en el mercado. Por ejemplo, encontramos los industriales de alta eficiencia térmica que recuperan el calor contenido en los gases de combustión, o los recuperadores de calor para la cogeneración en plantas CHP (Combined heat and Power plant) en el sector eléctrico. No obstante, en este trabajo de titulación nos enfocaremos únicamente en los recuperadores de calor de uso doméstico que utilizan agua caliente sanitaria que será desechada.

Para lograr esto, se define un recuperador de calor que trabaje con aguas grises que normalmente son desechadas por el desagüe. Este debe cumplir con ciertas características según los requerimientos del sistema con el fin de satisfacer la necesidad de las personas que viven en la vivienda unifamiliar a cualquier hora del día, manteniendo una eficiencia estable promedio.

Dentro del sistema de recuperación, es también primordial definir un sistema de almacenamiento de calor que permita que el agua precalentada no solamente se almacene, sino que también mantenga la temperatura del fluido por un intervalo de tiempo de uso mínimo con el fin de siempre suministrar el agua al sistema de calentamiento a una temperatura mayor a la temperatura del suministro de agua pública.

1.3. Almacenamiento

En general, un sistema de almacenamiento térmico se vuelve indispensable al hablar de un sistema de recuperación de calor, ya que este permite tomar el recurso desperdiciado en varios procesos y focalizarlo en otras actividades independientemente si es que estas actividades se realizan en el mismo instante de la recuperación.

Obviamente, esta necesidad de almacenamiento dependerá de la actividad y función del recuperador. En nuestro caso, el almacenamiento no es tan crucial, pero si importante.

Para proyectos térmicos en pequeña escala en conjuntos habitacionales o viviendas unifamiliares las técnicas de almacenamiento se ven marcadas por dos métodos: la primera es de tanques de

almacenamiento (almacenamiento por calor sensible) y la segunda viene dada por los materiales de cambio de fase o también conocida por sus siglas en inglés PCM (almacenamiento por calor latente).

Almacenamiento por calor latente

El almacenamiento por calor latente, es la absorción o salida de calor en un material que almacena o libera calor al cambiar de fase. En el Ecuador actualmente estos materiales de cambio de fase se encuentran muy escasos y costosos, por lo que no serán tomados en cuenta ya que la idea de este estudio es proponer una solución que se encuentre en el país actualmente, de fácil adquisición y a costos adecuados para que el sistema no sea muy costoso en la inversión.

Almacenamiento por calor sensible

En el análisis de tecnologías ya en uso a nivel mundial, se puede determinar que el almacenamiento por calor sensible con diversos materiales es el más usado, así como el más estudiado.

Lo más acostumbrado a utilizar en el mercado ecuatoriano en el tipo de almacenamiento sensible es el empleo de un tanque de acero o polietileno correctamente calculado, diseñado y construido bajo especificaciones según las condiciones que brinda el fluido, condiciones a las que va a encontrarse trabajando y requerimientos de funcionamiento. Para el almacenamiento de calor, el tanque también debe ir con una cubierta de material aislante (poliuretano, por ejemplo) que evite la transferencia de calor del fluido hacia el medio ambiente. Cuando estos tanques se encuentran a la intemperie deben tener un recubrimiento de protección ultravioleta para evitar la formación de bacterias (legionela) y algas que puedan contaminar el agua almacenada.

1.4. Análisis económico

Para el análisis económico del sistema, se tomarán en cuenta tres métodos importantes para determinar la rentabilidad del proyecto con la finalidad de determinar si es viable o no. Para esto usaremos el VAN, el TIR y el tiempo de retorno de la inversión.

Para poder calcular el VAN, el TIR y el tiempo de retorno de la inversión, necesitamos los flujos de ingresos y egresos logrados por el sistema, para esto se tomará un tiempo de 10 años con una tasa de interés de 7.98 % (Banco Central del Ecuador, 2018).

1.5. Definición del sistema

Características generales

Para la recuperación de la energía térmica del agua caliente doméstica que se desecha se utiliza generalmente un intercambiador de calor, destinado a precalentar el agua antes del proceso principal de calentamiento.

Para la selección del sistema deseado se estudian dos parámetros primordiales: 1) las necesidades de uso que tiene la vivienda, y 2) el recurso térmico recolectado posible por el recuperador de calor. Esto hace que el conjunto recuperación y almacenamiento sea objeto de un estudio donde las condiciones ambientales y estructurales de la vivienda estén dadas para el acondicionamiento del sistema.

Un factor limitante para el proyecto es la disponibilidad de insumos en el mercado ecuatoriano para la hipotética construcción del sistema, ya que esto es fundamental para que la posible implementación del sistema sea factible en el futuro dentro de la industria ecuatoriana.

Detalle del sistema

En el capítulo anterior se definió todos los servicios más habituales que intervendrán en el sistema y que aportarán de manera significativa en energía térmica que será aprovechada por nuestro intercambiador de calor:

- a) Calefón (fuente principal de calentamiento)
- b) Ducha
- c) Lavamanos
- d) Lavaplatos
- e) Lavadora
- f) Intercambiador de calor (fuente principal de precalentamiento)
- g) Tanque de almacenamiento

1.6. Especificaciones de la vivienda

Vivienda

Hasta el 2015 en el Distrito Metropolitano de Quito, aproximadamente el 70% de las edificaciones modernas urbanas tienen una salida de aguas que se vierten a través de las redes de evacuación centralizada de alcantarillado, las mismas que son posteriormente desechadas al ambiente (Subsecretaría de Hábitat y Asentamientos Humanos (SHAH), 2015).

Estas aguas están compuestas por las denominadas aguas negras, que provienen de los inodoros y que por lo tanto contienen material fecal u orina, y las aguas grises, que no contienen material fecal y orina, y provienen de los elementos domésticos como duchas, lavabos, etc.

Si bien esta agua no puede volverse a utilizar para el consumo humano (sin un tratamiento previo), éstas tienen un contenido energético térmico importante y reusable que también es desechado al ambiente. En otras palabras, existe un gran potencial de mediante el agua caliente que se desecha por el desagüe.

Caracterización energética

La información estadística en el Ecuador obtenida en el Censo de Población y Vivienda realizado en el año 2010, muestra valores, en áreas específicas como, por ejemplo, en los materiales de construcción, la conformación y distribución en sí de la vivienda, características importantes en base a los cuales este estudio se basará.

Características de la vivienda a estudiar

TIPO DE CONSTRUCCIÓN

Tomando en cuenta los datos del censo el IGM y SENPLADES muestran estos parámetros en la siguiente figura 3.

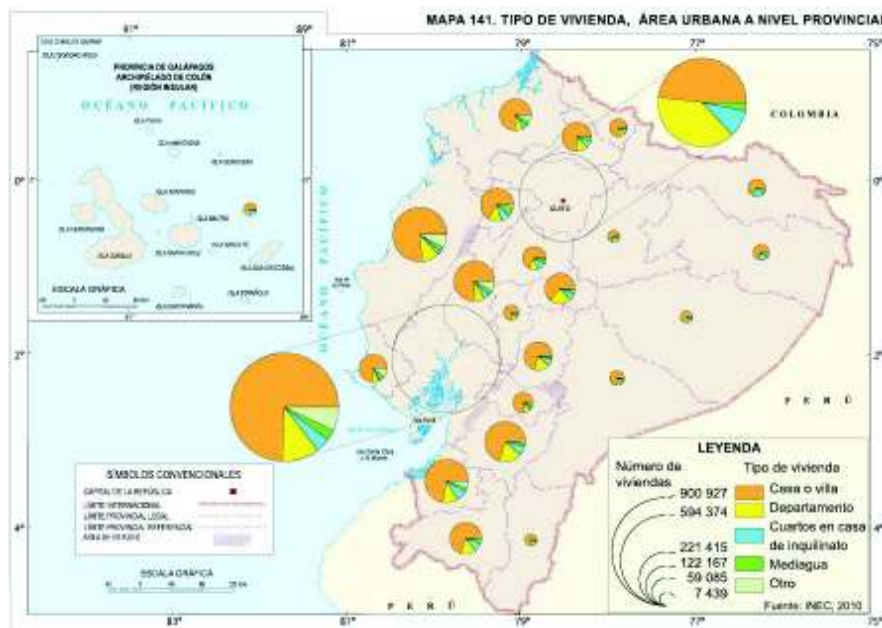


Figura 3. Tipo de Vivienda, Área Urbana a Nivel Provincial (Ministerio de Defensa Nacional, 2013).

Con los datos obtenidos de los mapas se observa que a nivel nacional el mayor porcentaje de viviendas del tipo casa o villa en el sector urbano es de un 70% y en el ámbito rural es del 78%, con un porcentaje

a la baja en el sector urbano por la alta tendencia a la construcción de departamentos y conjuntos habitacionales (Ministerio de Defensa Nacional, 2013).

Con los datos que se acaban de observar, en este estudio se tomará la vivienda promedio que estará al alcance de la gran mayoría de familias ecuatorianas, es decir, del estilo de construcción sencilla y sin lujos.

Debido a la ordenanza 172, las viviendas unifamiliares deben tener como mínimo un baño completo, es decir, lavabo, inodoro y ducha. Para efecto de este estudio se tendrá en cuenta dos baños completos y un baño social (Comisión de Planificación y Nomenclatura, 2003), además para simplificación del sistema en concordancia con la construcción quiteña, consideramos que la casa tendrá dos plantas en las que se ubicarán las diferentes áreas habitables de la siguiente manera:

Primera Planta:

- Baño Social
- Sala
- Comedor
- Cocina
- Área de máquinas (lavadora y secadora)

Segunda Planta:

- Habitación Máster
- Baño Máster
- Dos habitaciones

HABITANTES

Según el censo de Población y Vivienda el promedio en el número de integrantes de una familia es de 3,78 personas por familia a nivel nacional, en la provincia de Pichincha es de 3,54 personas por familia y en la ciudad de Quito es de 3,49 personas, de igual manera muestra que una vivienda promedio posee dentro de la zona urbana un promedio de 2 baños (INEC, 2010).

Por lo mencionado antes por el INEC se tomará como base a 4 personas que integran una familia promedio.

PENETRACIÓN DE SERVICIOS PÚBLICOS

Las características de la vivienda ecuatoriana, según el censo realizado en el 2010, se expresan según varios parámetros como el tipo de vivienda, la tendencia hacia la adquisición propia de casa o villas, el tipo de materiales usados en la construcción y el número de personas que viven en la casa.

La vivienda promedio tiene los servicios básicos entregados por los distintos organismos de control y regulación, estos en porcentajes a nivel nacional se muestran en la siguiente tabla 1:

Tabla 1. Penetración de Servicios Públicos otorgados a las familias a nivel nacional (INEC, 2010).

Servicio Público	Valor (%)
Servicio Eléctrico Público	93.2
Red Pública de Alcantarillado	53.6
Recolección de Basura	77.0
Agua de red Pública	72.0
Servicio Telefónico	33.4

Ahora bien, para el Distrito Metropolitano de Quito tenemos que el 87.63% tiene acceso al servicio de alcantarillado. De este porcentaje el cantón Quito presenta un 90.91% de acceso a este servicio por lo cual el sistema es adaptable a la ciudad sin ningún problema, esta información se puede corroborar en el anexo A.

REQUISITOS EN LAS INSTALACIONES DE AGUA CALIENTE SANITARIA

Las viviendas deberán tener instalaciones que cumplan con ciertas condiciones para lograr que la red interior de suministro de agua permita tener caudales instantáneos mínimos y presiones adecuadas para la provisión correcta e ininterrumpida de agua caliente sanitaria. A continuación, en la tabla 2 (recortada), se observan estos requisitos:

Tabla 2. Demandas de caudales, presiones y diámetros en aparatos de consumo (Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, 2011).

Elemento sanitario	Caudal instantáneo mínimo (L/s)	Presión		Diámetro según NTE INEN 1369 (mm)
		Recomendada (m.c.a.)	Mínima (m.c.a.)	
Calentadores / calderas	0.30	15.0	10.0	20
Ducha	0.20	10.0	3.0	16
Fregadero cocina	0.20	5.0	2.0	16
Inodoro con depósito	0.10	7.0	3.0	16

Lavabo	0.10	5.0	2.0	16
Máquina de lavar ropa	0.20	7.0	3.0	16

Estas condiciones de abasto de ACS en cualquier punto de la vivienda serán consideradas como existentes en nuestro sistema.

1.7. Calentadores de agua

Adicionalmente, para que exista agua caliente dentro de la vivienda, la casa debe contar de algún sistema de calentador de agua doméstica.

Según el INEN, los tipos de calentadores pueden ser de almacenamiento e instantáneo. Para nuestro estudio utilizaremos un calentador instantáneo ya que nos permiten ahorrar espacio al no contar con un tanque de almacenamiento propio del equipo y por supuesto ya que tienen una eficiencia del 84% (tabla adjunta en el anexo B), lo cual nos permite tener una temperatura regulada constante por más tiempo sin tener tantas pérdidas de calor ni recurso al final del proceso de calentamiento de agua. Este tipo de calentador de agua tiene una clasificación de acuerdo a la capacidad que tiene para aumentar la temperatura en 20 °C de cierto volumen de agua (8, 12, 14, 18, 20 y 26 litros). Deben instalarse en lugares ventilados debido a que la energía no utilizada se libera en forma de aire caliente y CO₂ (Criollo Cumbe & Pogo Guamán, 2011).

1.8. Esquema del sistema

A continuación, en la figura 4, se presenta un esquema del sistema a estudiarse.

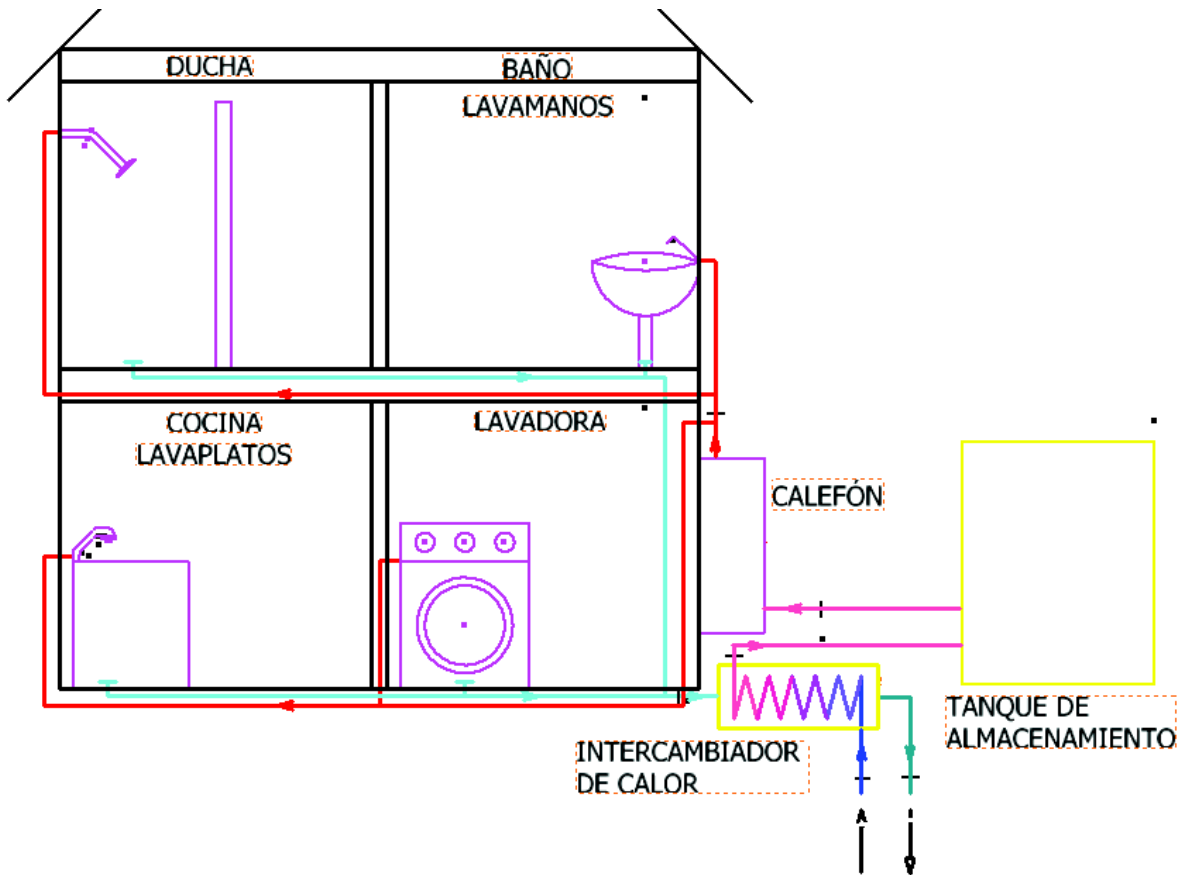


Figura 4. Esquema del sistema (Propia).

Cuando algún ocupante utilice algún consumo, el agua del suministro ingresará al intercambiador de calor inicialmente, luego ésta al ser pre-calentada con el agua que sale de cada consumo a cierta temperatura pasará al tanque de almacenamiento. Al tener ya cierta energía térmica ésta pasará por último al calefón donde completará su temperatura para el consumo final.

1.9. Características del sistema

Para lograr que el sistema tenga un diseño adecuado y funcional, éste debe cumplir varias características de suma importancia como son:

Materiales

Este estudio tiene como uno de sus objetivos el definir un sistema eficiente construido con materiales de fácil obtención que permita recuperar el calor en la cantidad posible a fin de que se necesite la menor cantidad de energía suministrada al sistema para precalentar el agua sanitaria que se va a utilizar en las actividades diarias y así reducir el consumo de recursos como GLP o electricidad.

Funcionamiento

El funcionamiento se detallará en el siguiente capítulo con especificaciones, metodologías y cálculos asegurando su buen funcionamiento y eficiencia.

Rendimiento

La idea del presente estudio es realizar un sistema que permita recuperar la mayor cantidad de calor, logrando la mayor eficiencia posible para obtener los mejores resultados al precalentar el agua que se va a utilizar en los diferentes servicios diarios.

1.10. Estadísticas de consumo y calor desperdiciado por elemento

Para este estudio es imprescindible el conocer los datos de consumo de agua que se dan por cada elemento (máquina o dispositivo) que vamos a ocupar en una vivienda para satisfacer las necesidades básicas del diario vivir como antes se indicó: lavar los platos, lavar la ropa y usos sanitarios (lavabo, duchas e inodoros). Estos datos se deberán definir en términos de volumen y frecuencia de consumo (por persona y/o por día).

Así también, de manera paralela, para lograr una estimación del contenido calorífico en el agua desechada por estos consumos, se debe definir la temperatura a la cual cada consumo de agua se encuentra.

Es por esto, que este subcapítulo se dividirá en dos partes: 1) consumo de agua y frecuencia de uso por persona, elemento, máquina o dispositivo; y 2) temperatura promedio definida por consumo.

1.11. Consumo de agua y frecuencia por elemento

Duchas

Para poder determinar el consumo de las duchas, es necesario primero definir el tiempo regular que una persona se demora en tomar un baño.

Según estudios realizados por la Organización Mundial de la Salud (OMS), el consumo de cada persona al ducharse en 20 minutos es de 95 litros (Organización Mundial de la Salud, 2014).

Según el manual para el consumo responsable de agua potable de la Superintendencia de Servicios Sanitarios (SiSS) del Gobierno de Chile, una persona en promedio puede llegar a utilizar entre 80 a 120 litros de agua al ducharse dependiendo de la forma, velocidad y tiempo que emplee (SiSS, s.f.).

Para este estudio siguiendo estas referencias, tomaremos que el volumen de agua que utiliza una persona para ducharse será de 95 litros, esto debido a que no existen datos reales y confiables del consumo Quiteño hasta la fecha.

Fregadero – cocina

Como ya se mencionó anteriormente la cantidad de habitantes en nuestra vivienda unifamiliar será de 4 personas, tomando en cuenta esto tenemos una cantidad aproximada de 8 platos (entre platos soperos y tendidos), 2 fuentes (utilizadas para ensaladas, arroz, sopas, etc.), 7 vasos y 16 cubiertos (entre cuchara sopera, tenedor, cuchillo y cuchará repostera) durante el día.

En un estudio realizado por el Instituto Costarricense de acueductos y alcantarillados, al tener la llave abierta en el lavaplatos corre 8 litros de agua por minuto. Normalmente en esta actividad toma entre 10 y 15 minutos, por lo que el consumo de agua estaría definido entre 80 y 120 litros por cada vez que se realice esta actividad (Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados, 2010).

Para este estudio se tomará esta referencia, tomando en cuenta que en nuestra vivienda unifamiliar de 4 personas será de 120 litros.

Lavabo

Para el análisis de la cantidad de agua que se utiliza en lavabo debemos tomar en cuenta que en esta instalación se realizan varios servicios como son lavarse los dientes, lavarse las manos y afeitarse, entre otros usos.

Dependiendo también del diámetro de la llave o mezcladora que se utilice en los lavabos, se estarían utilizando aproximadamente 6 litros de agua por minuto (Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados, 2010). Para nuestro estudio, definimos los siguientes tiempos:

- Lavarse los dientes: aproximadamente 1 litro en dos minutos. Hay que tomar en cuenta que generalmente las personas realizan esta actividad entre 2 y 3 veces al día (Henríquez B., 2009)
- Afeitarse: Aproximadamente esta actividad toma un tiempo de 10 minutos, por lo que el consumo sería de 60 litros de agua sin cerrar la llave en ningún momento en el peor de los casos (Henríquez B., 2009). Para esta actividad se tomará en cuenta que se realizará una vez al día por 3 días a la semana en el peor de los casos por cada persona, para efecto de este estudio se asumirá que 2 de las 4 personas realizarán esta actividad.
- Lavarse las manos: aproximadamente 12 litros en 10 segundos por cada lavado. Contando que, en promedio, una persona se lava las manos dos veces al día mínimo (Henríquez B., 2009).

Máquina de lavar la ropa

En máquinas de lavar ropa existen dos tipos principales: de carga superior⁴ y de carga delantera⁵.

- De carga superior, manejan un tanque aproximado de llenado de 150 litros de agua por carga (MediaTrends, 2015).
- De carga delantera, manejan de 38 a 91 litros de agua por carga (MediaTrends, 2015).

Ahora, hay que tomar en cuenta que las lavadoras de hoy en día conllevan dos cargas de agua del tanque, una para refregar y otra para lavar la ropa y generalmente el tiempo se establece dentro de 3 a 5 minutos hasta llenarse el tanque al nivel adecuado para realizar satisfactoriamente la actividad de lavado según como estén configuradas las máquinas. Para efectos del estudio se tomará en cuenta que todos los días se lava algo de ropa, aunque en la práctica no es tan cierto.

1.12. Temperatura por Consumo

A continuación, se revisará brevemente datos importantes de temperaturas en las aguas grises que actualmente se utilizan en cada uso:

1. Temperatura del agua para ducharse: La temperatura ideal para bañarse se encuentra en un intervalo de 29 a 37 °C en donde el cuerpo puede relajarse (Known, 2017). Además, el tiempo que una persona debe demorarse en la ducha como máximo es de 20 minutos. Se recomienda que la temperatura del agua al momento de ducharse sea de 37 °C, con lo cual el baño será relajante para tensiones musculares (Salud). Un punto muy importante es evitar que proliferen bacterias, para evitar esto la temperatura del suministro debe ser como mínimo de 50 °C, para esto el agua después del calefón tendrá una temperatura de 60 °C. Además, se debe tomar en cuenta la pérdida de temperatura del agua en el transporte de un punto a otro y después de ducharse, la cual se tomará como referencia la temperatura aproximada de 40 °C para tener el mayor aprovechamiento de calor en el sistema.
2. Temperatura del agua después de utilizar el lavabo: En este estudio se incluirá al lavabo dentro del sistema para que los hogares cuenten con este beneficio de tener agua caliente en el lavabo. Es por esto que para la temperatura del agua que va a utilizarse en lavabos tomaremos como referencia la temperatura aproximada de 25 °C por las razones expuestas anteriormente,

⁴ Estas máquinas se caracterizan por realizar el ciclo de lavado con el tanque casi a tope de agua, como su nombre lo indica la carga de ropa se la realiza por la parte superior de la lavadora en donde se encuentra la tapa de ingreso en disposición horizontal.

⁵ Estas máquinas se caracterizan por utilizar el principio de gravedad de agua (dependiendo del tamaño de la lavadora). Como su nombre lo indica la carga de ropa se la realiza por la parte delantera de la lavadora en donde se encuentra la tapa de ingreso en disposición vertical.

para que el usuario pueda mezclar con agua fría para obtener la temperatura deseada como adecuada para lavarse las manos y lograr una higiene efectiva y evitar enfermedades y su transmisión (Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, 2011). Además, se debe tomar en cuenta la pérdida de temperatura del agua después de utilizar el lavabo, la cual se tomará como referencia la temperatura aproximada de 25 °C.

3. Temperatura del agua después de utilizar el lavaplatos: Primero hay que aclarar que al hablar de lavaplatos se refiere al clásico lavaplatos que tiene un parecido muy similar al lavabo, nada parecido a fregadoras ni lavadoras de platos eléctricas. Además, se debe tomar en cuenta que, al igual que el caso de los lavabos. Se tomará la misma temperatura de referencia 25 °C con la finalidad de que se logre un lavado higiénico de los platos y utensilios de cocina. Además, se debe tomar en cuenta la pérdida de temperatura del agua después de utilizar el lavaplatos, la cual se tomará como referencia la temperatura aproximada de 20 °C.
4. Temperatura del agua después de la lavadora: La temperatura del agua después de un ciclo de lavado va a depender en gran parte del tipo y color de ropa. En este estudio se tomará como temperatura de referencia la media de las temperaturas a las cuales se debe lavar la ropa según el tipo y color de esta, es decir 30 °C (FLOTA, 2015).

1.13. Consumo total de la vivienda unifamiliar

Para este punto del estudio, se analizarán perfiles de consumo en el paso del tiempo para un día, semana y un mes, con lo cual se podrá estimar el consumo crítico que el sistema deberá suplir en períodos de tiempo pico de uso del recurso. A partir de eso se encontrará la capacidad calórica máxima a la cual debe trabajar el intercambiador de calor y el sistema en sí.

Perfil de consumo

Para comenzar se debe tener claro las horas en donde las familias tienen un consumo elevado del recurso acuerdo con la rutina diaria de vida.

Generalmente en un día común de una persona consta de las siguientes actividades detalladas en la siguiente tabla 5, tomando en cuenta para cada actividad los valores de consumo de agua en cada una de ellas detalladas anteriormente:

Tabla 3. CONSUMO DE AGUA EN UN DÍA TÍPICO DE UNA VIVIENDA UNIFAMILIAR DE 4 PERSONA (Propia).

TIEMPO	ACTIVIDADES DIARIAS				CONSUMOS DE AGUA POR ACTIVIDADES				TOTALES (lts)
1:00									0
2:00									0
3:00									0
4:00									0
5:00									0
6:00	LAVAMANOS - AFEITARSE (x2)	LAVABO - MANOS (x2)	FREGADERO - DESAYUNO (1/2 uso)		120	48	13.4		181.4
7:00	DUCHA (x2)	DESAYUNAR (x2)	LAVABO DIENTES (x2)		190	0	4		194
8:00	DESAYUNAR (x2)	FREGADERO - PLATOS DESAYUNO (1 uso)	LAVABO DIENTES (x2)	DUCHA (x2)	0	26.8	4	190	220.8
9:00	LAVAR LA ROPA (1 uso)				150				150
10:00									0
11:00									0
12:00	FREGADERO - ALMUERZO (2 usos - lavar verduras, llenar olla sopa, llenar olla arroz, lavarse las manos)				53.6				53.6
13:00	LAVABO - MANOS (x4)	ALMORZAR (x4)	LAVARSE LOS DIENTES (x4)		96	0	8		104
14:00	FREGADERO - PLATOS ALMUERZO (1 uso)				26.8				26.8
15:00	LAVABO - MANOS (x2)				48				48
16:00									0
17:00	FREGADERO - MERIENDA (1/2 uso)	MERENDAR (x4)			13.4	0			13.4
18:00	FREGADERO - PLATOS MERIENDA (1 uso)				26.8				26.8
19:00	LAVABO - DIENTES (x4)				8				8
20:00	LAVABO - VARIOS (x1)				24				24
21:00	LAVABO - MANOS (x2)				48				48
22:00									0
23:00									0
0:00									0
GRAN TOTAL DE CONSUMO DE AGUA AL DÍA (LTS)									1098.8

Una vez definidos los consumos, podemos observar en las figuras 5 y 6 el consumo de agua individual por horas y el acumulado respectivamente:

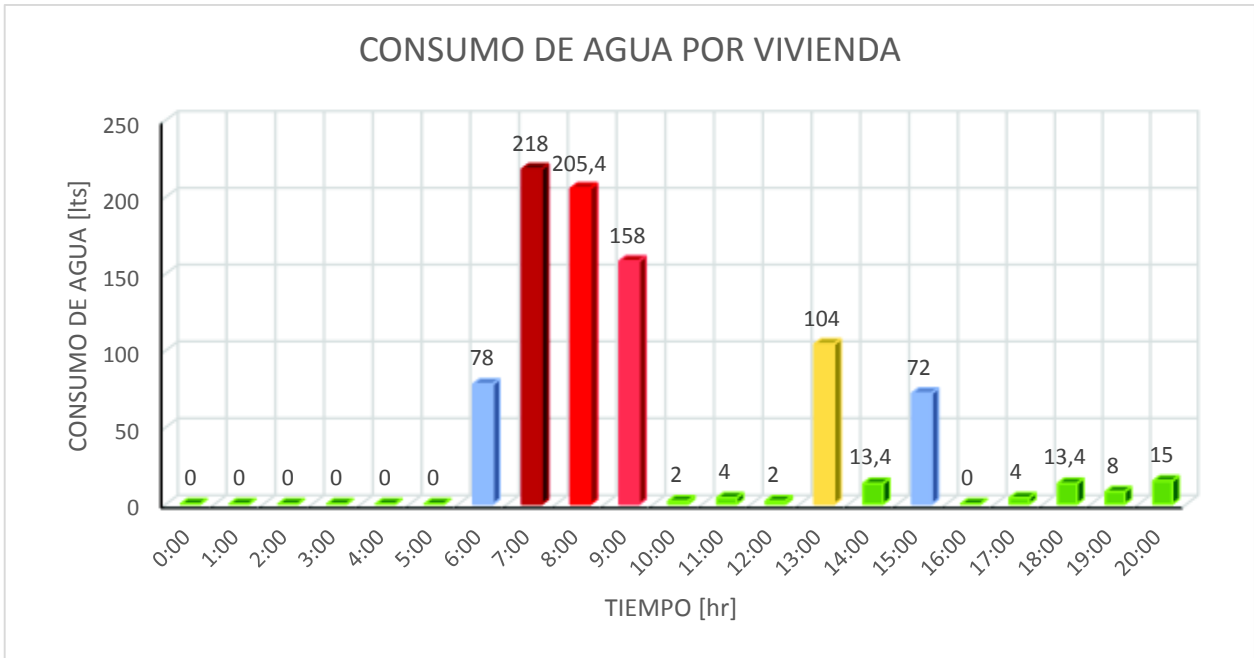


Figura 5. Perfil de consumo de agua caliente sanitaria de la vivienda unifamiliar (Propia).

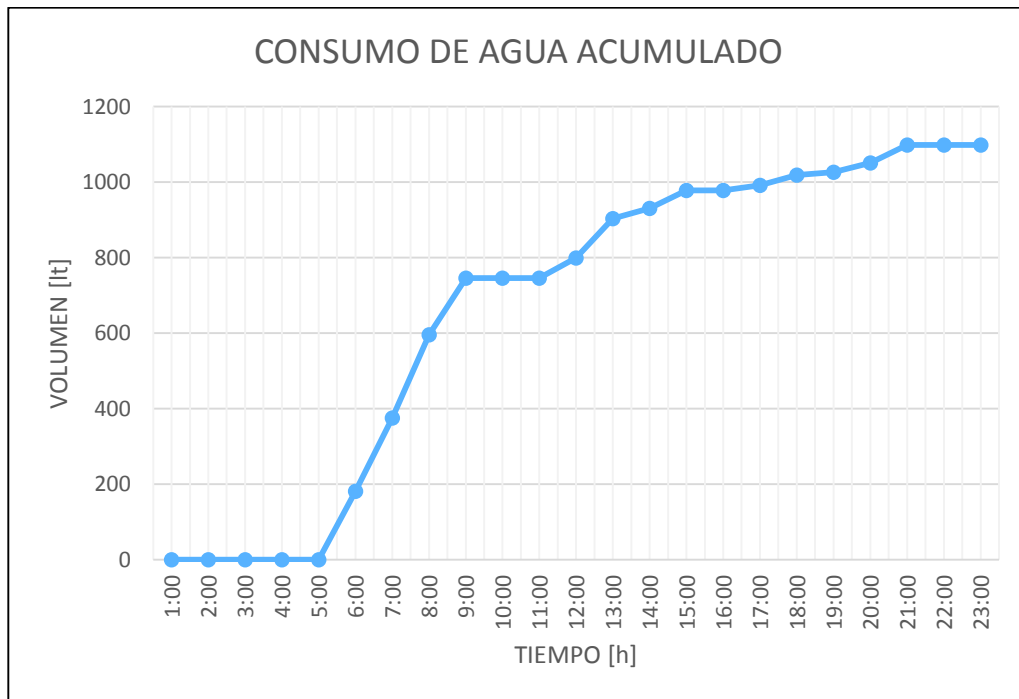


Figura 6. Consumo de agua acumulada (Propia).

Evolución del perfil de temperatura del agua:

Para la evolución del perfil de temperatura del agua, se estimará inicialmente un valor referencial de temperatura de 60 °C para todos los usos como una primera aproximación, bajo esta premisa se determina que la temperatura del agua luego de cada uso es de 40 °C. Esta aproximación será afinada en la simulación bajo condiciones reales de volúmenes, frecuencias y temperaturas de cada consumo y su afectación al sistema.

2. METODOLOGÍA

El estudio del sistema como tal se realizará mediante un proceso que parte de las condiciones más generales, hasta el comportamiento lo más aproximado posible a lo real en donde se afinarán muchas variables del sistema.

Inicialmente se realizará un análisis de calor muy general con la cual se quiere tener una primera aproximación que permitirá entender el funcionamiento del sistema bajo condiciones ideales. Luego, se ajustará el comportamiento del sistema lo más real posible al establecer condiciones y variables reales de funcionamiento. Por último, se realizará una simulación mediante el software Vensim, con el cual se podrá observar el verdadero comportamiento del sistema, los ahorros de GLP y de recursos económicos con lo cual se podrá determinar como una primera instancia la factibilidad técnica del sistema.

2.1. Análisis energético

Estimación de calor máximo del sistema

Para el análisis energético inicial, debemos conocer cuál es el calor máximo que el sistema debe proporcionar para cubrir la demanda promedio que necesitaría calentar el calefón del sistema en un día. Para definir esto tenemos la siguiente expresión:

$$Q_D = \frac{\rho * V * C_P * \Delta T}{\eta_{cal}} \quad (1)$$

Donde:

ρ = Densidad del agua

V = Volumen de agua al mes utilizado en la vivienda

C_P = Calor específico del agua

T_{ss} = Temperatura de salida de agua del sistema

T_{es} = Temperatura de entrada de agua del sistema

η_{cal} = Eficiencia del calefón

Sistema de calentamiento del sistema

Se necesita saber cuál es el calefón necesario para nuestro sistema y tener claro la cantidad de calor que éste debería inyectar al agua para calentarla a la temperatura requerida.

Para poder determinar la potencia del calefón, será necesario tomar en cuenta el punto crítico en donde se encuentra la mayor variación de temperatura y cantidad de consumo de agua caliente.

Para esto se determina que entre las 7 am y las 8 am es el punto más crítico de nuestro sistema

debido a que maneja la mayor demanda de agua y también la mayor temperatura de calentamiento a la cual se desea obtener con este sistema (60 °C). A pesar de que normalmente los calefones calientan el agua entre 45 a 50 °C, se toma el valor de 60 °C como un factor de rendimiento que permitirá al diseño del sistema siempre cumplir con la temperatura que requiere la demanda. Evaluando ambos datos se procede a determinar la potencia necesaria de nuestro calefón bajo la siguiente ecuación:

$$q_c = \dot{m} * C_p * \Delta T_c [W] \quad (2)$$

Se tomará en cuenta que se tiene un flujo volumétrico de agua de 218 lts/h (valor obtenido del consumo de agua total), entonces:

$$\dot{V} = 218 \frac{lbs}{h} * \frac{1h}{60 min} * \frac{1 min}{60 s} * \frac{0.001 m^3}{1 lt} = 6 * 10^{-5} \frac{m^3}{s} \quad (3)$$

Análisis energético del sistema de calentamiento de agua de la vivienda sin sistema de pre-calentamiento

Primero determinaremos la cantidad de calor necesaria en el sistema para calentar el agua a la temperatura necesaria (60°C) sin ayuda del sistema de recuperación de calor, para esto utilizaremos la siguiente ecuación:

$$Q_{ent} = Q_{demandado} + Pérdidas [J] \quad (4)$$

$$Q_{ent} = \rho * V * C_p (T_i - T_{ent}) + 0 [J] \quad (5)$$

Donde:

T_i = Temperatura de salida de agua del calefón después de ser calentada.

T_{ent} = Temperatura de entrada de agua al calefón, agua del suministro.

Análisis energético del sistema de calentamiento de agua de la vivienda con sistema de pre-calentamiento

Para determinar el calor requerido por el sistema con recuperación de calor primero debemos determinar el porcentaje de ahorro que deseamos que nuestro sistema de precalentamiento aporte. La idea es tener un ahorro significativo pero que no llegue a ser irreal debido a que recae en el tamaño y costos del intercambiador de calor, lo ideal es encontrar un balance para tener ahorros económicos significativos pero que no incrementen el costo del intercambiador para que la inversión no sea muy fuerte.

Tomando en cuenta esto, nuestra función objetivo será la siguiente:

$$Q'_{ent} = Q_{ent} - Q_{rec} \quad (6)$$

Donde:

Q_{ent} = Calor total que se inyecta al agua para alcanzar la temperatura requerida de uso.

Q'_{ent} = Calor que el calefón inyectará al agua.

Q_{rec} = Calor que el sistema de precalentamiento inyectará al agua antes de que ingrese al calefón.

Como se puede observar, el calor que inyectará el sistema de precalentamiento será una parte de lo que antes el calefón inyectaba solo para alcanzar la temperatura deseada. Con esto se logrará un ahorro en la cantidad de calor que el calefón debe inyectar al agua y por ende también disminuirá la cantidad de GLP o electricidad que utilizaba anteriormente.

Un factor predominante en este estudio es determinar ese porcentaje de calor que suministrará el sistema de precalentamiento. Esto debido a que a mayor calor que deba inyectar el sistema de precalentamiento, mayor deberá ser el tamaño o eficiencia del intercambiador de calor. Para determinar la cantidad de calor que inyectará el sistema de precalentamiento al agua se tiene la siguiente ecuación:

$$Q_{rec} = \% \text{ ahorro} * Q_{ent} \quad (7)$$

Obteniendo la nueva cantidad de calor que debe inyectar el calefón al sistema (Q'_{ent}), se puede determinar cuál sería la temperatura del agua de entrada al calefón que para nuestro caso es la misma temperatura del agua que sale del intercambiador. Para calcular esta temperatura, utilizamos la siguiente expresión:

$$T'_{ent} = T_i - \frac{Q'_{ent} * \eta_{cal}}{\rho * V * C_p} \quad (8)$$

Finalmente, para obtener la temperatura del agua que sale del intercambiador del fluido caliente utilizamos la siguiente expresión, con lo cual se tienen definidas las cuatro temperaturas que actuarán en el intercambiador de calor:

$$T_{sal} = T_o - \frac{Q_{rec}}{\rho * V * C_p} \quad (9)$$

2.2. Recuperador

Para tener una idea más clara del intercambiador de calor necesario y preciso para nuestro sistema se deben tener claro varios puntos importantes como son:

- Tipo
- Características constructivas
- Aplicaciones según el tipo
- Temperaturas medias de trabajo
- Presión máxima de operación
- Superficie de intercambio de calor
- Respuesta en operación
- Resistencia
- Costos básicos
- Mantenimiento
- Espacio y peso
- Diferencia de temperatura mínima entre fluidos
- Niveles de presión

El intercambiador de calor más recomendado para nuestro sistema es el intercambiador de calor de coraza y tubo de contacto indirecto y transferencia de calor directa con flujos de fluido en contracorriente (contraflujo) debido a sus excelentes características transferencia de calor, espacio y mantenimiento para la función que debe cumplir en la vivienda (anexos C, D y E).

En cuanto a materiales del recuperador, lo más utilizado en el mercado del Ecuador es que la carcasa sea de acero al carbono conformado, la tubería del fluido a calentarse (interna) será de cobre de bajo espesor y la tubería del fluido a enfriarse (externa) será de acero inoxidable.

Tomando en cuenta la tabla 6, el punto más crítico donde el intercambiador de calor debe precalentar el agua es el instante de tiempo entre las 7:00 y las 8:00 ($\Delta t = 1h$) de la mañana, en donde se utiliza la mayor cantidad de agua (218 lts de agua) y nuestro sistema definirá su eficiencia en el momento de mayor demanda de si es capaz o no de precalentar el agua y ahorrar costos económicos al reducir el empleo de gas (GLP) para precalentarla.

De la cantidad total de agua que se utiliza en esta hora pico de consumo, la dominancia del uso del sistema predomina en el momento de ducharse, por lo que se tomará como temperatura de salida del agua la temperatura de 60°C al uso de la ducha y como temperatura de entrada en nuestro intercambiador la temperatura del agua que llega al mismo después de utilizarla ($T_{\text{sal}} = 40^{\circ}\text{C}$, debido a que existe mezcla con agua fría para obtener la temperatura adecuada que va a utilizarse para bañarse, temperatura ideal para este uso entre 37 y 42°C) con un flujo volumétrico de 0.2 lts/s (tabla 2).

$$\dot{m}_a = 0.2 \frac{\text{lt}}{\text{s}} * \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ lt}} * \frac{1000 \text{ kg}}{1 \text{ m}^3} = 0.2 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (10)$$

Dimensionamiento del intercambiador de calor

Para poder definir el dimensionamiento del intercambiador de calor, es necesario como punto clave el conocer el área de intercambio de calor óptima que permita realizar al dispositivo el proceso especificado, satisfaciendo todos los requisitos de la vivienda para poder llegar a precalentar el agua a la temperatura mínima necesaria y justificar su empleo en los hogares ecuatorianos.

Para determinar el área óptima de transferencia de calor se tiene la siguiente expresión:

$$Q_{rec} = U * A * LMTD \quad (11)$$

En donde, U = coeficiente global de transferencia térmica

A = área de intercambio óptima de calor

LMTD = diferencia logarítmica media de temperaturas

Diferencia logarítmica media de temperaturas

La temperatura media logarítmica es la media entre los fluidos caliente y frío en los puntos equivalentes, es decir, diferencia entre temperaturas a la salida de cada fluido o diferencia entre temperaturas a la entrada de cada fluido, para nuestro caso se la obtiene a partir de la expresión (Çengel & Ghajar, Transferencia de Calor y Masa, 2011):

$$LMTD = \Delta T_1 = \Delta T_2 = T_{sal} - T_{ent} \quad (12)$$

Para flujo laminar,

$$LMTD = \left(\frac{T_o - T_{ent}}{\ln(T_{sal} - T'_{ent})} \right)$$

Para flujo turbulento. Durante el desarrollo del dimensionamiento del intercambiador, el número de Reynolds determinará el tipo de fluido que tendremos con lo cual se definirá la ecuación a utilizar.

Partiendo en este primer análisis energético que en nuestro caso nuestro sistema es balanceado se cumple la condición:

$$Q_{rec} = \dot{m}_h * C_{P_h} * \Delta T_h = \dot{m}_f * C_{P_f} * \Delta T_f \quad (13)$$

Al ser el sistema balanceado tenemos que:

$$\dot{m}_h = \dot{m}_f \quad (14)$$

y

$$C_{P_h} = C_{P_f} \quad (15)$$

$\dot{m}_C * C_{PC} = \dot{m}_F * C_{PF}$, esto se demuestra con la siguiente figura 7:

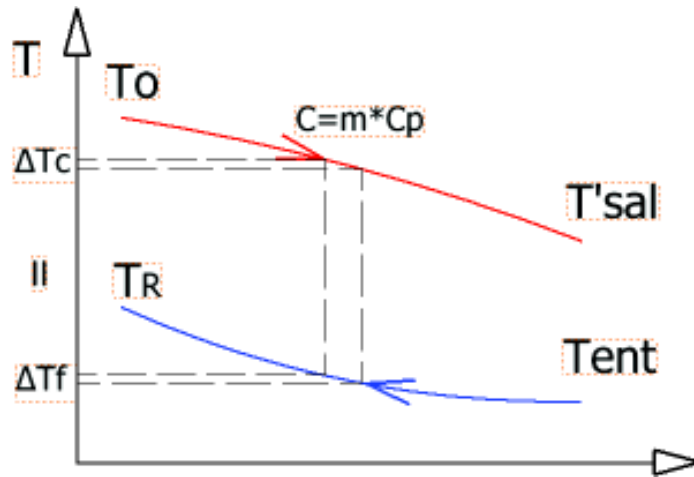


Figura 7. Diagrama T vs. X en un intercambiador de calor de contraflujo (Propia).

Entonces:

$$\Delta T_c = \Delta T_f \quad (16)$$

Como consecuencia:

$$\Delta T_{ML} = \Delta T_c = \Delta T_f = (T_o - T'_{ent}) = (T_{sal} - T_{ent}) \quad (17)$$

Dónde: T_o = Temperatura de entrada del fluido caliente a enfriarse

T_{sal} = Temperatura de salida del fluido caliente a enfriarse

T_{ent} = Temperatura de entrada del fluido frío a calentarse

T'_{ent} = Temperatura de salida del fluido frío a calentarse

Número de Reynolds

Debido a que trabajamos con fluidos, se deben determinar los números de Reynolds y Prandtl con el fin de conocer y asegurar las características de movimiento de los fluidos tanto caliente como frío:

Si: ϑ = viscosidad del fluido según la temperatura a la que se encuentra

ϑ_h = viscosidad del fluido caliente @ \bar{T}_h

ϑ_f = viscosidad del fluido frío @ \bar{T}_f

$$\bar{T}_h = \frac{T_o + T_{sal}}{2} \quad (18)$$

$$\bar{T}_f = \frac{T_{ent} + T'_{ent}}{2} \quad (19)$$

$$Re_h = \frac{4 \cdot \dot{m}}{\pi \cdot D_h \cdot \vartheta_h} \quad (20)$$

$$Re_f = \frac{4 \cdot \dot{m}}{\pi \cdot (D_h - D_f) \cdot \vartheta_f} \quad (21)$$

Donde:

Re_h = Número de Reynolds del fluido caliente

Re_f = Número de Reynolds del fluido frío

D_h = Diámetro del tubo del fluido caliente donde se transfiere el calor

$(D_h - D_f)$ = Diámetro hidráulico del tubo del fluido frío donde se transfiere el calor

ϑ_h = viscosidad dinámica del fluido caliente

ϑ_f = viscosidad dinámica del fluido frío

Número de Prandtl

Para poder calcular el coeficiente de Transferencia de Calor, también se debe conocer el número de Prandtl ya que está en función del mismo. Para esto, se calculó anteriormente la temperatura promedio tanto para el fluido caliente como para el fluido frío y con estos datos se determina en tablas el valor del número de Prandtl para cada caso.

Número de Nusselt

Ahora bien, para poder calcular el coeficiente de calor es necesario conocer el número de Nusselt. Para esto tenemos la siguiente expresión:

$$Nu_h = 0.023 \cdot Re_h^{\frac{4}{5}} \cdot Pr_h^{0.4} \quad (22)$$

$$Nu_f = 0.023 \cdot Re_f^{\frac{4}{5}} \cdot Pr_f^{0.4} \quad (23)$$

Donde:

Nu_h = Número de Nusselt del fluido caliente

Nu_f = Número de Nusselt del fluido frío

Pr_h = Número de Prandtl del fluido caliente

Pr_f = Número de Prandtl del fluido frío

Coefficiente de convección

El coeficiente de transferencia de calor representa la influencia del fluido para transferir calor a sus medios cercanos por medio de convección y cuantifica las propiedades de dicho fluido en la medida

que sus propiedades permiten dicha transferencia de calor. Representado como h , se define con la siguiente expresión:

$$h_h = N_{u_h} \frac{k_h}{D_h} \quad (24)$$

$$h_f = N_{u_f} \frac{k_f}{D_f} \quad (25)$$

Dónde: h_h = Coeficiente de convección del fluido caliente

h_f = Coeficiente de convección del fluido frío

k_h = Conductividad del fluido caliente

k_f = Conductividad del fluido frío

D_h = Diámetro del tubo del fluido caliente

D_f = Diámetro del tubo del fluido frío

Coeficiente global de transferencia de calor

El coeficiente global de transferencia de calor está determinado por la expresión en donde intervienen varios parámetros importantes como son:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_h} + \frac{1}{h_f}} \quad (26)$$

Dónde: h_h = Coeficiente de convección del fluido caliente

h_f = Coeficiente de convección del fluido frío

Debido a que el espesor de la tubería interna de cobre es bajo, la superficie interna de la tubería es similar a la superficie externa de la misma, también al ser cobre se tiene una conductividad térmica elevada. Por estas razones, en la fórmula del coeficiente global de transferencia de calor se desprecia el término de la conducción de calor a través del espesor del material de la tubería (Çengel & Ghajar, Transferencia de Calor y Masa, 2011).

Longitud del Intercambiador de calor

Ya conocidos el Coeficiente de transferencia global (U), Diferencia logarítmica de temperaturas (LMTD) y el Calor de recuperación (Q_{rec}), se puede llegar a conocer la longitud del intercambiador de calor al desglosar el área en sus componentes como indica la siguiente ecuación:

$$Q_{rec} = U * A * LMTD \quad (27)$$

$$L = \frac{Q_{rec}}{\pi * D * LMTD} \quad (28)$$

Área de transferencia de calor

El área de transferencia de calor es la zona (área) efectiva en donde se produce la transferencia de calor, como ya se conoce la longitud del intercambiador se la puede conocer reemplazando los valores de sus componentes bajo la siguiente ecuación:

$$A = \pi * D * L \quad (29)$$

Caída de presión

Un buen diseño del intercambiador de calor deriva en bajas caídas de presión (entre 0.63 – 1.6 MPa), con esto se garantiza que el intercambiador de calor pueda responder adecuadamente ante un requerimiento del sistema (INEN, 2015).

Esta caída de presión para intercambiadores de calor como el que se plantea en este estudio de tubos concéntricos (o doble tubo) de flujo cruzado se puede calcular mediante la expresión (Valiente B., 2015):

$$\Delta P_h = f * \frac{L}{D} * \frac{\rho * V^2}{2} \quad (30)$$

Donde:

ΔP_h = Caída de presión del fluido caliente.

ΔP_f = Caída de presión del fluido frío

ρ = Densidad del agua

f = Factor de fricción de Darcy, este factor es función directa de la rugosidad del tubo y del número de Reynolds. Éste se puede obtener de dos maneras:

- Gráfica de Moody (anexo): Mediante esta gráfica se representa en escala logarítmica el factor de fricción de Darcy de una tubería en función del número de Reynolds y de la rugosidad relativa (Çengel & Ghajar, Transferencia de Calor y Masa, 2011).
- Por medio de las siguientes expresiones:

Ecuación de Hagen-Poi-Seuille, para flujo laminar (Anaya, Cauich, Funabazama, & Gracia, 2014).

$$f = \frac{64}{Re} \quad (31)$$

Ecuación de Colebrook-White, para flujo turbulento (Anaya, Cauich, Funabazama, & Gracia, 2014).

$$\frac{1}{\sqrt{f'}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f'}} \right) \quad (32)$$

Para esta ecuación son necesarios métodos numéricos para poder resolverla, es por esto que de ser el caso de que el fluido sea turbulento se utilizará el diagrama para determinar el factor de fricción.

V = Velocidad promedio del fluido, ésta se la puede obtener mediante la expresión:

$$V = \frac{Re * \vartheta}{D} \quad (33)$$

Re = Número de Reynolds

ϑ = Viscosidad cinemática del fluido

L = Longitud del tubo

g_c = Factor de conversión = 9.81 N/kg

D = Diámetro interno del tubo

Según la Superintendencia de Servicios Sanitarios, la caída de presión en instalaciones de agua potable no debe exceder de 49 kPa en el arranque de utilización de cada servicio (SISS, Presión de agua potable, s.f.).

2.3. Almacenamiento

El tanque de almacenamiento cumple la vital función de acumular y almacenar agua precalentada luego de que ésta pasa por el intercambiador de calor.

Disposición del tanque

La disposición del tanque va íntimamente relacionada con dos aspectos fundamentales en el almacenamiento de líquidos:

- a) Contaminación, esto quiere decir que al tener un tanque de almacenamiento en disposición horizontal es probable que los sedimentos, impurezas, contaminantes, etc. que normalmente se asientan en el fondo sean absorbidos. Por esta razón se recomienda que la salida del agua del tanque al sistema esté ubicada a una altura prudente.
- b) Disposición sea de manera vertical, así se garantiza el poder utilizar un mayor volumen de agua contenida sin ninguno de los elementos contaminantes detallados anteriormente y peso.

Material

El material debe ser de fácil acceso para fines de mantenimiento o correcciones, para esto se tomará las sugerencias en cuanto a lo más cotizado en el mercado ecuatoriano. El tanque para efectos de este estudio se analizará con acero galvanizado con revestimiento de zinc para evitar la corrosión, su fácil montaje y desmontaje y no hacerlo muy pesado ni costoso.

Aislamiento del tanque

Para efectos de este estudio, el tanque debe mantener la temperatura del agua al menos 24 horas para que pueda ser reutilizada en instantes o intervalos de tiempos posteriores a su ingreso al tanque.

Para esto, el tanque debe estar aislado del medio ambiente para evitar pérdidas de calor por convección con el área circundante al tanque. De ser posible, el tanque deberá tener una capa de algún material aislante para maximizar la posibilidad de que la temperatura del agua contenida se mantenga la mayor cantidad de tiempo posible.

En el caso de la vivienda tipo en estudio, anteriormente fueron detallados los consumos según la utilización de los servicios en un día común. Tomando esto en cuenta, el principal uso se da entre las 7:00 y 8:00 de la mañana. Para esto el tanque de almacenamiento debe tener acumulada toda el agua posible en el resto del día anterior con el fin de mantenerse con buen nivel y temperatura para las horas pico de consumo.

El material aislante para este estudio se lo definirá bajo ciertas condiciones importantes de acuerdo al mercado ecuatoriano como son disponibilidad, propiedades aislantes y costos. Para esto se escoge la lana de vidrio debido a que cumple con las condiciones antes mencionadas.

En la figura 8 se detalla el volumen objetivo que deberá aportar el agua precalentada que se encuentra contenida en el tanque para que el sistema cumpla su función como es de suministrar agua precalentada al calefón al momento de utilizar algún servicio.

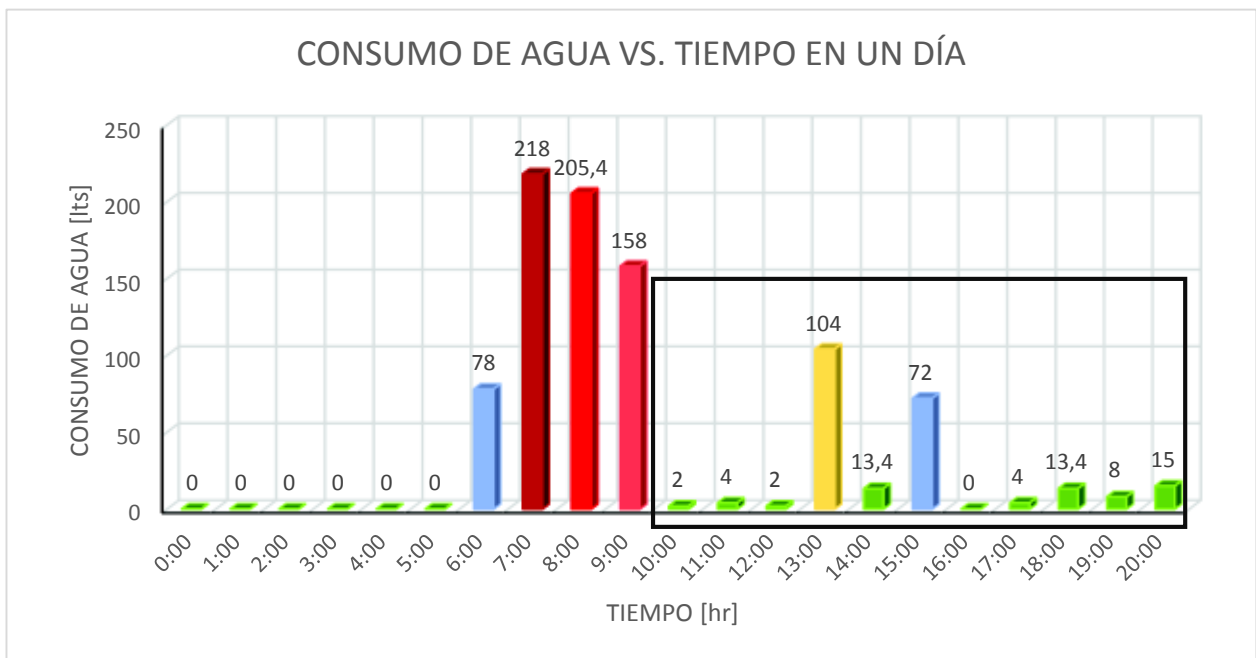


Figura 8. Volumen que aportará al sistema de almacenamiento de agua caliente sanitaria de la vivienda unifamiliar (Propia).

Se define que entre las 10:00 am y las 24:00, toda el agua que ingresa será aprovechada su calor para su uso posterior al día siguiente. Esto quiere decir que el volumen de agua requerido será de 237.8 lt. Según el “Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente” el volumen requerido del tanque del almacenamiento debe tener un 15% adicional del volumen de agua para que pueda suplir cualquier imprevisto (Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, 2003), es decir:

$$V_{req} = 1.15 * V3 \quad (34)$$

Ahora bien, el tanque de almacenamiento de ACS debe cumplir con las siguientes características (Universidad Carlos II de Madrid, 2010):

1. Capacidad suficiente para suministro de los consumidores.
2. Dimensiones y características en cuanto a diámetro, altura y materiales.
3. Localización cercana a los consumidores y al sistema de precalentamiento.
4. Mantenimiento, reducido a la menor cantidad de veces que se lo debe realizar.

Dimensionamiento del tanque de almacenamiento

Los tanques de almacenamiento se diseñan de acuerdo con la norma API-ASME, en el cual se establecen las condiciones de diseño para tanques trabajando a presión atmosférica y que contienen sólidos o líquidos en su interior. Para esto se definen 3 partes importantes del tanque (Universidad de Granada, 2016):

1. Cabeza: Elipsoidal.
2. Carcasa: Cilíndrica.
3. Fondo: Elipsoidal.

Las dimensiones en cuanto a altura se encuentran definidas en función de la altura H de la carcasa cilíndrica. A continuación se detallan las siguientes proporciones en la figura 9 (Universidad de Granada, 2016):

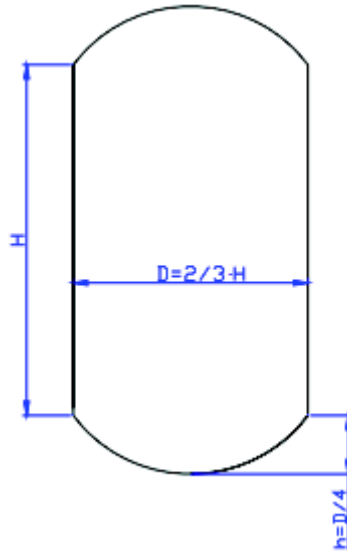


Figura 9. Proporciones de alturas para un tanque que contiene algún líquido (Universidad de Granada, 2016).

Entonces:

$$H_T = H_{ca} + 2 * H_{cf} \quad (35)$$

Donde:

H_T = Altura total del tanque

H_{car} = Altura de la carcasa cilíndrica

H_{cf} = Altura del fondo o de la cabeza que para nuestro caso son los mismos.

Como se puede observar, podemos calcular la altura H de la carcasa debido a que conocemos el volumen total requerido que será el 80% del volumen del tanque por motivos de seguridad, es decir (Universidad de Granada, 2016):

$$V_{req} = 0.8 * V_T \quad (36)$$

$$V_T = V_{car} + 2 * V_{cf} = 1.25 * V_{req} \quad (37)$$

$$V_T = \pi * R^2 * \frac{3 * D}{2} + \frac{\pi * (2 * R)^2 * \frac{D}{4}}{6} \quad (38)$$

Donde:

V_T = Volumen total

V_{car} = Volumen de la carcasa cilíndrica

V_{cf} = Volumen de la cabeza o del fondo

R = Radio del tanque

Entonces, si reemplazamos los valores de H y H_{cf} tenemos la siguiente relación (Universidad de Granada, 2016):

Si:

$$H = \frac{3*D}{2} \quad (39)$$

$$H_{cf} = \frac{D}{4} \quad (40)$$

Entonces:

$$V_T = \frac{11*\pi*R^3}{3} \quad (41)$$

$$R = \sqrt[3]{\frac{3*V_T}{11*\pi}} = \sqrt[3]{\frac{3.75*V_{req}}{11*\pi}} \quad (42)$$

El espesor de las paredes (t) del tanque viene definido para cada una de las partes, es decir (Universidad de Granada, 2016):

$$t_{car} = \frac{\gamma*d*R}{\sigma_t*E_s} \quad (43)$$

$$t_{cf} = \frac{P*D_e}{2*\sigma_t*E_s} + 1.8 * P \quad (44)$$

Donde:

t_{car} = Espesor de la carcasa cilíndrica

t_{cf} = Espesor de la cabeza o fondo

γ = Peso específico del agua, kg/cm³

d = Nivel máximo de agua almacenado, cm. ($d = H + H_{cf}$)

σ_t = Tensión máxima admisible del material, kg/cm²

E_s = Eficiencia de la soldadura, para junta soldad a tope en doble V se toma el valor de 0.6

P = Presión externa, kg/cm² (Presión atmosférica = 1 atm)

D_e = Diámetro externo, cm. ($D_e = 2*R + 2*T_{car}$)

Análisis térmico del tanque de almacenamiento

Para el análisis térmico se debe partir del punto en el cual el tanque debe en lo posible mantener la temperatura del agua almacenada por un período de tiempo de 24 horas. Para analizar este punto del sistema de precalentamiento se tiene el siguiente esquema de la figura 10:

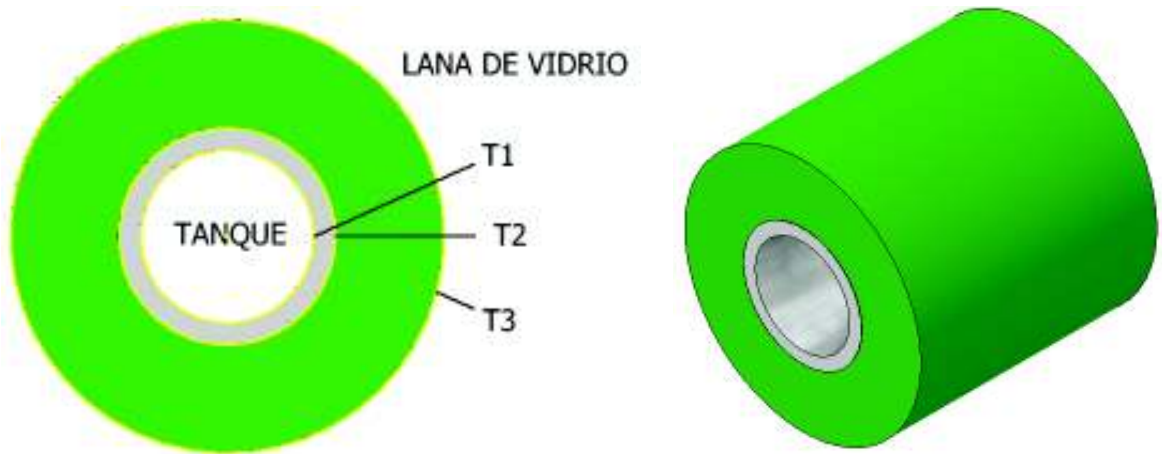


Figura 10. Esquema de la carcasa cilíndrica del tanque de almacenamiento (Propia).

Lo que vamos a definir a continuación es la razón de pérdida de calor del agua almacenada en el tanque, para esto tenemos la siguiente expresión:

$$Q_{alm} = \frac{T_0 - T_{amb}}{R_T} \quad (45)$$

Donde:

Q_{alm} = Velocidad de transferencia de calor.

T_0 = Temperatura del agua almacenada en el tanque = $T'_{ent} = 26.25 \text{ }^\circ\text{C}$

T_{amb} = Temperatura del medio ambiente en condiciones normales = $20 \text{ }^\circ\text{C}$

R_T = Resistencia total = $R_{car} + R_{ais} + R_{amb}$

Siendo:

$$R_{car} = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi*k_1*L} \quad (46)$$

$$R_{ais} = \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi*k_2*L} \quad (47)$$

$$R_{amb} = \frac{1}{h_{amb}*A_3} \quad (48)$$

Donde:

R_{car} = Resistencia del material en las paredes del tanque.

R_{ais} = Resistencia del material aislante (Lana de vidrio).

R_{amb} = Resistencia de convección con el medio ambiente.

r_1 = Radio interno del tanque.

r_2 = Radio externo del tanque.

k_1 = Conductividad térmica del material de las paredes del tanque.

L = Longitud total del tanque, para este caso la altura total (H_T).

r_3 = Radio externo del material aislante, $r_3 = r_2 + t_{ais}$ (espesor del aislante).

k_2 = Conductividad térmica del material aislante.

h_{amb} = Coeficiente de convección en el medio ambiente, del aire.

A_3 = Área externa de transferencia de calor del aislante, $A_3 = r_3^2 * \pi * L$

Por seguridad el volumen final de almacenamiento será un 25% mayor que el volumen total, calculado mediante la ecuación 48:

$$V_{alm} = 1.25 * V_{Tot} \quad (49)$$

Para encontrar la justificación de si es necesario o no el tanque de almacenamiento, calcularemos el tiempo que el calefón demora en calentar el agua. Para esto calculamos mediante la ecuación 49 el calor que el calefón debe inyectar para calentar el agua desde dos puntos iniciales diferentes:

- Sin almacenamiento, entonces la temperatura inicial de trabajo del sistema siempre será la temperatura del suministro que es de $T_{ent} = 15$ °C.
- Con almacenamiento, entonces la temperatura inicial de trabajo del sistema siempre será la temperatura final de almacenamiento que es mayor que la temperatura del suministro.

$$Q_{cal} = V_{alm} * \rho * (T_i - T_x) \quad (50)$$

Finalmente, el tiempo que el calefón demora en calentar el agua se define mediante la siguiente ecuación 53:

$$t_{cal} = \frac{Q_{calx}}{W_{cal}} \quad (51)$$

2.4. Análisis económico

Anteriormente se definió que en el presente estudio se utilizarán tres indicadores que permitirán determinar la viabilidad y rentabilidad del proyecto y que se detallan a continuación

VAN

El VAN o Valor Actual Neto es un método en el cual se puede determinar si el proyecto o inversión tendrá ganancias o pérdidas en un tiempo determinado, este método lo que hace es traer los ingresos y egresos (generalmente anuales) a la actualidad y se calcula mediante la siguiente ecuación (Economipedia, Valor Actual Neto (VAN), s.f.):

$$VAN = -I_o + \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+k)^t} \quad (52)$$

Donde:

I_0 = Inversión inicial

F_t = Flujo de dinero en cada período

k = Tasa de interés anual

n = Número de años previsto

Si:

$VAN > 0$, Entonces el proyecto generará beneficios, por lo que se acepta el proyecto.

$VAN = 0$, Entonces el proyecto no generará beneficios ni tampoco pérdidas, por lo que es indiferente.

$VAN < 0$, Entonces el proyecto generará pérdidas, por lo que no se acepta el proyecto.

TIR

El TIR o Tasa Interna de Retorno es un método que permite definir si una inversión en un proyecto será rentable a través del tiempo tomando en cuenta una tasa de interés, es decir, determina el beneficio o pérdida de dicha inversión en un determinado tiempo. El TIR se calcula igualando el valor de ingresos y egresos ($VAN = 0$) al momento actual mediante la siguiente expresión (Economipedia, Tasa Interna de Retorno (TIR), s.f.):

$$VAN = 0 = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+TIR)^t} \quad (53)$$

Donde:

I_0 = Inversión inicial

F_t = Flujo de dinero en cada período

n = Número de años previsto

Si:

$TIR > k$, Entonces el proyecto o inversión es aceptado.

$TIR = k$, Entonces el proyecto o inversión es indiferente.

$TIR < k$, Entonces el proyecto o inversión es rechazado.

Tiempo de retorno de la inversión

El tiempo de retorno de la inversión como su nombre lo indica, es el tiempo en el cual se proyecta recuperar la inversión. Se toma en cuenta este método debido que es crucial al momento de decidir si el proyecto se acepta o no para poder invertir.

Para este estudio, debido a que el flujo anual siempre será el mismo, el tiempo de retorno de la inversión se calcula según la siguiente expresión (Economipedia, Payback - Plazo de recuperación, s.f.):

$$\textit{Plazo de recuperación} = \frac{I_0}{F} \quad (54)$$

Donde:

I_0 = Inversión inicial

F = Flujo anual de dinero

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Resultados análisis energético inicial

En este capítulo se ingresarán los datos del sistema en todos los sistemas de ecuaciones vistos en el capítulo 2 para luego realizar un análisis de estos y determinar la factibilidad del sistema para futuros estudios y aplicaciones. En algunos puntos se determinarán valores para determinadas variables debidamente justificadas y en otros puntos se asumirán debido al carácter de este estudio.

Una vez que ya tenemos el consumo promedio aproximado de agua caliente sanitaria de la vivienda por día, podemos saber mediante la ecuación 1 la demanda promedio que necesitaría calentar el sistema en un día:

$$Q_D = \frac{1000 \text{ kg/m}^3 * 1.0988 \text{ m}^3 * 4.18 \text{ kJ}/(\text{kg} * ^\circ\text{C}) * (60 - 15)^\circ\text{C}}{0.8}$$

$$Q_D = 258.72 \frac{\text{MJ}}{\text{día}}$$

Donde:

ρ = Densidad del agua = 1000 kg / m³

V = Volumen de agua al mes utilizado en la vivienda = 1.0988 m³

C_P = Calor específico del agua = 4.18 kJ / kg*°C

T_{ss} = Temperatura de salida de agua del sistema = 60 °C

T_{es} = Temperatura de entrada de agua del sistema = 15 °C

Sistema de calentamiento de agua

Anteriormente se definió la ecuación que determinará la potencia necesaria del calefón, debemos notar que en el capítulo dos se encontraron datos muy interesantes y que son necesarios para este cálculo como son:

- a) Horario crítico: 7 am – 8 am
- b) Temperatura de entrada de agua del calefón: T_i = 15 °C
- c) Temperatura de salida de agua del calefón: T_s = 60 °C
- d) Flujo de agua: q = 218 lt/h
- e) Densidad del agua: ρ = 1000 kg/m³
- f) Calor específico del agua: C_P = 4.18 kJ/kg*°C

Primero se necesita transformar las unidades del flujo volumétrico de agua según la ecuación (3):

$$q_a = 218 \frac{\text{lt}}{\text{h}} * \frac{1 \text{ h}}{60 \text{ min}} * \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} * \frac{0.001 \text{ m}^3}{1 \text{ lt}} = 6 * 10^{-5} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Luego reemplazamos todos los datos en la ecuación (2):

$$\dot{Q}_c = 1000 \frac{kg}{m^3} * 6 * 10^{-5} \frac{m^3}{s} * 4.18 \frac{kJ}{kg * ^\circ C} * (60 - 15)^\circ C$$

$$\dot{Q}_c = 11.41 kW$$

Por tanto, será suficiente un calefón que supla esta necesidad de flujo de agua y potencia para suplir la necesidad a hora pico del consumo en la vivienda. Para lograr esto, se puede instalar un calefón RADIANCE (calefón de tiro forzado), de 10 lts por minuto, una potencia de 11 KW y una capacidad de calentamiento en un rango de temperaturas entre 25 °C a 50 °C de encendido electrónico automático y que funciona con GLP (ASTEP, 2014).

Calor requerido por el sistema sin recuperación de calor

Para determinar este calor requerido por día para alcanzar la temperatura deseada, en base a la ecuación (5) y a los siguientes datos principales, tenemos:

- Densidad del agua: $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$
- Volumen total de agua: $V = 1.0988 \text{ m}^3$
- Calor específico del agua: $C_p = 4.186 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$
- Temperatura de salida de agua del calefón después de ser calentada: $T_i = 60^\circ\text{C}$
- Temperatura de entrada de agua al calefón, agua del suministro: $T_{ent} = 15^\circ\text{C}$
- Eficiencia del calefón: $\eta_{cal} = 80\%$

$$Q_{ent} = \frac{1000 \frac{kg}{m^3} * 1.0988 \text{ m}^3 * 4.186 \frac{kJ}{kg * ^\circ C} * (60 - 15)^\circ C}{0.8} * \frac{1 \text{ MJ}}{1000 \text{ kJ}} = 258.726 \text{ MJ}$$

Para el cálculo de la velocidad de transferencia de entrada de calor sin recuperador de calor tenemos:

$$\text{Flujo de agua de la ducha requerido: } \dot{m}_1 = \frac{V_1}{t_1} = \frac{95 \text{ l}}{20 \text{ min} * \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}}} = 0.08 \frac{\text{l}}{\text{s}}$$

$$\text{Flujo de agua del lavamanos requerido: } \dot{m}_2 = \frac{V_2}{t_2} = \frac{24 \text{ l}}{5 \text{ min} * \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}}} = 0.08 \frac{\text{l}}{\text{s}}$$

$$\text{Flujo de agua del lavaplatos requerido: } \dot{m}_3 = \frac{V_3}{t_3} = \frac{26.8 \text{ l}}{10 \text{ min} * \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}}} = 0.04 \frac{\text{l}}{\text{s}}$$

Según la Norma Hidrosanitaria NHE, el flujo de agua mínimo requerido en instalaciones de la construcción no debe ser menor a: $0.134 \text{ lt/s} = 0.134 \text{ kg/s}$.

$$q_{ent} = 0.134 \frac{kg}{s} * 4.186 \frac{kJ}{kg * ^\circ C} * (60 - 15)^\circ C = 25.242 \text{ kW}$$

Calor requerido por el sistema con recuperación de calor

Para esto, debemos conocer la temperatura de entrada del agua al calefón que debería tener el fluido luego del intercambiador de calor. Para esto aplicamos la ecuación (8):

$$T'_{ent} = 60 - \frac{0.8 * 194.045 \frac{MJ}{día}}{\frac{1000 \frac{kg}{m^3} * 1.0988 m^3 * 4.186 \frac{kJ}{kg * °C}}{1000 \frac{MJ}{kJ}}} = 26.25 °C$$

El calor total que debe inyectar el calefón al sistema para obtener la temperatura deseada, entonces se tiene:

$$Q_{rec} = \frac{1000 \frac{kg}{m^3} * 1.0988 m^3 * 4.186 \frac{kJ}{kg * °C} * (26.25 - 15)°C}{0.8} * \frac{1 MJ}{1000 kJ} = 64.681 MJ$$

Es decir, el nuevo calor que debe inyectar el calefón es de 194.044 MJ. Calculada en base a la ecuación (6):

$$Q'_{ent} = 258.726 MJ - 64.681 MJ = 194.044 MJ$$

La temperatura de entrada al calefón T'_{ent} será la misma temperatura de salida del intercambiador para cumplir con el objetivo en esta primera aproximación. Con esto tenemos las cuatro temperaturas que intervienen en el dimensionamiento del intercambiador de calor y que son:

- Temperatura de entrada del fluido caliente: $T_o = 40 °C$
- Temperatura de salida del fluido caliente: $T_{sal} = ? °C$
- Temperatura de entrada del fluido frío: $T_{ent} = 15 °C$
- Temperatura de salida del fluido frío: $T'_{ent} = 26.25 °C$

Ahora, para completar las temperaturas tanto del fluido caliente como del frío solamente faltaría la temperatura de salida del fluido caliente del intercambiador, la cual se calcula a continuación en base a la ecuación (9):

$$T_{sal} = 40 - \frac{64681.55 kJ}{1000 \frac{kg}{m^3} * 1.0988 m^3 * 4.186 \frac{kJ}{kg * °C}} = 25.91 °C$$

A continuación, se determinan varios parámetros importantes que serán utilizados más adelante, esto en base a las temperaturas promedio tanto del fluido caliente como del fluido frío. Calculadas en base a las ecuaciones (18) y (19) y en base a (Çengel & Ghajar, 2011):

$$T_h = \frac{40 + 25.91}{2} = 32.95 °C$$

$$T_f = \frac{15 + 26.25}{2} = 20.62 °C$$

- Calor específico a la temperatura promedio de fluido caliente: $4.178 kJ/kg * °C$
- Calor específico a la temperatura promedio de fluido frío: $4.178 kJ/kg * °C$
- Viscosidad a la temperatura promedio de fluido caliente: $7.2975 * 10^{-4} N*s/m^2$
- Viscosidad a la temperatura promedio de fluido frío: $9.881 * 10^{-4} N*s/m^2$

- e) Conductividad térmica a la temperatura promedio de fluido caliente: 0.628 W/m*K
- f) Conductividad térmica a la temperatura promedio de fluido frío: 0.606 W/m*K
- g) Número de Prandtl a la temperatura promedio de fluido caliente: 4.62
- h) Número de Prandtl a la temperatura promedio de fluido frío: 6.62
- i) Viscosidad cinemática a la temperatura promedio de fluido caliente, calculado según:

$$\vartheta = \frac{7.2975 * 10^{-4} \frac{N * m}{s^2}}{1000 \frac{kg}{m^3}} = 7.2975 * 10^{-7} \frac{m^2}{s}$$

- j) Viscosidad cinemática a la temperatura promedio de fluido frío, calculado según la ecuación:

$$\vartheta = \frac{9.881 * 10^{-4} \frac{N * m}{s^2}}{1000 \frac{kg}{m^3}} = 9.881 * 10^{-7} \frac{m^2}{s}$$

Dimensionamiento del intercambiador de calor

Para dimensionar el intercambiador necesario, es necesario cumplir con el proceso de dimensionamiento en el cual se ven involucrados varios puntos como son:

- a) Diferencia logarítmica de temperaturas: ΔT_{LM}

Dada por la ecuación (12):

$$\Delta T_{LM} = 40 \text{ } ^\circ\text{C} - 25.91 \text{ } ^\circ\text{C} = 14.09 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_{LM} = \frac{(40 - 15) \text{ } ^\circ\text{C}}{\ln(25.91 - 26.25) \text{ } ^\circ\text{C}} = \cancel{\#}$$

- b) Número de Reynolds: R_e

Dada por las ecuaciones (20) y (21):

$$R_{eh} = \frac{4 * 0.0000127 \frac{m^3}{s}}{\pi * (0.0254 - 0.0127)m * 7.29 * 10^{-7} \frac{m^2}{s}} = 1747.18$$

$$R_{ef} = \frac{4 * 0.0000127 \frac{m^3}{s}}{\pi * (0.0127)m * 9.88 * 10^{-7} \frac{m^2}{s}} = 1290.36$$

Este resultado nos indica claramente que bajo nuestras condiciones tanto para el fluido caliente como frío el flujo del fluido es laminar, debido que para este tipo de sistemas los límites del número de Reynolds para flujo laminar y turbulento son 4000 y 10000 respectivamente. Esto nos da la característica de que el fluido circulará de manera laminar.

- c) Número de Nusselt: Un

Dadas por las ecuaciones (22) y (23):

$$N_{uh} = 0.023 * 1747.18^{4/5} * 4.9^{0.4} = 17.05$$

$$N_{uf} = 0.023 * 1290.36^{4/5} * 6.9^{0.4} = 15.34$$

d) Coeficiente de convección: h

Dadas por las ecuaciones (24) y (25):

$$h_h = 17.05 * \frac{0.622 \frac{W}{m * ^\circ C}}{0.0127 m} = 417.61 \frac{W}{m^2 * ^\circ C}$$

$$h_f = 15.34 * \frac{0.599 \frac{W}{m * ^\circ C}}{0.0127 m} = 723.59 \frac{W}{m^2 * ^\circ C}$$

e) Coeficiente global de transferencia de calor: U

Dada por la ecuación (26):

$$U = \frac{1}{\left(\frac{1}{417.61 \frac{W}{m^2 * ^\circ C}} + \frac{1}{723.59 \frac{W}{m^2 * ^\circ C}} \right)} = 264.79 \frac{W}{m^2 * ^\circ C}$$

f) Longitud del intercambiador de calor: L

Dada por la ecuación (28):

$$L = \frac{0.75 kW * \frac{1000 W}{1 kW}}{264.79 \frac{W}{m^2 * ^\circ C} * \pi * 0.0127 m * 14.09 ^\circ C} = 2.515 m$$

g) Área de transferencia de calor: A

Dada por la ecuación (29)

$$A_h = \pi * 0.0127 m * 2.515 m = 0.1003 m^2$$

h) Caída de presión

Para el cálculo de la caída de presión según la ecuación (30), tenemos los siguientes datos:

$$Re_h = 1747.18$$

$$D_h = 0.0254 m$$

$$Re_f = 1290.36$$

$$D_f = 0.0127 m$$

Entonces según la gráfica de Moody, los factores de fricción f_h y f_f están dados por la ecuación (31):

$$f_h = \frac{64}{1747.18} = 0.0366$$

$$f_f = \frac{64}{1290.36} = 0.0496$$

Las velocidades promedio tanto para el fluido caliente como para el fluido frío están dadas por la ecuación (33):

$$V_h = \frac{1747.18 * 7.3 * 10^{-7} \frac{m^2}{s}}{0.0254 m} = 0.0502 \frac{m}{s}$$

$$V_f = \frac{1290.36 * 9.881 * 10^{-7} \frac{m^2}{s}}{0.0127 m} = 0.1003 \frac{m}{s}$$

Entonces, la caída de presión según la ecuación (30) es:

$$\Delta P_h = 0.0366 * \frac{2.515 m}{0.0254 m} * \frac{1000 \frac{kg}{m^3} * \left(0.0502 \frac{m}{s}\right)^2}{2} = 4.57 \frac{N}{m^2} = 4.57 Pa$$

$$\Delta P_f = 0.0496 * \frac{2.515 m}{0.0127 m} * \frac{1000 \frac{kg}{m^3} * \left(0.1003 \frac{m}{s}\right)^2}{2} = 49.49 \frac{N}{m^2} = 49.49 Pa$$

Como se puede observar, la caída de presión tanto para el fluido caliente como para el frío se encuentra muy por debajo de los límites establecidos por el INEN. Razón por la cual el diseño es adecuado para el servicio que está brindando.

3.2. Resultados análisis energético real

Ahora que se tiene la idea clara del funcionamiento del sistema bajo condiciones ideales, a continuación, se realizará la aproximación bajo condiciones reales de funcionamiento con las cuales el sistema estará definido.

Una vez que ya tenemos el consumo promedio aproximado de agua caliente sanitaria de la vivienda por día, podemos saber mediante la ecuación 1 la demanda promedio que necesitaría calentar el sistema en un día:

$$Q_D = \frac{1000 \text{ kg/m}^3 * 1.0988 \text{ m}^3 * 4.18 \text{ kJ}/(\text{kg} * ^\circ\text{C}) * (60 - 15)^\circ\text{C}}{0.8}$$

$$Q_D = 258.72 \frac{MJ}{\text{día}}$$

Donde:

ρ = Densidad del agua = 1000 kg / m³

V = Volumen de agua al mes utilizado en la vivienda = 1.0988 m³

C_P = Calor específico del agua = 4.18 kJ / kg*°C

T_{ss} = Temperatura de salida de agua del sistema = 60 °C

T_{es} = Temperatura de entrada de agua del sistema = 15 °C

Sistema de calentamiento de agua

Anteriormente se definió la ecuación que determinará la potencia necesaria del calefón, debemos notar que en el capítulo dos se encontraron datos muy interesantes y que son necesarios para este cálculo como son:

- g) Horario crítico: 7 am – 8 am
- h) Temperatura de entrada de agua del calefón: $T_i = 15\text{ }^\circ\text{C}$
- i) Temperatura de salida de agua del calefón: $T_i = 60\text{ }^\circ\text{C}$
- j) Flujo de agua: $q = 218\text{ lt/h}$
- k) Densidad del agua: $\rho = 1000\text{ kg/m}^3$
- l) Calor específico del agua: $C_p = 4.18\text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$

Primero se necesita transformar las unidades del flujo volumétrico de agua según la ecuación (3):

$$q_a = 218 \frac{\text{lt}}{\text{h}} * \frac{1\text{ h}}{60\text{ min}} * \frac{1\text{ min}}{60\text{ s}} * \frac{0.001\text{ m}^3}{1\text{ lt}} = 6 * 10^{-5} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Luego reemplazamos todos los datos en la ecuación (2):

$$\dot{Q}_c = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 6 * 10^{-5} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} * 4.18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} * ^\circ\text{C}} * (60 - 15)^\circ\text{C}$$

$$\dot{Q}_c = 11.41\text{ kW}$$

Por tanto, será suficiente un calefón que supla esta necesidad de flujo de agua y potencia para suplir la necesidad a hora pico del consumo en la vivienda. Para lograr esto, se puede instalar un calefón RADIANCE (calefón de tiro forzado), de 10 lts por minuto, una potencia de 11 KW y una capacidad de calentamiento en un rango de temperaturas entre $25\text{ }^\circ\text{C}$ a $50\text{ }^\circ\text{C}$ de encendido electrónico automático y que funciona con GLP (ASTEP, 2014).

Calor requerido por el sistema sin recuperación de calor

Para determinar este calor requerido por día para alcanzar la temperatura deseada, en base a la ecuación (5) y a los siguientes datos principales, tenemos:

- g) Flujo volumétrico de agua: $\dot{m} = 0.134\text{ kg/s}$ (demostrado anteriormente)
- h) Calor específico del agua: $C_p = 4.186\text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$
- i) Temperatura de salida de agua del calefón después de ser calentada: $T_i = 60^\circ\text{C}$
- j) Temperatura de entrada de agua al calefón, agua del suministro: $T_{ent} = 15\text{ }^\circ\text{C}$

$$\dot{Q}_{ent} = 0.134 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * 4.186 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} * ^\circ\text{C}} * (60 - 15)^\circ\text{C} = 25.242\text{ kW}$$

Calor requerido por el sistema con recuperación de calor

Para el cálculo de la velocidad de transferencia de entrada de calor con recuperador de calor, tenemos:

$$Q'_{ent} = 25.242 \text{ kW} - (0.25 * 25.242) \text{ kW} = 18.931 \text{ kW}$$

Entonces el cálculo de la velocidad de transferencia de calor del recuperador será:

$$Q'_{rec} = 25.242 \text{ kW} - 18.931 \text{ kW} = 6.31 \text{ kW}$$

Para esto, debemos conocer la temperatura de entrada del agua al calefón que debería tener el fluido luego del intercambiador de calor. Para esto aplicamos la ecuación (8):

$$T'_{ent} = 60 - \frac{0.8 * 194.045 \frac{\text{MJ}}{\text{día}}}{\frac{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 1.0988 \text{ m}^3 * 4.186 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} * ^\circ\text{C}}}{1000 \frac{\text{MJ}}{\text{kJ}}}} = 26.25 \text{ }^\circ\text{C}$$

La temperatura de entrada al calefón T'_{ent} será la misma temperatura de salida del intercambiador para cumplir con el objetivo en esta primera aproximación. Con esto tenemos las cuatro temperaturas que intervienen en el dimensionamiento del intercambiador de calor y que son:

- e) Temperatura de entrada del fluido caliente: $T_o = 40 \text{ }^\circ\text{C}$
- f) Temperatura de salida del fluido caliente: $T_{sal} = ? \text{ }^\circ\text{C}$
- g) Temperatura de entrada del fluido frío: $T_{ent} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$
- h) Temperatura de salida del fluido frío: $T'_{ent} = 26.25 \text{ }^\circ\text{C}$

Ahora, para completar las temperaturas tanto del fluido caliente como del frío solamente faltaría la temperatura de salida del fluido caliente del intercambiador, la cual se calcula a continuación en base a la ecuación (9):

$$T_{sal} = 40 - \frac{6.31 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}}{0.134 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * 4.186 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} * ^\circ\text{C}}} = 28.75 \text{ }^\circ\text{C}$$

A continuación, se determinan varios parámetros importantes que serán utilizados más adelante, esto en base a las temperaturas promedio tanto del fluido caliente como del fluido frío. Calculadas en base a las ecuaciones (18) y (19) y en base a (Çengel & Ghajar, 2011):

$$T_h = \frac{40 + 28.75}{2} = 34.37 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_f = \frac{15 + 26.25}{2} = 20.62 \text{ }^\circ\text{C}$$

- k) Calor específico a la temperatura promedio de fluido caliente: $4.179.56 \text{ kJ/kg} * ^\circ\text{C}$
- l) Calor específico a la temperatura promedio de fluido frío: $4.181.75 \text{ kJ/kg} * ^\circ\text{C}$
- m) Viscosidad a la temperatura promedio de fluido caliente: $7.2975 * 10^{-4} \text{ N*s/m}^2$
- n) Viscosidad a la temperatura promedio de fluido frío: $9.881 * 10^{-4} \text{ N*s/m}^2$
- o) Conductividad térmica a la temperatura promedio de fluido caliente: $0.628 \text{ W/m} * \text{K}$
- p) Conductividad térmica a la temperatura promedio de fluido frío: $0.606 \text{ W/m} * \text{K}$
- q) Número de Prandtl a la temperatura promedio de fluido caliente: 4.62
- r) Número de Prandtl a la temperatura promedio de fluido frío: 6.62

s) Viscosidad cinemática a la temperatura promedio de fluido caliente, calculado según:

$$\nu = \frac{7.2975 * 10^{-4} \frac{N * m}{s^2}}{1000 \frac{kg}{m^3}} = 7.2975 * 10^{-7} \frac{m^2}{s}$$

t) Viscosidad cinemática a la temperatura promedio de fluido frío, calculado según la ecuación:

$$\nu = \frac{9.881 * 10^{-4} \frac{N * m}{s^2}}{1000 \frac{kg}{m^3}} = 9.881 * 10^{-7} \frac{m^2}{s}$$

Dimensionamiento del intercambiador de calor

Para dimensionar el intercambiador necesario, es necesario cumplir con el proceso de dimensionamiento en el cual se ven involucrados varios puntos como son:

b) Diferencia logarítmica de temperaturas: ΔT_{LM}

Dada por la ecuación (12):

$$\Delta T_{LM} = \frac{(40 - 15)^\circ C}{\ln(28.75 - 26.25)^\circ C} = 27.28^\circ C$$

i) Número de Reynolds: R_e

Dada por las ecuaciones (20) y (21):

$$R_{eh} = \frac{4 * 0.134 \frac{kg}{s}}{\pi * (0.0254 - 0.0127)m * 7.29 * 10^{-7} \frac{m^2}{s}} = 18409.29$$

$$R_{ef} = \frac{4 * 0.134 \frac{kg}{s}}{\pi * (0.0127)m * 9.88 * 10^{-7} \frac{m^2}{s}} = 13595.63$$

Este resultado nos indica claramente que bajo nuestras condiciones tanto para el fluido caliente como frío el flujo del fluido es turbulento, debido que para este tipo de sistemas los límites del número de Reynolds para flujo laminar y turbulento son 4000 y 10000 respectivamente. Esto nos da la característica de que el fluido circulará de manera turbulenta y por tanto tendrá una mejor transferencia de calor entre el fluido caliente y frío.

j) Número de Nusselt: Un

Dadas por las ecuaciones (22) y (23):

$$N_{uh} = 0.023 * 18409.292^{4/5} * 4.62^{0.4} = 109.55$$

$$N_{uf} = 0.023 * 13595.63^{4/5} * 6.62^{0.4} = 99.264$$

k) Coeficiente de convección: h

Dadas por las ecuaciones (24) y (25):

$$h_h = 109.55 * \frac{0.628 \frac{W}{m * ^\circ C}}{0.0127 m} = 5417.142 \frac{W}{m^2 * ^\circ C}$$

$$h_f = 99.264 * \frac{0.606 \frac{W}{m * ^\circ C}}{0.0127 m} = 4736.52 \frac{W}{m^2 * ^\circ C}$$

l) Coeficiente global de transferencia de calor: U

Dada por la ecuación (26):

$$U = \frac{1}{\left(\frac{1}{5417.142 \frac{W}{m^2 * ^\circ C}} + \frac{1}{4736.52 \frac{W}{m^2 * ^\circ C}} \right)} = 2527.010 \frac{W}{m^2 * ^\circ C}$$

m) Longitud del intercambiador de calor: L

Dada por la ecuación (28):

$$L = \frac{6.31 kW * \frac{1000 W}{1 kW}}{2527.010 \frac{W}{m^2 * ^\circ C} * \pi * 0.0127 m * 27.28 ^\circ C} = 2.294 m$$

n) Área de transferencia de calor: A

Dada por la ecuación (29)

$$A_h = \pi * 0.0127 m * 2.294 m = 0.092 m^2$$

o) Caída de presión

Para el cálculo de la caída de presión según la ecuación (30), tenemos los siguientes datos:

$$Re_h = 18409.292$$

$$D_h = 0.0254 m$$

$$Re_f = 13595.629$$

$$D_f = 0.0127 m$$

Entonces según la gráfica de Moody, los factores de fricción f_h y f_f están dados en función de los números de Reynolds y de la aspereza relativa:

$$\frac{e}{D_h} = \frac{0.0015 mm}{25.4 mm} = 0.000236$$

$$\frac{e}{D_f} = \frac{0.0015 mm}{12.7 mm} = 0.000118$$

$$f_h = 0.0027$$

$$f_f = 0.0027$$

Las velocidades promedio tanto para el fluido caliente como para el fluido frío están dadas por la ecuación (33):

$$V_h = \frac{18409.292 * 7.3 * 10^{-7} \frac{m^2}{s}}{0.0254 m} = 0.529 \frac{m}{s}$$

$$V_f = \frac{13595.629 * 9.881 * 10^{-7} \frac{m^2}{s}}{0.0127 m} = 1.058 \frac{m}{s}$$

Entonces, la caída de presión según la ecuación (30) es:

$$\Delta P_h = 0.0027 * \frac{2.294 m}{0.0254 m} * \frac{1000 \frac{kg}{m^3} * \left(0.529 \frac{m}{s}\right)^2}{2} = 34.11 \frac{N}{m^2} = 34.11 Pa$$

$$\Delta P_f = 0.0027 * \frac{2.294 m}{0.0127 m} * \frac{1000 \frac{kg}{m^3} * \left(1.058 \frac{m}{s}\right)^2}{2} = 272.86 \frac{N}{m^2} = 272.86 Pa$$

Almacenamiento de energía térmica sensible

Se definió inicialmente bajos ciertos puntos importantes el volumen de agua que debería ser almacenada para suplir el consumo diario en la vivienda ($V = 309.8$ lt). Ahora es importante prevenir cualquier situación imprevista que pueda darse al momento de utilizar el sistema, es por esto que el volumen requerido debe tener cierta holgura (15%) por norma. Según la ecuación (34) tenemos:

$$V_{req} = 1.15 * 309.8 \text{ lt} = 356.58 \text{ lt}$$

Por norma de seguridad, este volumen requerido debe representar el 80% como máximo del volumen total del tanque de almacenamiento como indica la ecuación (36):

$$V_T = \frac{356.58 \text{ lt}}{0.8} = 445.72 \text{ lt}$$

Ahora que ya se conoce el volumen total del tanque, se puede determinar el radio interno que debe tener según la ecuación (42):

$$R = \sqrt[3]{\frac{3.75 * 445.72 \text{ lt} * \frac{1000 \text{ cm}^3}{1 \text{ lt}}}{11 * \pi}} = 31.4 \text{ cm}$$

Según las proporciones detalladas en las ecuaciones (39) y (40), se puede determinar la altura de la carcasa H y la altura de la base o fondo que en nuestro caso son idénticas, entonces tenemos:

$$H = \frac{3 * (2 * 31.4 \text{ cm})}{2} = 94.2 \text{ cm}$$

$$H_{cf} = \frac{(2 * 31.4 \text{ cm})}{4} = 15.7 \text{ cm}$$

Entonces como consecuencia y según el esquema de la figura (9) y la ecuación (35), tenemos:

$$H_T = 94.2 \text{ cm} + 2 * 15.7 \text{ cm} = 123.88 \text{ cm} = 1.26 \text{ m}$$

Para calcular el espesor de la pared del tanque de almacenamiento, según los siguientes datos y las ecuaciones (43) y (44) tenemos:

$$\gamma = 1000 \text{ kg/cm}^3$$

$$d = 109.9 \text{ cm} = 1.099 \text{ m}$$

$$\sigma_t = 4220.7 \text{ kg/cm}^2$$

$$E_s = 0.6$$

$$P = 1.0332 \text{ kg/cm}^2 \text{ (Presión atmosférica = 1 atm)}$$

$$D_e = 62.8 \text{ cm} = 0.628 \text{ m}$$

Entonces tenemos:

$$t_{car} = \frac{1000 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^3} * 109.9 \text{ cm} * 31.4 \text{ cm}}{4220.7 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} * 0.6} = 0.0014 \text{ cm} = 0.1 \text{ cm (mínimo)}$$

$$t_{cf} = \frac{1.0332 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} * 62.8 \text{ cm}}{2 * 4220.7 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} * 0.6} + 1.8 * 1.0332 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} = 0.01 \text{ cm} = 0.1 \text{ cm (mínimo)}$$

Una vez determinados los espesores de las paredes, mediante las ecuaciones (46), (47) y (48) se pueden determinar las resistencias con las cuales vamos a calcular la transferencia de calor:

$$R_{car} = \frac{\ln(0.3187 \text{ m}/0.3097 \text{ m})}{2 * \pi * 13.4 \frac{\text{W}}{\text{m} * ^\circ\text{C}} * 0.9291 \text{ m}} = 0.00008006 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}$$

$$R_{ais} = \frac{\ln(0.3387 \text{ m}/0.3187 \text{ m})}{2\pi * 0.0380 \frac{\text{W}}{\text{m} * ^\circ\text{C}} * 0.9291 \text{ m}} = 0.2728 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}$$

$$R_{amb} = \frac{1}{18 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 * ^\circ\text{C}} * 3.141592 * \frac{0.3097 \text{ m}}{2} * 0.9291 \text{ m}} = 0.11 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}$$

Entonces la resistencia total del sistema del tanque de almacenamiento es:

$$R_T = (0.00036615 + 0.27439 + 0.11239) \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}} = 0.38 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}$$

Ya con la resistencia total definida, se puede determinar la transferencia de calor desde el agua almacenada hasta el medio ambiente que rodeará al tanque según la ecuación (45):

$$\dot{Q}_{alm} = \frac{(26.25 - 20)^\circ\text{C}}{0.39 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}} = 16.25 \text{ W}$$

El volumen final de almacenamiento según la ecuación (49), pero primero se define el volumen aconsejable del almacenamiento tomando en cuenta que el tanque tenga agua suficiente para abastecer el consumo por 5 minutos mientras el calefón calienta el agua a la temperatura de 60 °C:

$$V'_{alm} = 0.134 \frac{\text{lt}}{\text{s}} * \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} * 5 \text{ min} = 40.2 \text{ lt}$$

$$V_{alm} = 1.25 * 40.2 \text{ lt} = 50.25 \text{ lt}$$

Calculamos ahora el calor que el calefón debe suministrar al sistema para calentar el agua a 60 °C según la ecuación (50):

a) Con tanque de almacenamiento la $T_x = 26.21 \text{ }^\circ\text{C}$

$$Q_{cal} = 50.25 \text{ lt} * 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 4.18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} * ^\circ\text{C}} (60 - 26.21) ^\circ\text{C} * \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ lt}} = 7107.3 \text{ kJ}$$

b) Sin tanque de almacenamiento la $T_x = 15 \text{ }^\circ\text{C}$

$$Q_{cal} = 50.25 \text{ lt} * 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 4.18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} * ^\circ\text{C}} (60 - 15) ^\circ\text{C} * \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ lt}} = 9465.5 \text{ kJ}$$

Diseño mecánico del sistema

A continuación, se definirá el sistema con sus medidas principales aproximadas con el fin de tener una idea más clara del recuperador y del tanque de almacenamiento.

Recuperador

El recuperador como se pudo observar en su dimensionamiento se determinó la longitud del mismo (4.55 m). A continuación, en la tabla 4, se definirán el resto de las medidas y materiales y en la figura 11 un esquema con los cuales se tendrá una base para que en estudios posteriores se lo pueda detallar de mejor manera de ser el caso que se requiera construirlo.

Tabla 4. Detalle de dimensiones y materiales de los diferentes elementos básicos que constituyen el recuperador (Propia).

Elemento	Dimensiones principales (m)	Material principal
Carcasa	0.1 * 0.1 * 2.5	Acero al carbono conformado
Tubería fluido caliente	D = 0.0127	Cobre
Tubería fluido frío	D = 0.0254	Acero inoxidable

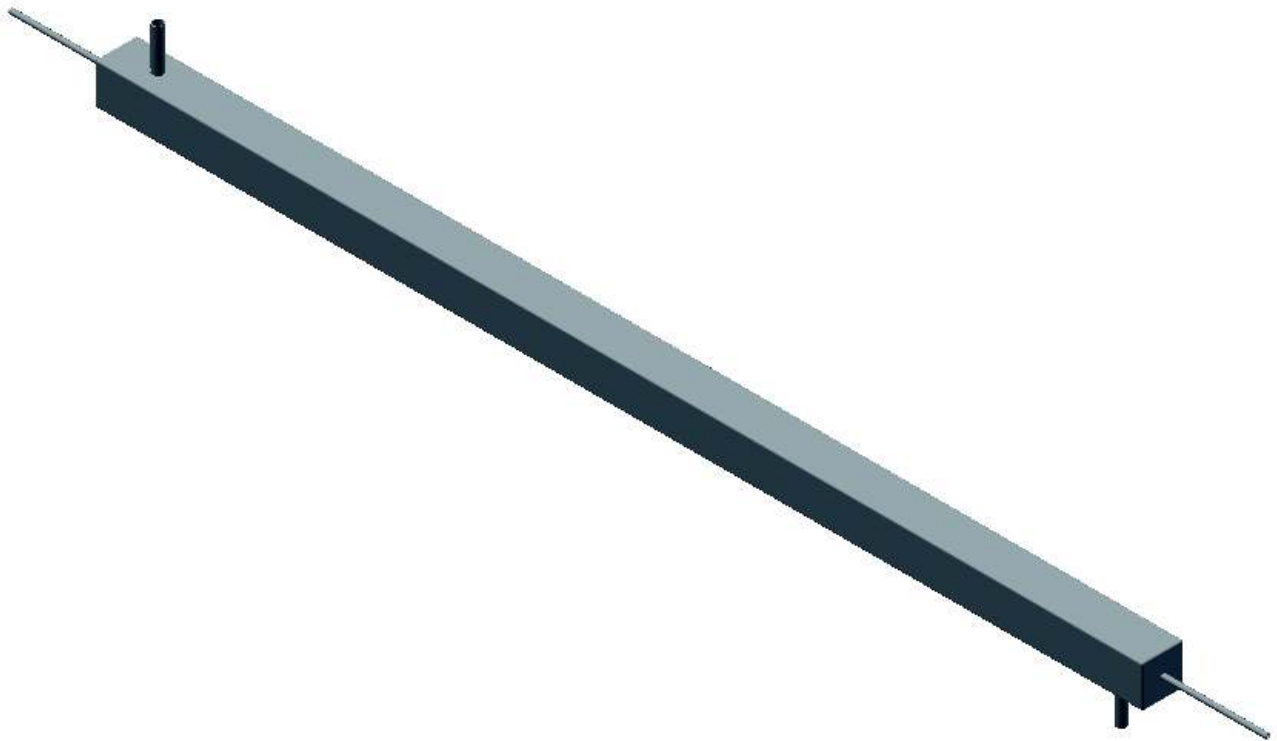


Figura 11. Recuperador de calor (Propia).

El plano del recuperador se encuentra en el anexo C.

Tanque de almacenamiento

De igual manera en la tabla 5 para el tanque de almacenamiento, se aclarará con el siguiente esquema las dimensiones y forma del tanque.

Tabla 5. Detalle de dimensiones y materiales de los diferentes elementos básicos que constituyen el tanque de almacenamiento (Propia, Detalle de dimensiones y materiales de los diferentes elementos básicos que constituyen el tanque de almacenamiento, 2018)

Elemento	Dimensiones principales	Material
Carcasa cilíndrica	D = 0.628 x 0.942	Polietileno de alta densidad
Tapa superior	D = 0.628 x 0.157	Polietileno de alta densidad
Tapa inferior	D = 0.628 x 0.157	Polietileno de alta densidad



Figura 12. Tanque de almacenamiento (Propia).

El plano del tanque de almacenamiento se encuentra en el anexo D. Las válvulas de conexión, neoplos y demás elementos de instalación se detallan en el análisis económico a continuación.

Simulación

Definición del problema y función objetivo

Mediante todo el desarrollo del presente estudio, se ha desarrollado paso a paso un sistema que permita ahorrar tanto el recurso utilizado para calentamiento de agua sanitaria (GLP) y como consecuencia, dinero a las familias quiteñas.

En este capítulo 3, el desarrollo se lo ha realizado bajo datos y conceptos enteramente teóricos. Ahora, se simulará el mismo sistema que anteriormente se analizó bajo condiciones más reales. Para lograr esto definimos las funciones objetivo, la cual nos permitirá conocer los resultados del sistema para lograr el objetivo principal del proyecto:

- 1) Modelado dinámico del sistema con el cual se aproximará el ahorro económico que se obtiene.
- 2) Sensibilidad del sistema según 3 escenarios:
 - a) Sistema sin recuperador
 - b) Sistema teórico con recuperador con temperaturas constantes de cada uso

- c) Sistema apegado a condiciones reales con recuperador con temperaturas de acuerdo a cada uso

Características del software computacional

La simulación se la realizará en el software VENSIM PLEx32, programa que permite analizar, editar ecuaciones, simular y documentar de manera fácil y sencilla. Esto se logra mediante la unión de variables por medio de lazos y ecuaciones de modelos y escenarios dinámicos que representan procesos, situaciones, condiciones, etc. Adicionalmente, este software permite tener una retroalimentación de cada variable como por ejemplo en el cálculo del recuperador de calor en el que la temperatura de entrada genera una diferente temperatura de salida dependiendo del consumo, esto se verá con más detalle más adelante. Todos los modelos estarán determinados para un tiempo entre 0 a 24 horas que equivale a un día.



Figura 13. Presentación del programa VENSIM (Propia).

Modelación del sistema sin recuperador

El sistema de calentamiento consta únicamente del calefón, para esto tenemos el calor total para elevar la temperatura del agua de 15 °C a 60 °C, masa de agua y masa de GLP para lograr el objetivo como se indica en la siguiente figura 14:

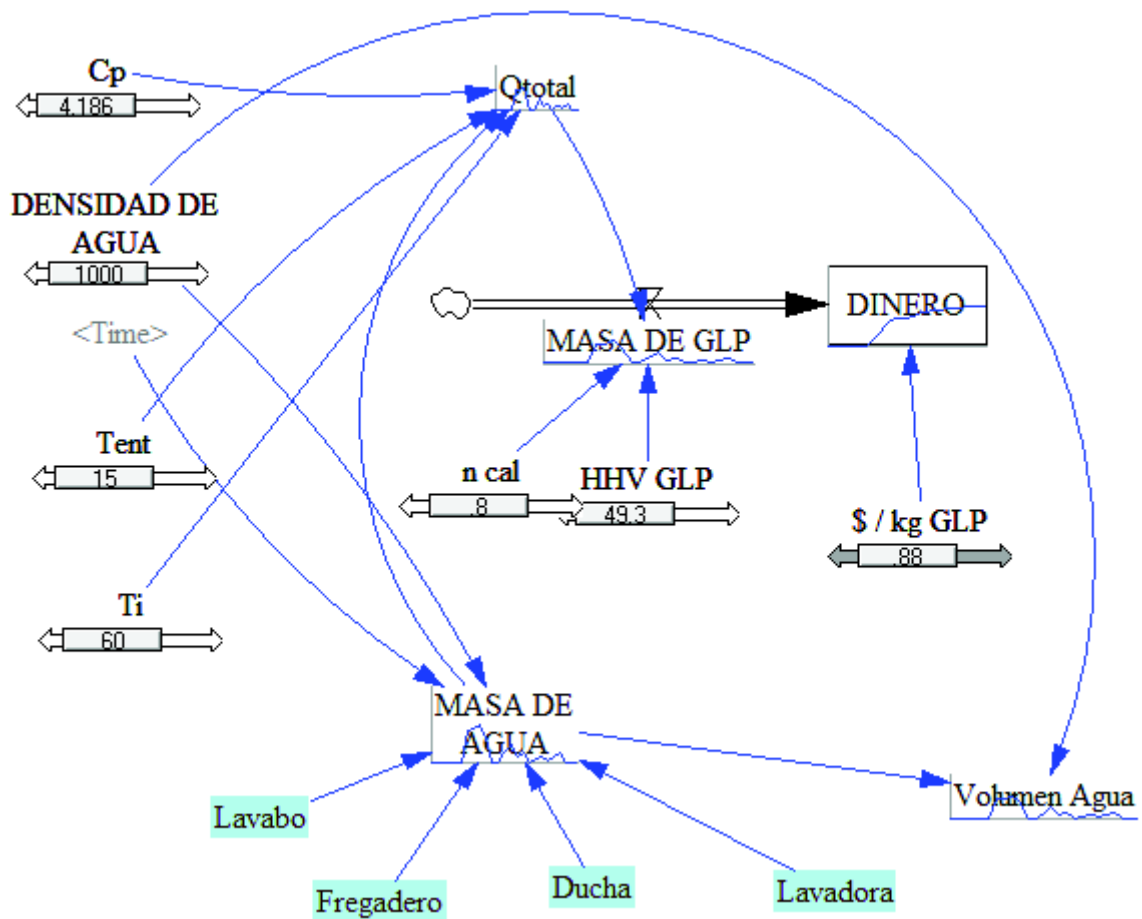


Figura 14. Sistema sin recuperador (Propia).

En este punto del sistema sin recuperador tenemos los siguientes resultados en las figuras 15, 16 y 17 en donde podemos observar el calor total que el calefón debe proporcionar al sistema para alentar el agua de 15 °C a 60 °C, la cantidad del recurso GLP que se utiliza y la cantidad de dinero que mes a mes les cuesta a los hogares quiteños el adquirir este recurso para calentamiento de agua sanitaria:

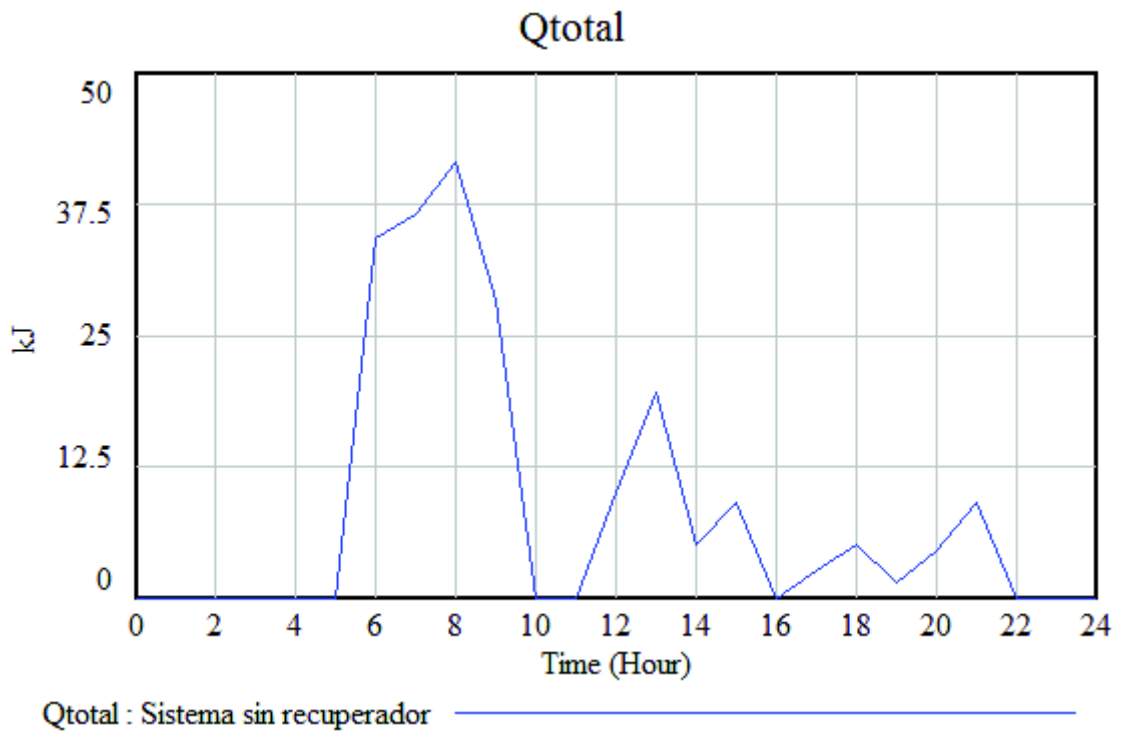


Figura 15. Sistema sin recuperador – Calor total (Propia).

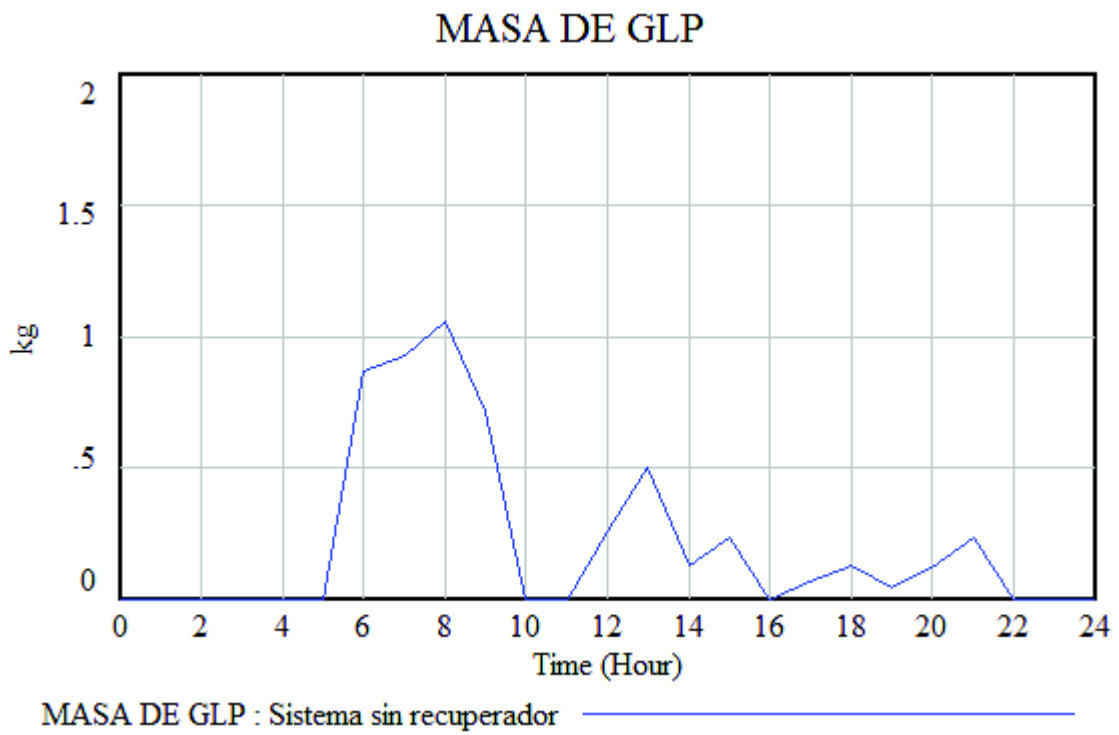


Figura 16. Sistema sin recuperador – Masa de GLP (Propia).

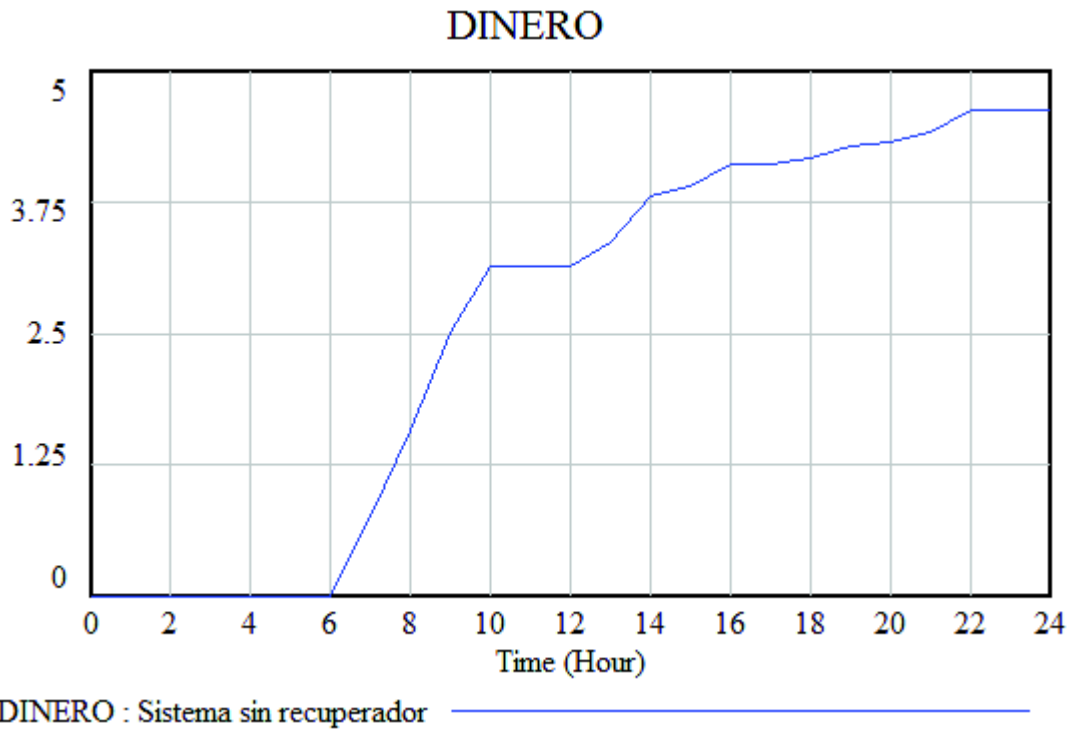


Figura 17. Sistema sin recuperador – Dinero (Propia).

Como se puede observar todos los resultados tienen variaciones cuando el sistema se encuentra en utilización, esto debido a que la masa de agua se determinó en base a cada consumo como se detallará a continuación en las siguientes figuras 18, 19, 20 y 21:

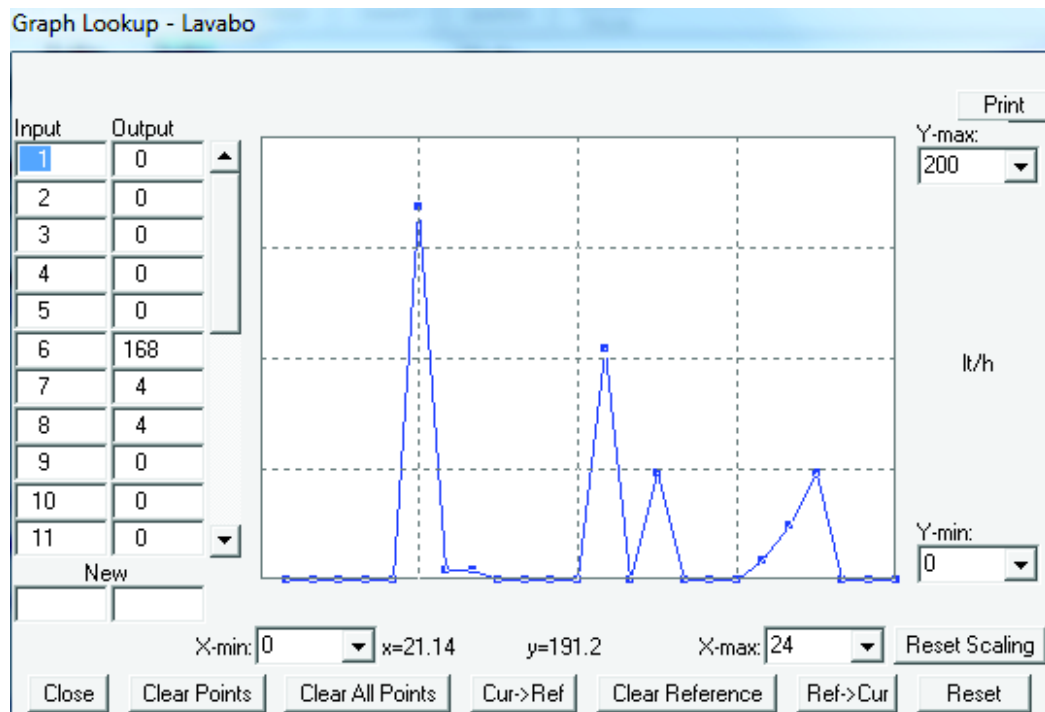


Figura 18. Sistema sin recuperador – Consumo lavabo (Propia).

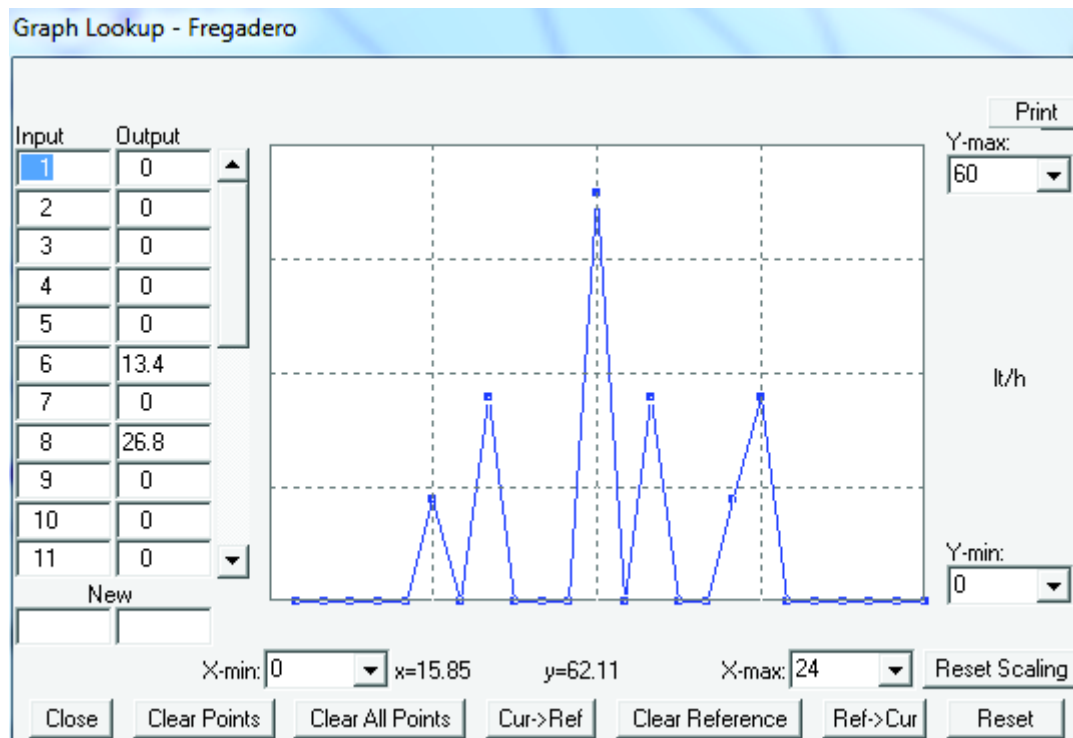


Figura 19. Sistema sin recuperador – Consumo fregadero (Propia).

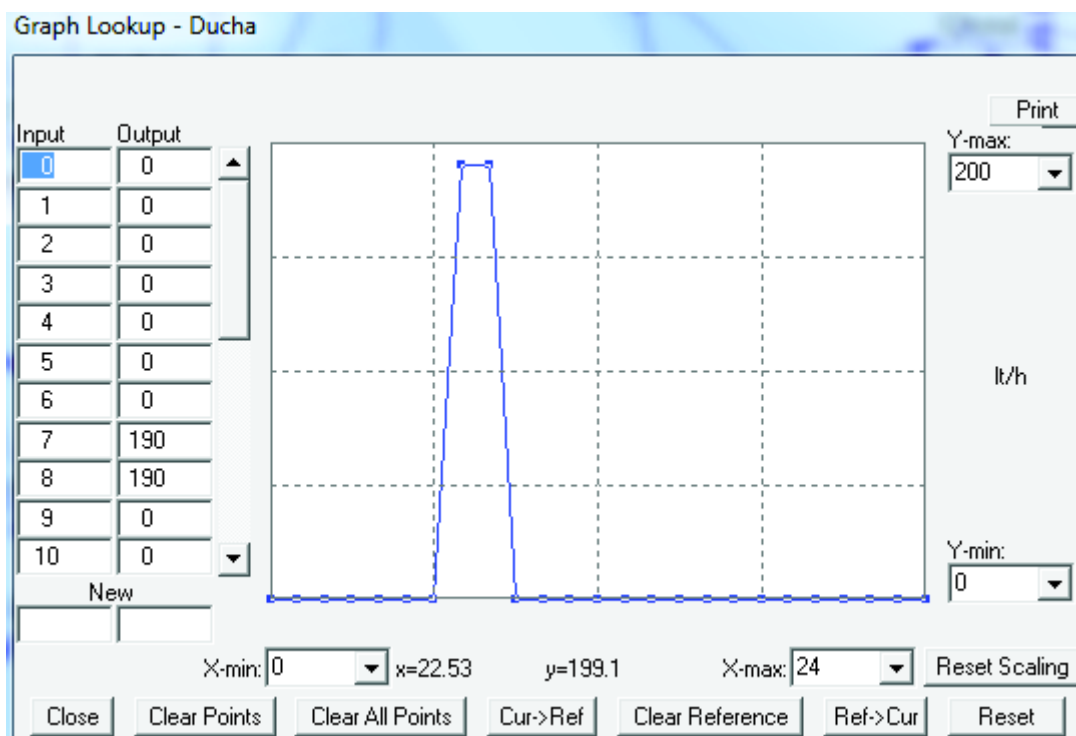


Figura 20. Sistema sin recuperador – Consumo ducha (Propia)

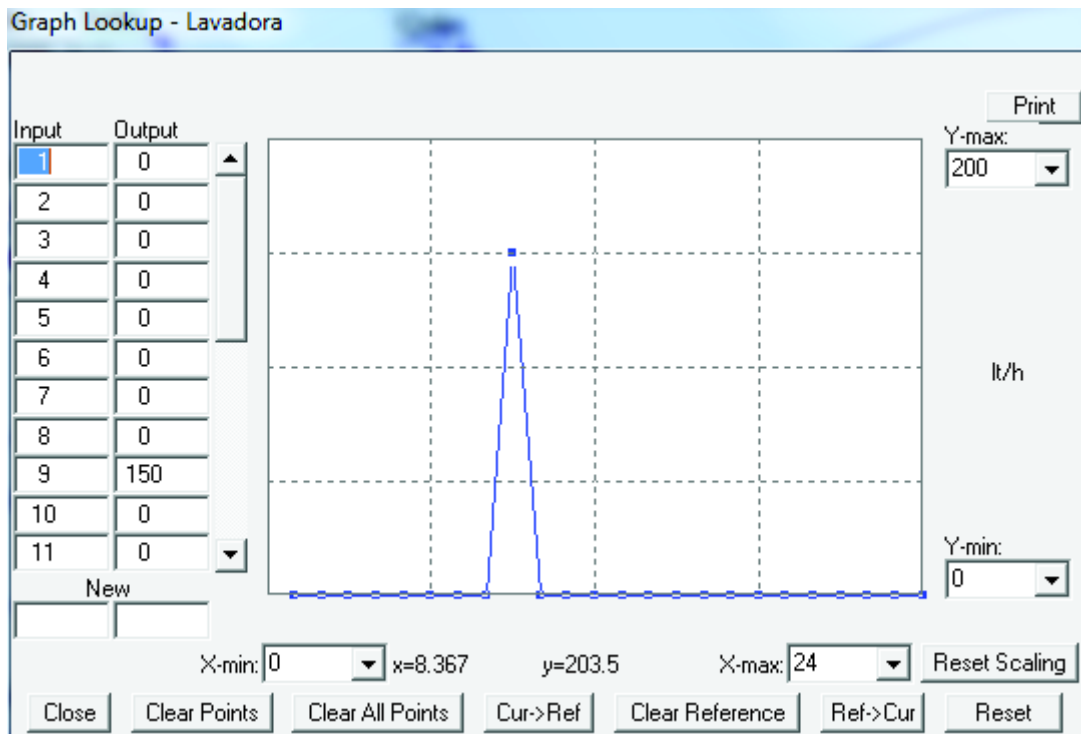
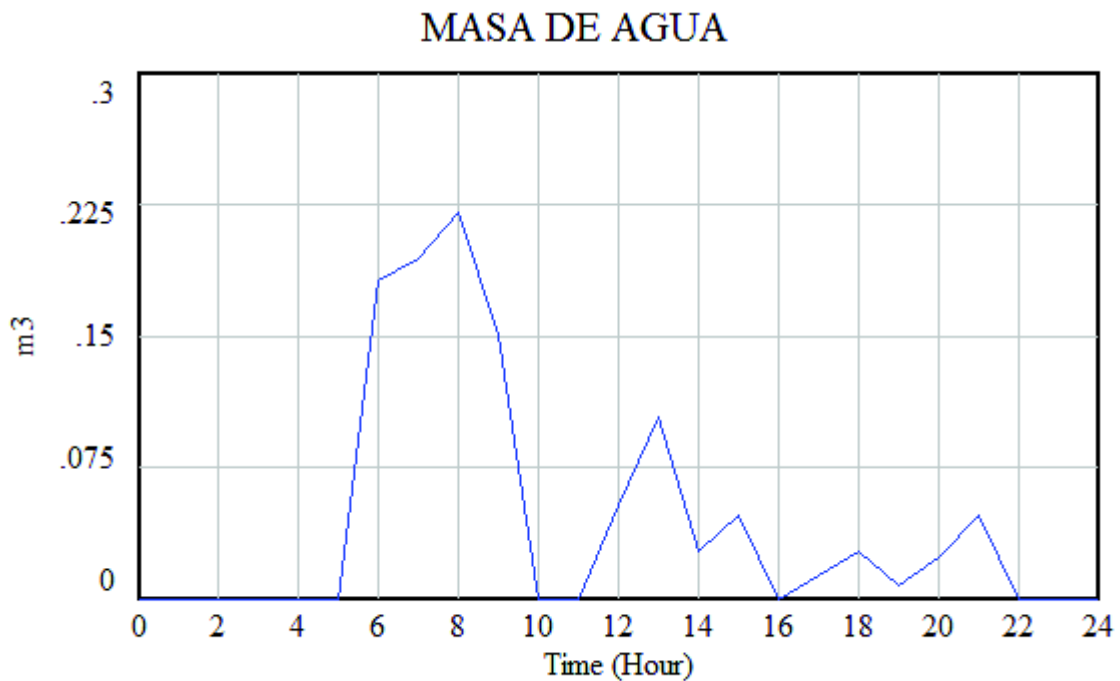


Figura 21. Sistema sin recuperador – Consumo lavadora (Propia)

La masa total de agua corresponde a la sumatoria de todos estos consumos en el tiempo como se verá a continuación en la figura 22:



MASA DE AGUA : Sistema sin recuperador

Figura 22. Sistema sin recuperador – Masa de agua total (Propia)

Modelación del sistema con recuperador con temperaturas constantes

El sistema de calentamiento para este caso ya consta con el calefón, recuperador y almacenamiento, para esto tenemos el calor total para elevar la temperatura del agua de 15 °C a 60 °C, el calor del recuperador, el calor de almacenamiento con sus respectivas pérdidas en el tiempo cuando el sistema no está en uso, masa de agua y masa de GLP para lograr el objetivo como se indica en la siguiente figura 23:

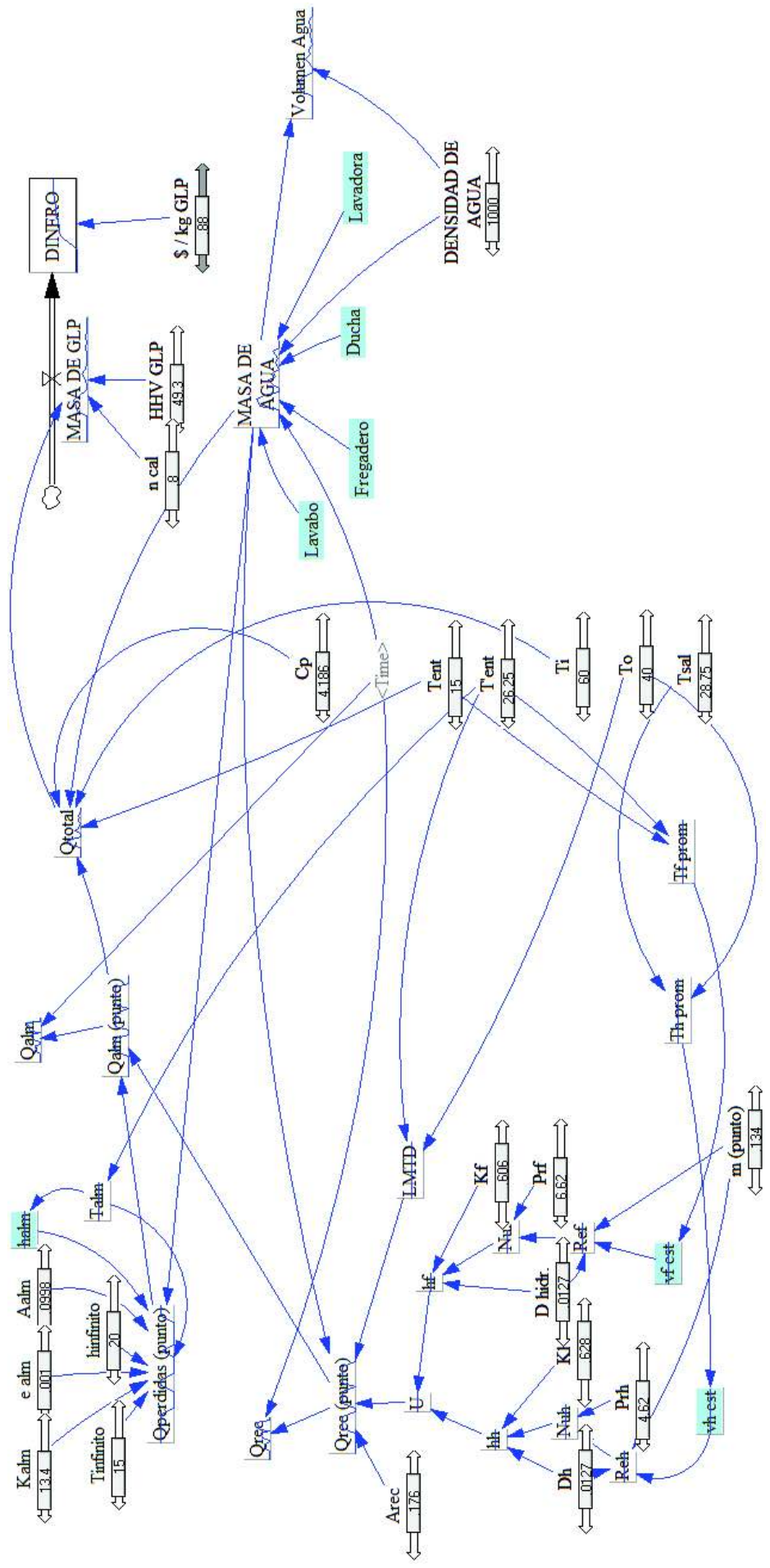


Figura 23. Sistema con recuperador (Propia)

Para este sistema podemos diferenciar:

- Sistema recuperador: En donde se ingresan todas las variables según el cálculo que permiten el dimensionamiento del intercambiador de calor, con temperaturas constantes por supuesto. Se lo puede observar en la siguiente figura 24:

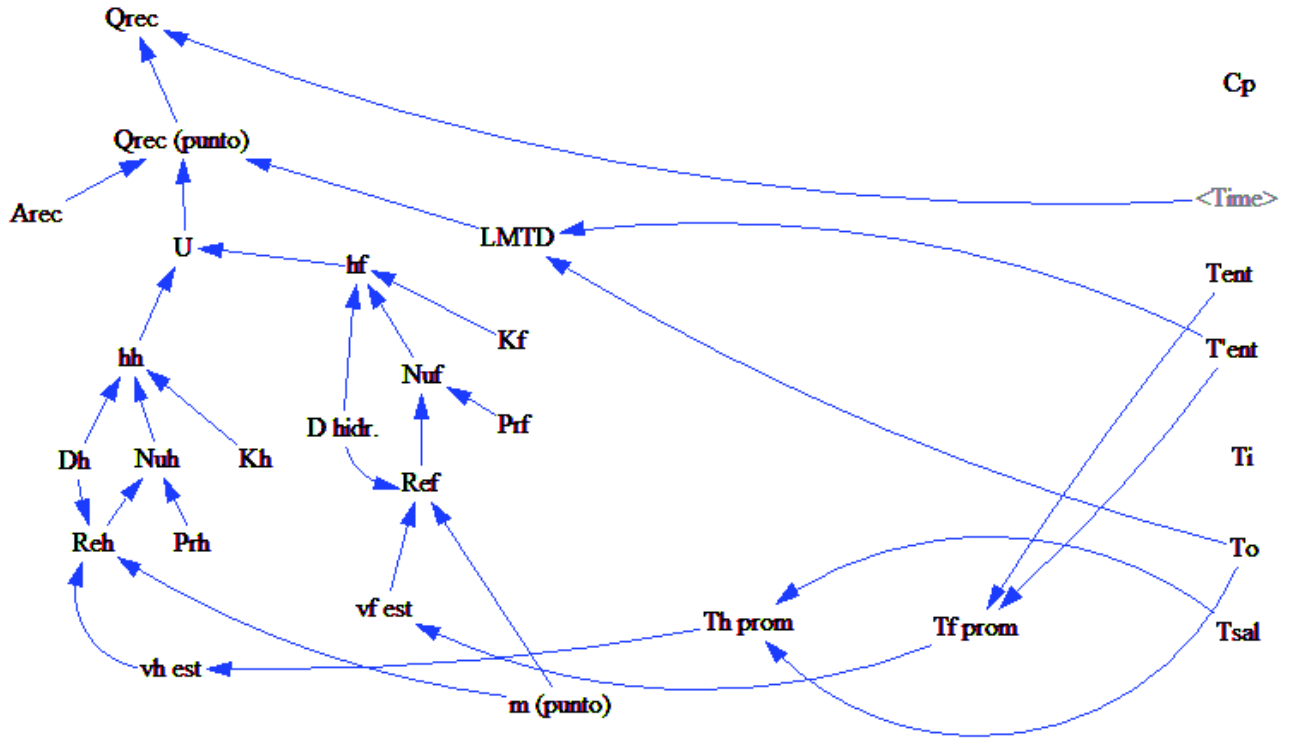
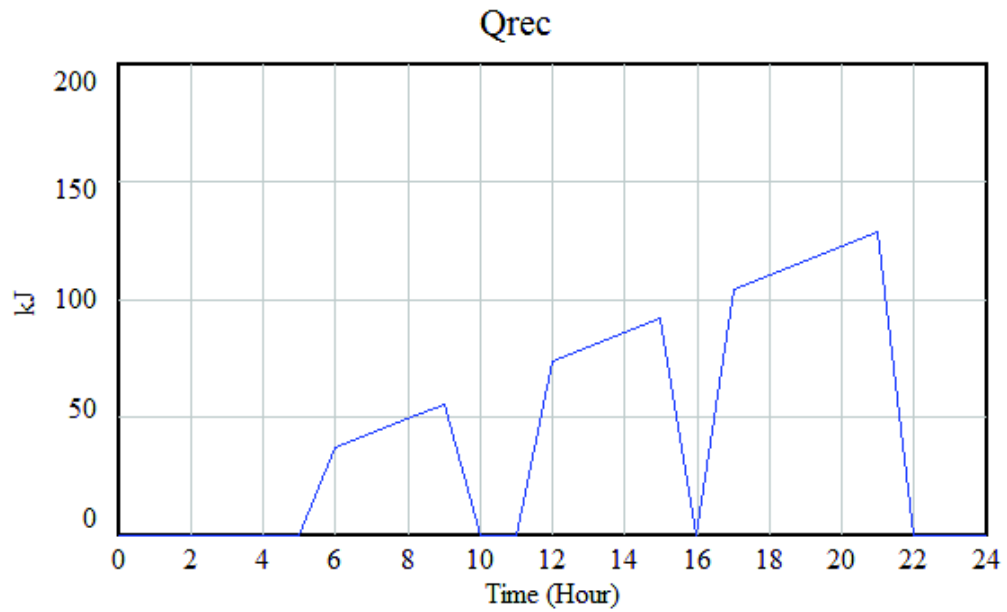


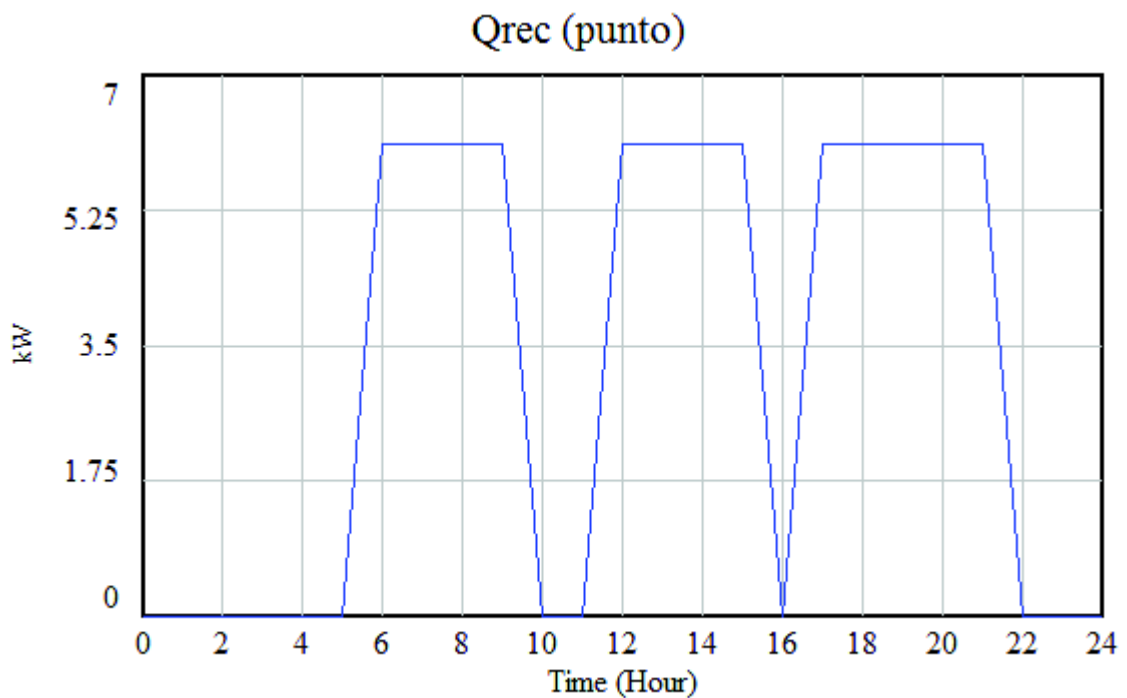
Figura 24. Sistema con recuperador – Recuperador (Propia)

El calor recuperado y la velocidad de transferencia a la final tenemos:



Qrec : Sistema con recuperador T=ctes

Figura 25. Sistema con recuperador – Calor recuperador (Propia)



"Qrec (punto)" : Sistema con recuperador T=ctes

Figura 26. Sistema con recuperador – Velocidad de transferencia de calor recuperador (Propia)

Como se puede observar, hay transferencia de calor únicamente cuando el sistema está siendo utilizado.

- Sistema almacenamiento: En donde ingresa por parte del recuperador el calor que va al tanque de almacenamiento. Adicionalmente, se ingresan todas las variables que

permiten calcular las pérdidas de calor que se presentan en el tanque cuando el sistema no se encuentra en funcionamiento. Se puede observar de mejor manera en la siguiente figura 27:

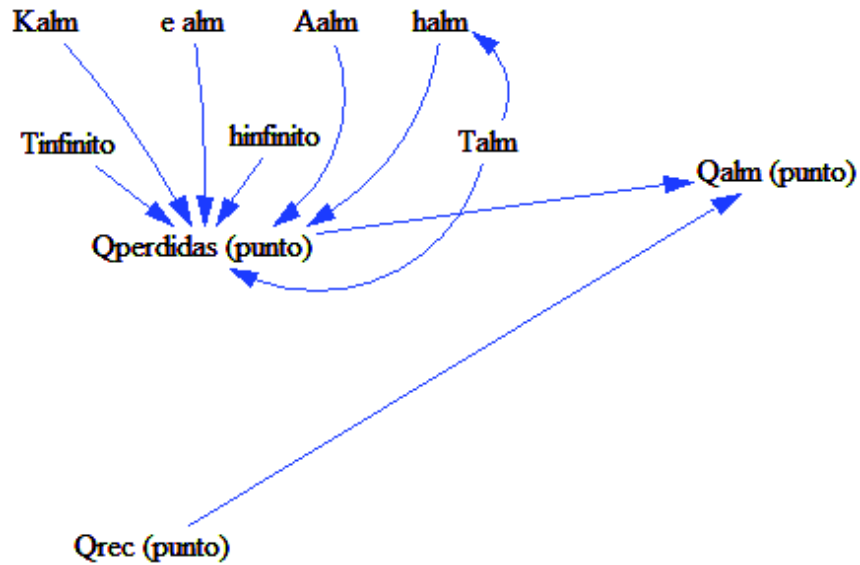
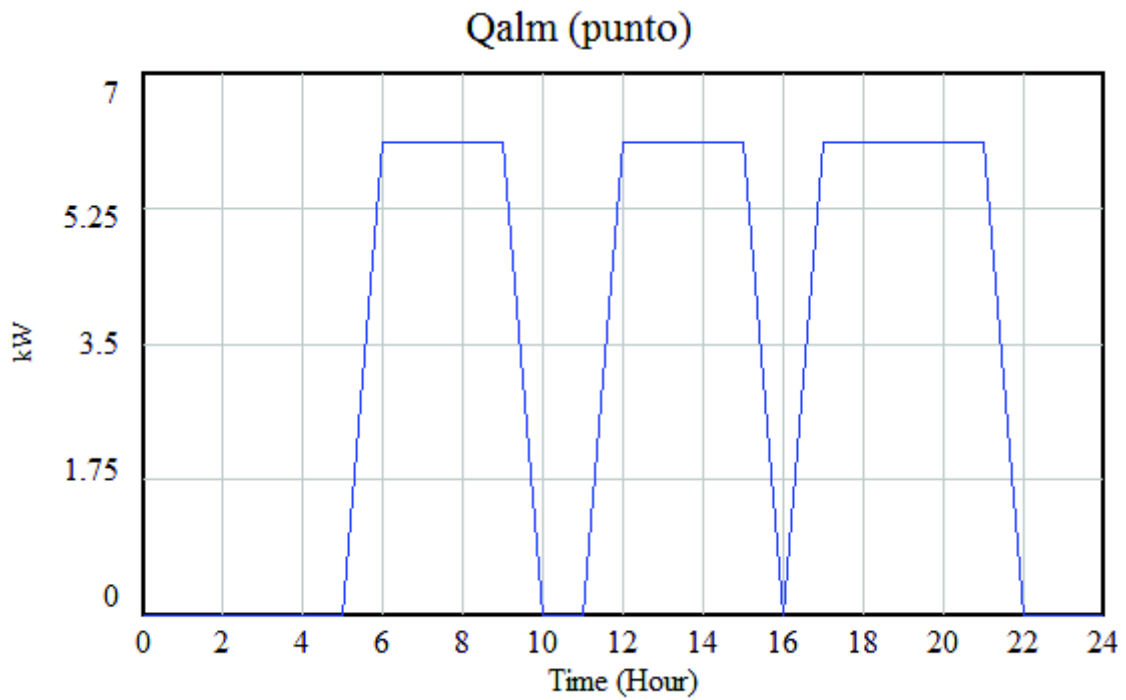


Figura 27. Sistema con recuperador – Almacenamiento (Propia)

El calor almacenado al final tenemos en la siguiente figura 28:



" $Q_{alm} \text{ (punto)}$ " : Sistema con recuperador T - ctes

Figura 28. Sistema con recuperador – Velocidad de transferencia de calor de ingreso al almacenamiento (Propia)

Como resultados finales de este sistema con recuperador con temperaturas constantes tenemos en la siguiente figura 29, 30 y 31:

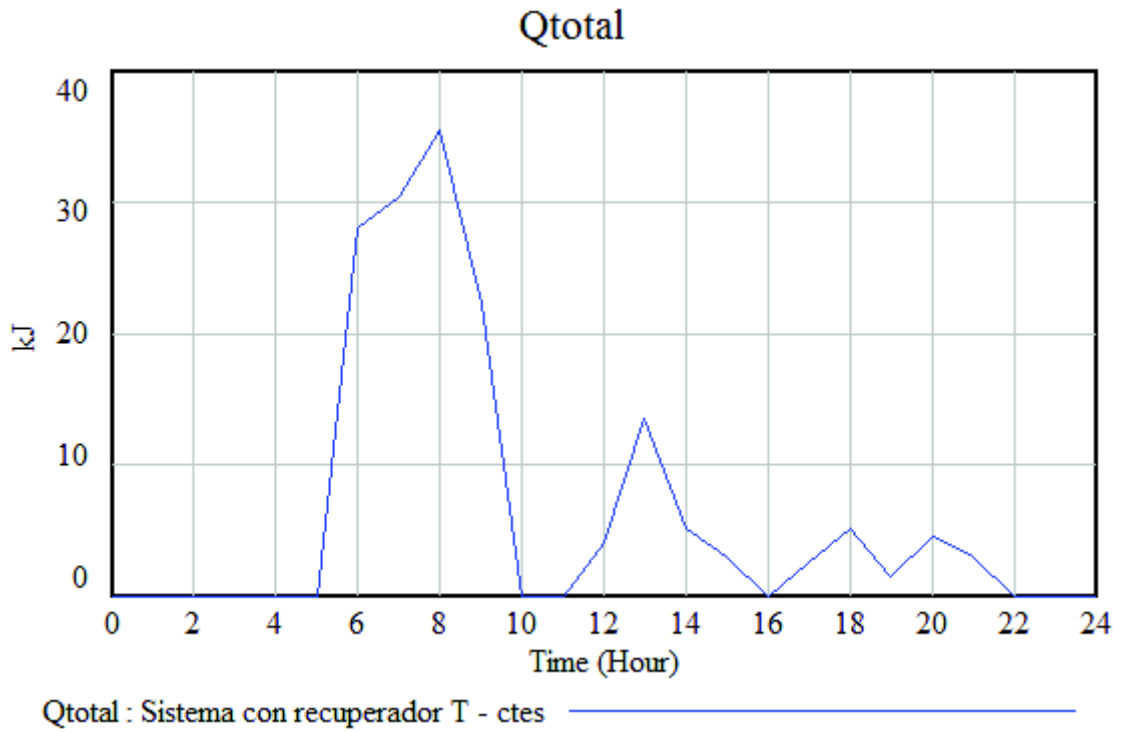


Figura 29. Sistema con recuperador – Calor total (Propia)

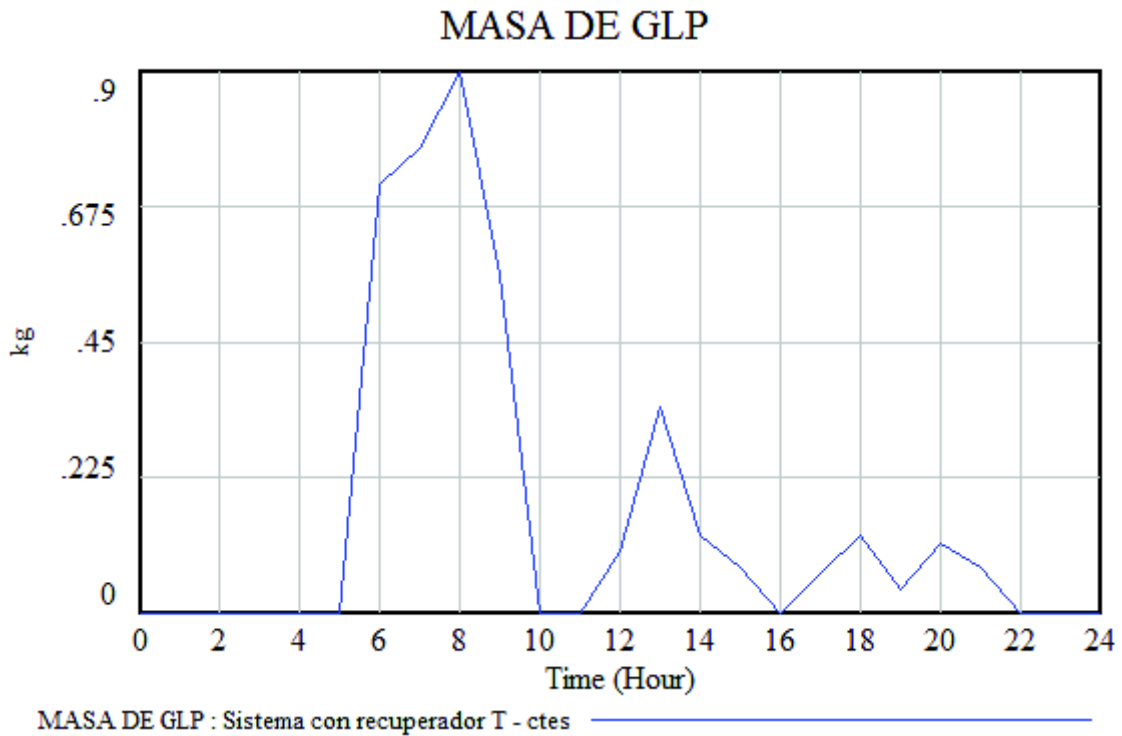


Figura 30. Sistema con recuperador – Masa de GLP (Propia)

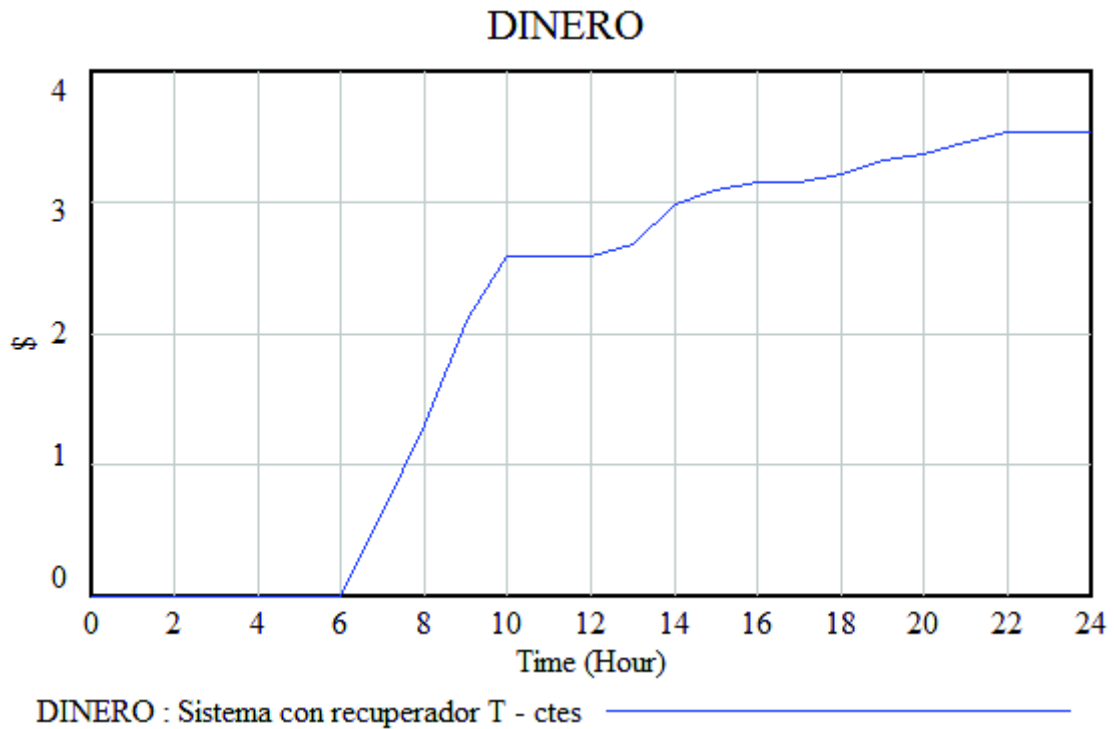


Figura 31. Sistema con recuperador – Dinero (Propia)

Modelación del sistema con recuperador con temperaturas de acuerdo a cada uso

El sistema de calentamiento para este caso ya consta con todos los elementos, para esto tenemos el calor total para elevar la temperatura del agua de 15 °C a 60 °C tomando en cuenta la temperatura requerida por cada uso y como varían en el tiempo. Se puede observar el sistema completo en la siguiente figura 32:

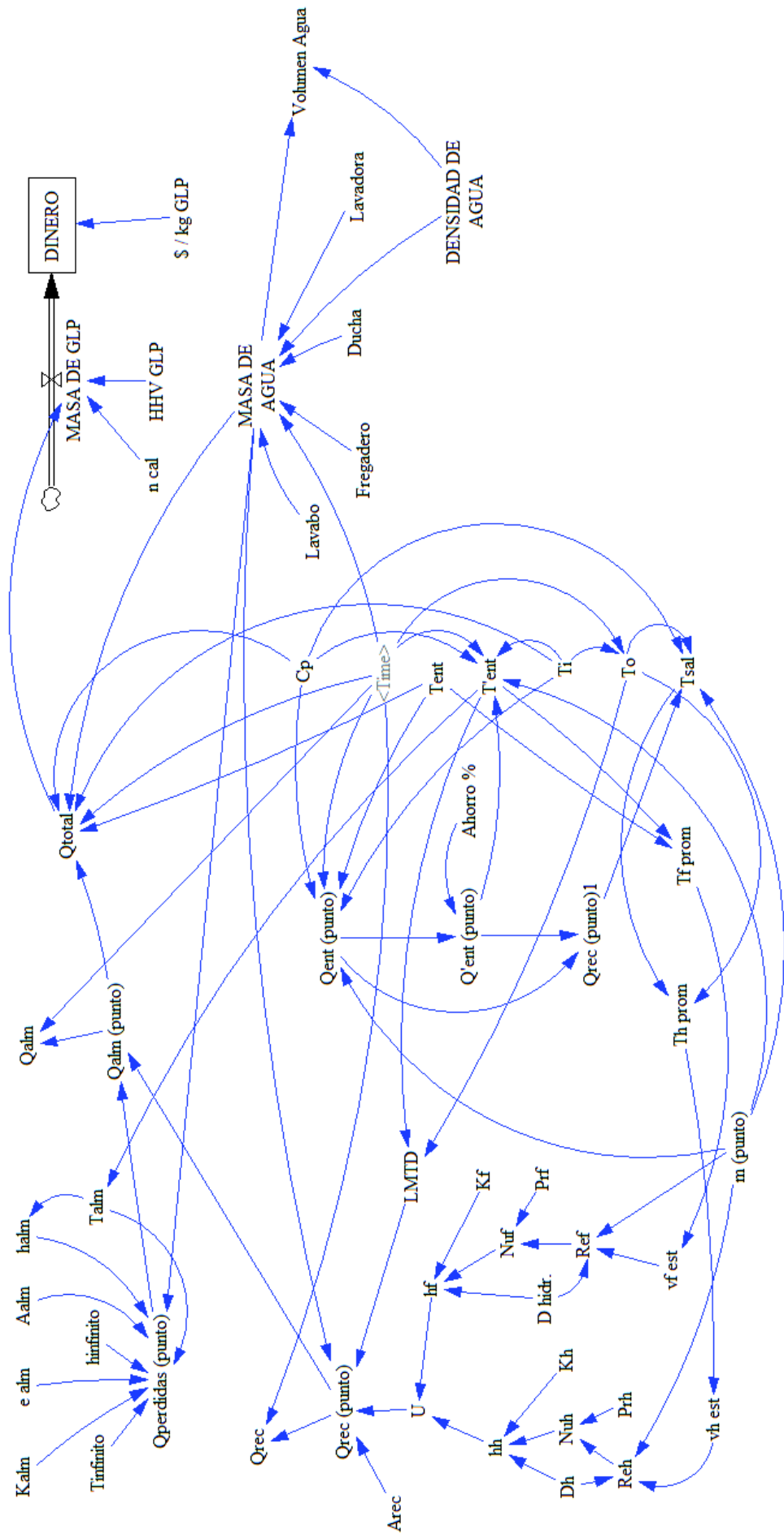


Figura 32. Sistema con recuperador con temperaturas reales (Propia)

En este sistema se determina las relaciones bajo las cuales la temperatura de cada uso es tomada en cuenta y no constante como en los escenarios anteriores. Adicionalmente, también se concatena esa variación de temperatura de cada uso con la temperatura después de cada uno y que ingresará al intercambiador de calor en el tiempo, para esto se detalla la programación las ecuaciones de dependencia en el anexo. Los resultados finales se pueden apreciar a continuación en la figura 33, 34 y 35:

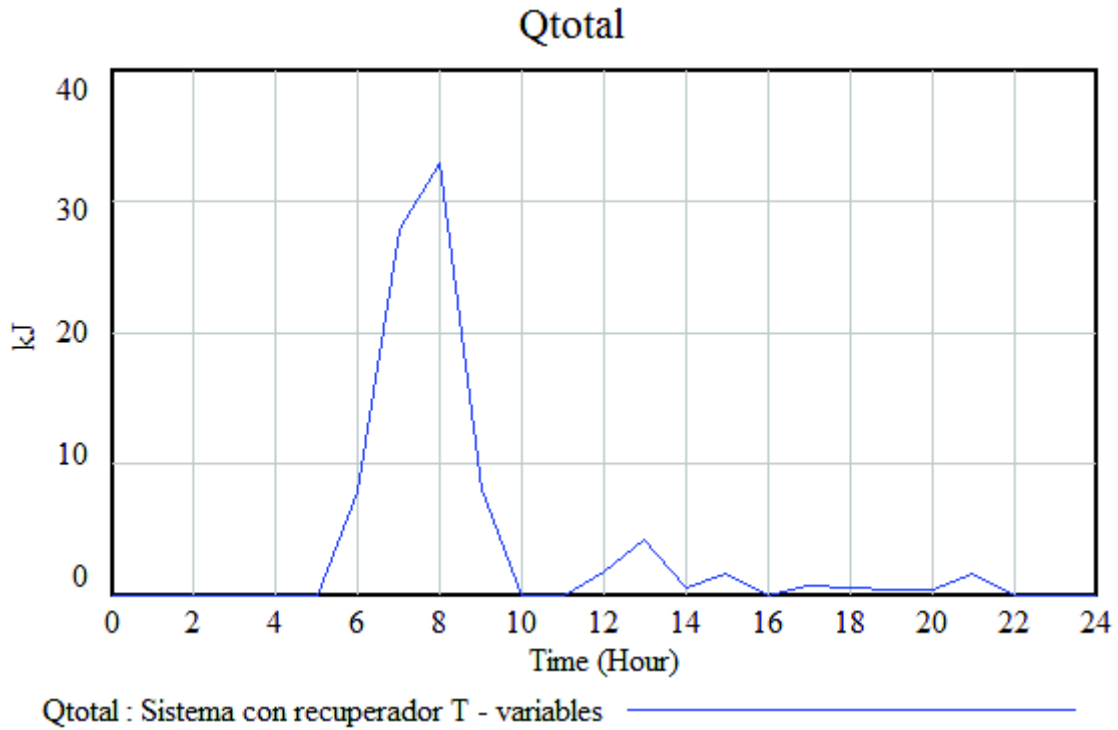


Figura 33. Sistema con recuperador con temperaturas reales – Calor total (Propia)

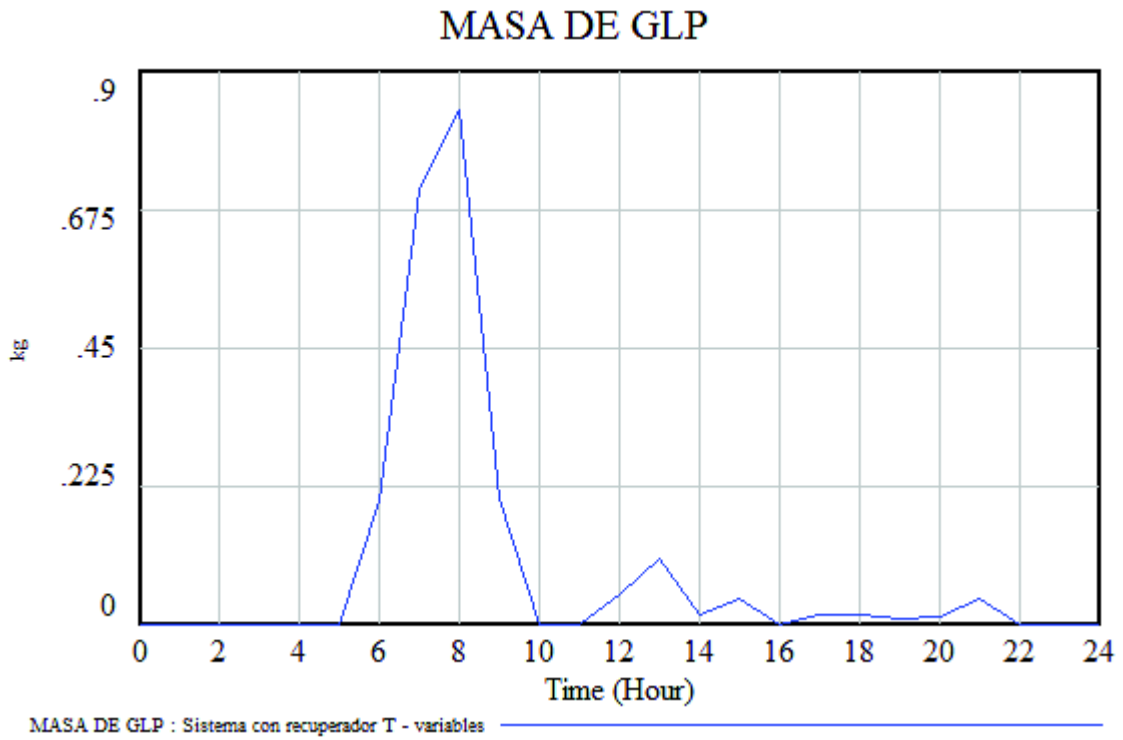


Figura 34. Sistema con recuperador con temperaturas reales – Masa de GLP (Propia)

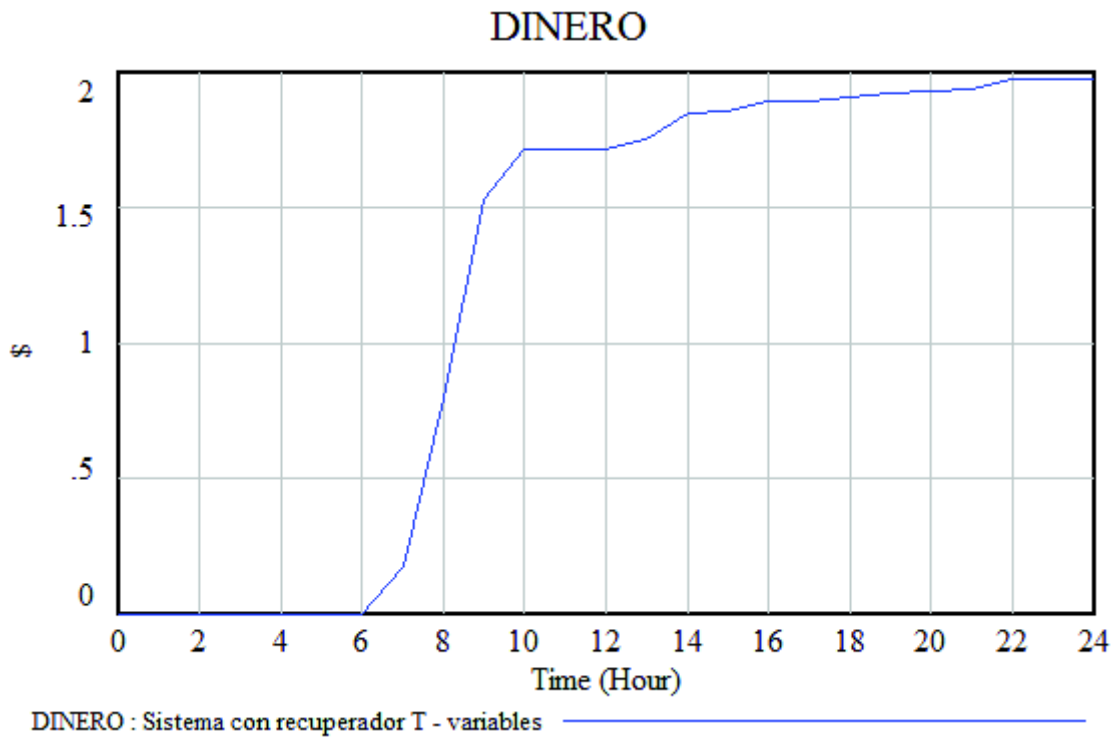


Figura 35. Sistema con recuperador con temperaturas reales – Dinero (Propia)

Análisis económico del sistema

Para el análisis económico del sistema, se deben definir varios datos principales con la finalidad de poder calcular el VAN, TIR y tiempo de recuperación de inversión:

Tabla 6. Tabla con los datos principales para el análisis económico del estudio.

ANÁLISIS ECONÓMICO DEL ESTUDIO		
TASA DE DESCUENTO [%]	i	5,06%
TIEMPO [años]	n	10
INVERSIÓN INICIAL [\$]	Io	\$ -889.60
INGRESO ANUAL [\$]	Ia	\$ 420.78
EGRESO ANUAL [\$]	Ea	\$ 100,00

Donde la inversión inicial está definida por la sumatoria de 3 puntos importantes como se detallan en la siguiente tabla 12: materiales (tabla 13), mano de obra (tabla 14) y fabricación (tabla 15).

Tabla 7. Inversión del sistema

INVERSIÓN INICIAL		
MATERIALES	M	\$ 244.60
MANO DE OBRA	MO	\$ 575.00
FABRICACIÓN	F	\$ 70.00
	TOTAL	\$ 889.60

Tabla 8. Materiales del sistema

MATERIALES					
Tubería de cobre	8	m	\$ 2.61	\$/m	\$ 20.88
Tubería de acero Inox. Gal. Recubierta de zinc	8	m	\$ 4.02	\$/m	\$ 32.16
Tubería PVC	8	m	\$ 2.02	\$/m	\$ 16.16
Accesorios	varios		\$ 20.00		\$ 20.00
Lana de vidrio	4	m ²	\$ 8.60	\$/m	\$ 34.40
Tanque de 15 gal	1	unidad	\$100.00	\$/unidad	\$100.00
Codos 90°	6	unidad	\$ 0.50	\$/unidad	\$ 3.00
Adaptador	6	unidad	\$ 0.50	\$/unidad	\$ 3.00
Válvula universal PVC	1	unidad	\$ 5.00	\$/unidad	\$ 5.00
Neplo	2	unidad	\$ 0.50	\$/unidad	\$ 1.00
Unión universal	2	unidad	\$ 0.50	\$/unidad	\$ 1.00
Pintura en spray	2	unidad	4	\$/unidad	\$ 8.00
Ánodo de sacrificio	1	unidad	25	\$/unidad	\$ 25.00
			TOTAL		\$244.60

A pesar de que en el dimensionamiento se calculó una longitud del intercambiador de 4.55 m, se escogió una longitud de 8 m en el material debido a que es la mínima longitud que se vende en el mercado ecuatoriano.

Tabla 9. Mano de obra

MANO DE OBRA			
Ingeniero mecánico	1	persona	\$500,00
Plomero	1	persona	\$ 25,00
Soldador	1	persona	\$ 50,00
TOTAL			\$575,00

Tabla 10. Fabricación del sistema

FABRICACIÓN	
Herramientas de ensamblaje	\$ 20,00
Soldadura	\$ 50,00
TOTAL	\$ 70,00

Los ingresos anuales están definidos por:

$$I_a = \text{Valor gastado sin recuperador} - \text{Valor gastado con recuperador}$$

$$I_a = \$ 4.61 - \$ 3.46 = 1.15 \frac{\$}{\text{día}} * 365 \text{ días} = \mathbf{420.78} \frac{\$}{\text{año}}$$

Los egresos anuales están definidos por el valor del mantenimiento preventivo del sistema anualmente:

$$E_a = \text{Mantenimiento anual} = \mathbf{150.00} \frac{\$}{\text{año}}$$

Para lo cual tenemos el siguiente flujo neto de efectivo expresado en la tabla 16 y en la figura 37:

Tabla 11. Flujo actual neto de dinero.

tiempo	FLUJO ACTUAL NETO
0	\$ -889.60
1	\$ 320.78
2	\$ 320.78
3	\$ 320.78
4	\$ 320.78
5	\$ 320.78
6	\$ 320.78
7	\$ 320.78
8	\$ 320.78
9	\$ 320.78
10	\$ 320.78
TOTAL	\$ 2,318.24

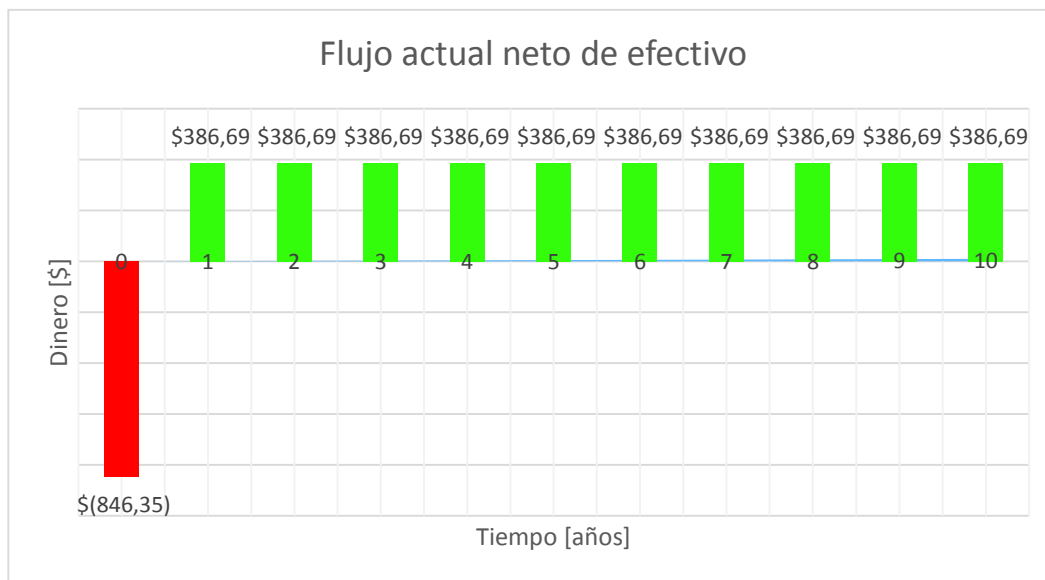


Figura 36. Flujo actual neto de efectivo (Propia).

El VAN se encuentra definido por la ecuación (48):

$$VAN = -846.35 + \frac{386.69}{(1 + 0.0506)^1} + \frac{386.69}{(1 + 0.0506)^2} + \frac{386.69}{(1 + 0.0506)^3} + \frac{386.69}{(1 + 0.0506)^4} + \frac{386.69}{(1 + 0.0506)^5} + \frac{386.69}{(1 + 0.0506)^6} + \frac{386.69}{(1 + 0.0506)^7} + \frac{386.69}{(1 + 0.0506)^8} + \frac{386.69}{(1 + 0.0506)^9} + \frac{386.69}{(1 + 0.0506)^{10}}$$

$$VAN = \$ 1580.21$$

El TIR se encuentra definido por la ecuación (49):

$$VAN = 0 = -846.34 + \frac{386.69}{(1 + TIR)^1} + \frac{386.69}{(1 + TIR)^2} + \frac{386.69}{(1 + TIR)^3} + \frac{386.69}{(1 + TIR)^4} + \frac{386.69}{(1 + TIR)^5} + \frac{386.69}{(1 + TIR)^6} + \frac{386.69}{(1 + TIR)^7} + \frac{386.69}{(1 + TIR)^8} + \frac{386.69}{(1 + TIR)^9} + \frac{386.69}{(1 + TIR)^{10}}$$

$$TIR = 34 \%$$

El tiempo de recuperación de la inversión está definido por la ecuación (50):

$$Tiempo\ de\ recuperación = \frac{846.34}{386.69} = 2.8\ años$$

3.3. Discusión

Sistema de calentamiento de agua

Mediante el cálculo se dimensionó la potencia que debe tener el calefón para calentar solo y por su cuenta el ACS a 60 °C. Claro está que se puede colocar uno de mayor potencia con la finalidad de aumentar la aplicabilidad del sistema como por ejemplo calefacción ambiental en ciertos puntos de la casa que no fueron objeto de análisis en el presente estudio.

Recuperador

En el dimensionamiento del recuperador se definió lo que es longitud, números de Reynolds de fluido caliente y frío y caída de presión como parámetros más importantes, al ver los resultados se puede determinar que tienen lógica y son razonables para un sistema para esta aplicación.

Es decir, con la longitud se puede determinar que el intercambiador no va a ser muy grande lo cual es bueno para evitar ocupar mucho espacio y sea de fácil montaje. Con los números de Reynolds del fluido caliente y frío en régimen turbulento se garantiza una buena transferencia de calor entre los dos tubos internos por donde circularán. Con la caída de presión podemos notar que se encuentra dentro de parámetros razonables de funcionamiento, lo cual garantiza que al ser un producto de toda la cadena de cálculos va a funcionar adecuadamente para la necesidad para la cual es requerido.

Tanque de almacenamiento

En el desarrollo del funcionamiento final fue evidente el gran aporte que brinda el tanque de almacenamiento al sistema, esto debido a que cuando el sistema deja de funcionar las líneas de transporte del ACS se enfrían y el calefón se demora más en calentar el agua a 60 °C, como se pudo observar en el tiempo de calentamiento del calefón en la ecuación 50. Como consecuencia de esto al momento de volver a utilizar algún elemento que active el sistema, éste tiene un tiempo transitorio en donde el agua poco a poco va calentándose hasta lograr la temperatura de trabajo. Es en este punto transitorio donde entra en acción la energía térmica almacenada en el agua que se encuentra en el tanque, con ella se suple esta deficiencia del sistema al momento inicial de uso.

Análisis energético inicial vs. Análisis energético real

En el análisis energético inicial se determinó la metodología a seguir para el diseño del sistema, además se pudo observar resultados bajo condiciones ideales y de igual manera se obtuvieron resultados interesantes bajo condiciones reales en cuanto al dimensionamiento del intercambiador de calor. A pesar de que se optimizaron las condiciones de funcionamiento, el diseño fue muy similar en cuanto a longitud (ideal 2.5 m y en real 2.3 m). Esto indica que la primera aproximación no estuvo

tan alejada de la realidad y que la bajo condiciones reales el sistema se comportará muy cerca de lo ideal lo que indica que el diseño tiene alto potencial de funcionamiento alienado a los objetivos.

Simulación

Para los resultados finales de la simulación se tomarán en cuenta las principales y más representativas variables las cuales presentan importantes variaciones con la finalidad de no repetir todas las variables:

Las variables a considerar serán:

4. T_i = Temperatura de salida del calefón a los distintos servicios

Esta temperatura inicialmente se la definió constante e igual al valor de 60 °C con la finalidad de que el sistema de abasto según los servicios a utilizarse. Bajo las condiciones reales, esto no es tan cierto, ya que no todos los servicios manejan una temperatura en el agua de 60 °C. Se lo definió con un look up acorde a la temperatura de cada servicio con lo que permite al sistema comenzar a comportarse de manera más cercana a la realidad, se puede observar la diferencia descrita en las siguientes figuras 37 y 38.

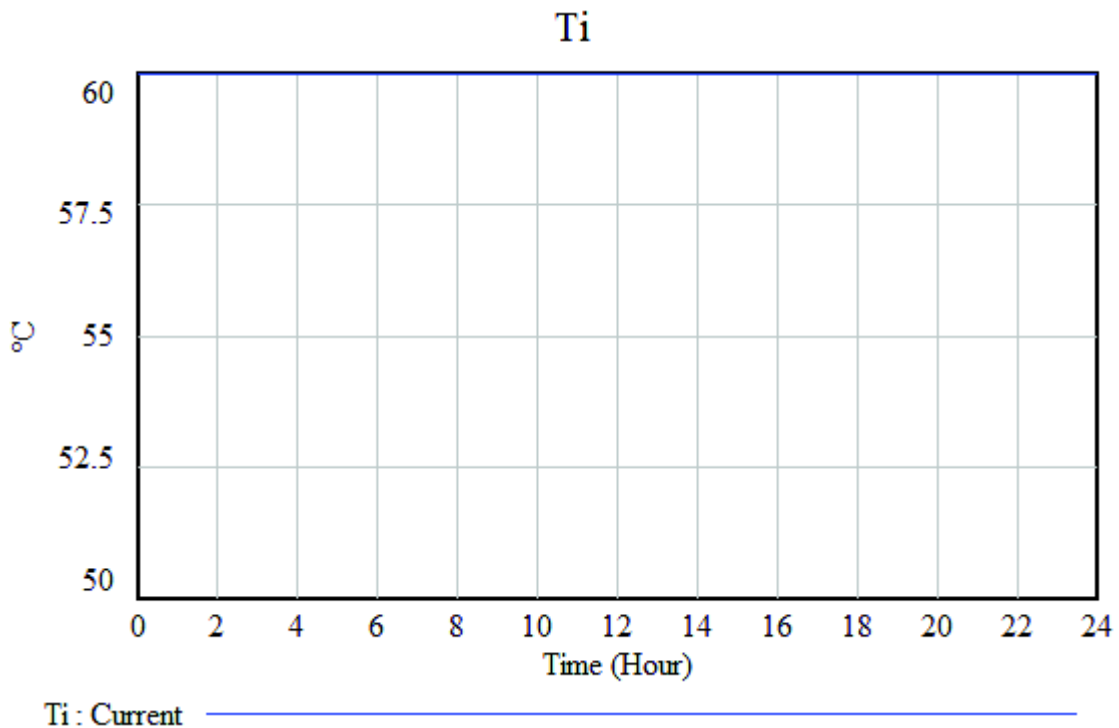


Figura 37. Temperatura teórica a la salida del calefón / ingreso a los servicios (Propia).

Graph Lookup - Ti

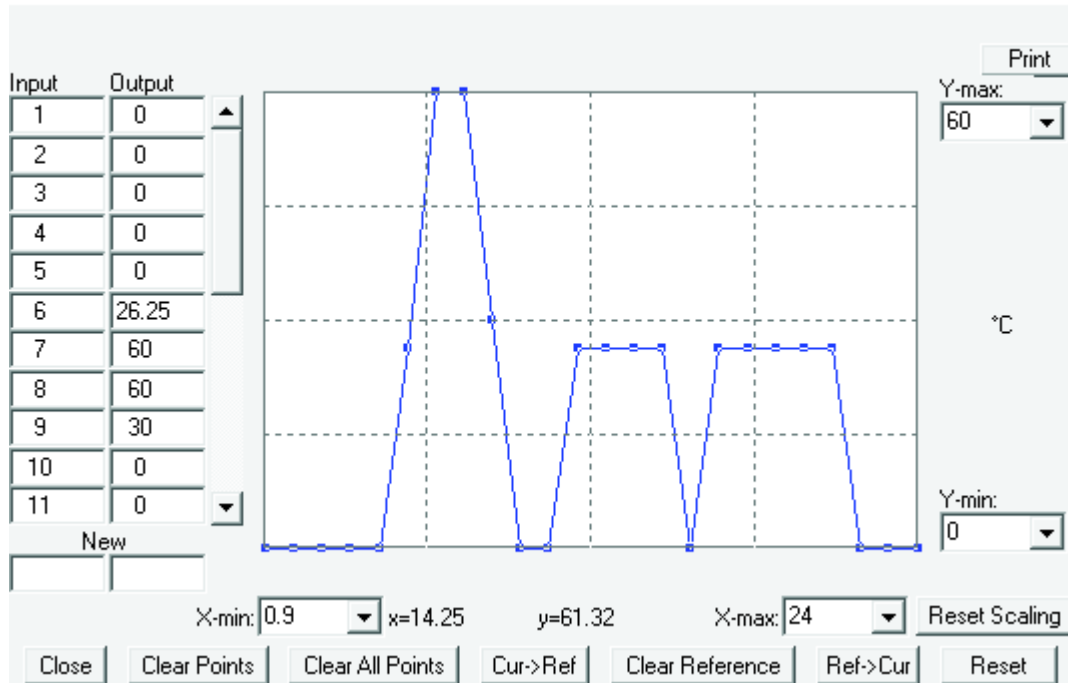


Figura 38. Temperatura real a la salida del calefón / ingreso a los servicios (Propia).

5. T_o = Temperatura de salida después de que el agua ha pasado por cada servicio

Esta temperatura inicialmente se la definió constante e igual al valor de 40 °C bajo la estimación que en cada servicio cierta cantidad de calor se disipa o se pierde en el transporte. Bajo las condiciones reales, esto no es tan cierto, ya que no todos los servicios manejan una temperatura igual como se detalló anteriormente. Al variar la temperatura en la entrada de cada servicio, es claro entender que la temperatura a la salida después de cada servicio también va a variar y en correlación con la temperatura T_i . Para efectos de este estudio se asumirá que después de cada uso el agua pierde un 25% de su energía, ya sea por disipación, convección o contacto. Se puede observar esta variación en la siguiente figura 39.

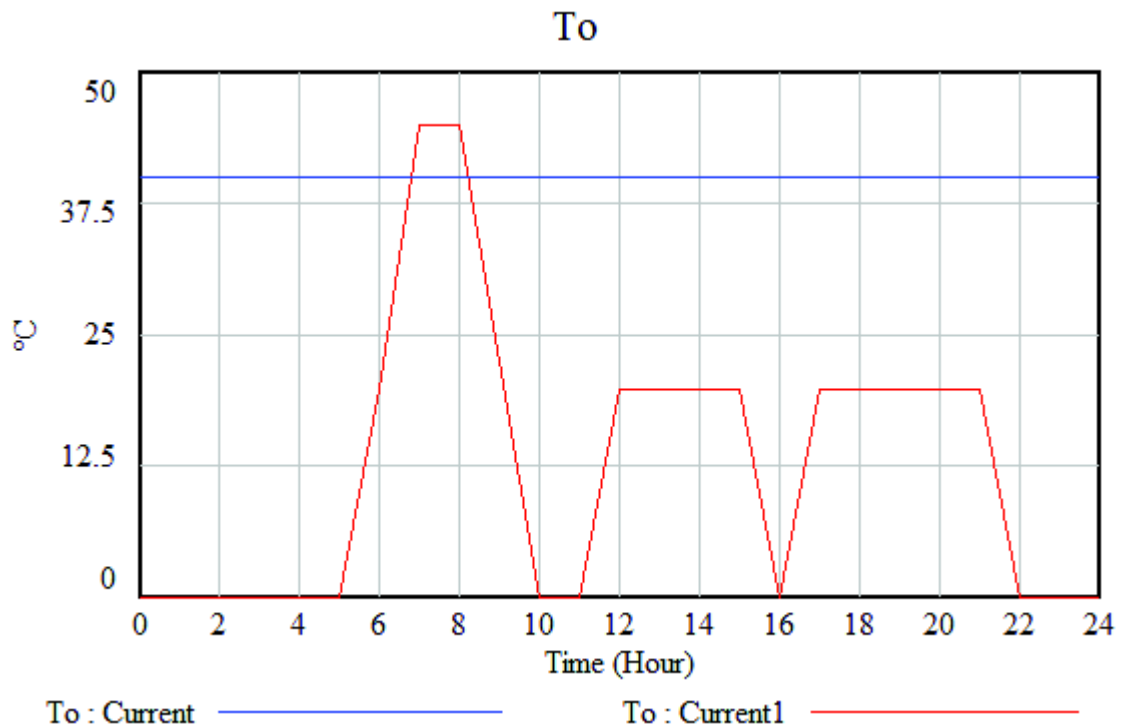


Figura 39. Variación de la temperatura teórico-real de To (Propia).

6. $Q_{rec (punto)}$ = Velocidad de transferencia de calor en el recuperador

Al variar el T_i y el T_o bajo condiciones más reales, es importante notar el cambio drástico en la gráfica con la cual el intercambiador de calor aporta al sistema para lograr que el agua se precaliente. Esto indica que en el momento crítico de utilización del sistema el recuperador alcanza su máximo potencial para que el agua gane calor y llegue a la temperatura de trabajo ideal, el resto de usos al no alcanzar una temperatura muy elevada ya que son usos en los cuales el tiempo de utilización es mucho más corto no aportan significativamente al precalentamiento del agua lo cual es lógico y verdadero, se puede observar más claramente esta variación en la figura 40.

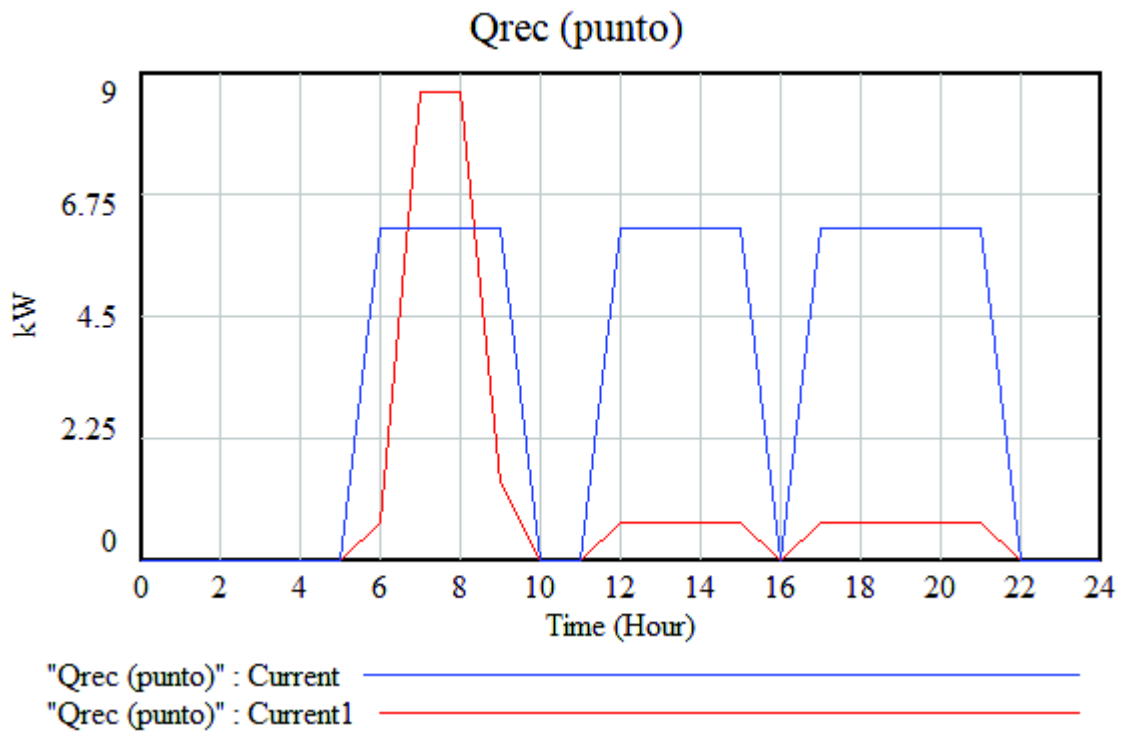


Figura 40. Variación teórico-real de la velocidad de transferencia de calor en el recuperador (Propia).

7. Q_{total} = Calor total que el sistema requiere para elevar la temperatura del agua acorde a cada servicio que se vaya a utilizar

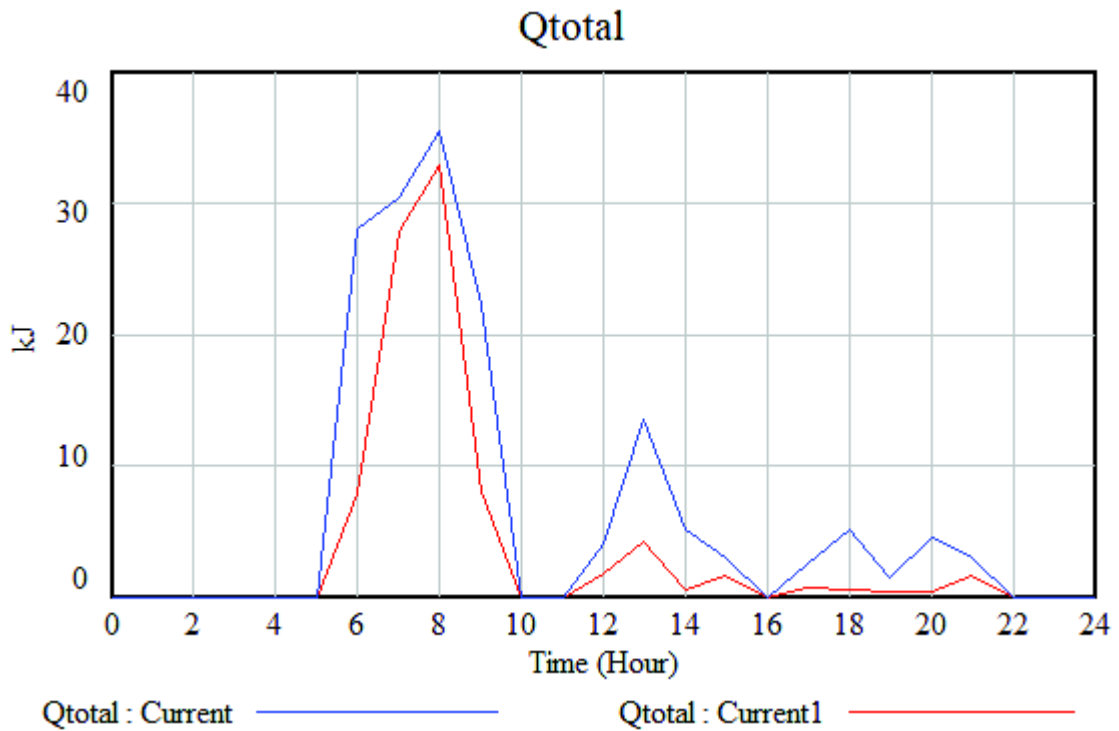


Figura 41. Calor total requerido por el sistema (Propia).

Como se observa en la figura 41, el calor que se requiere para precalentar el agua a la temperatura de uso de cada servicio bajo condiciones más reales es menor que la teórica calculada inicialmente. Esto demuestra que el sistema realiza el ahorro que se planteaba como objetivo principal del estudio.

8. MASA DE GLP = Cantidad de GLP que se utilizará para calentar el agua sanitaria según el requerimiento

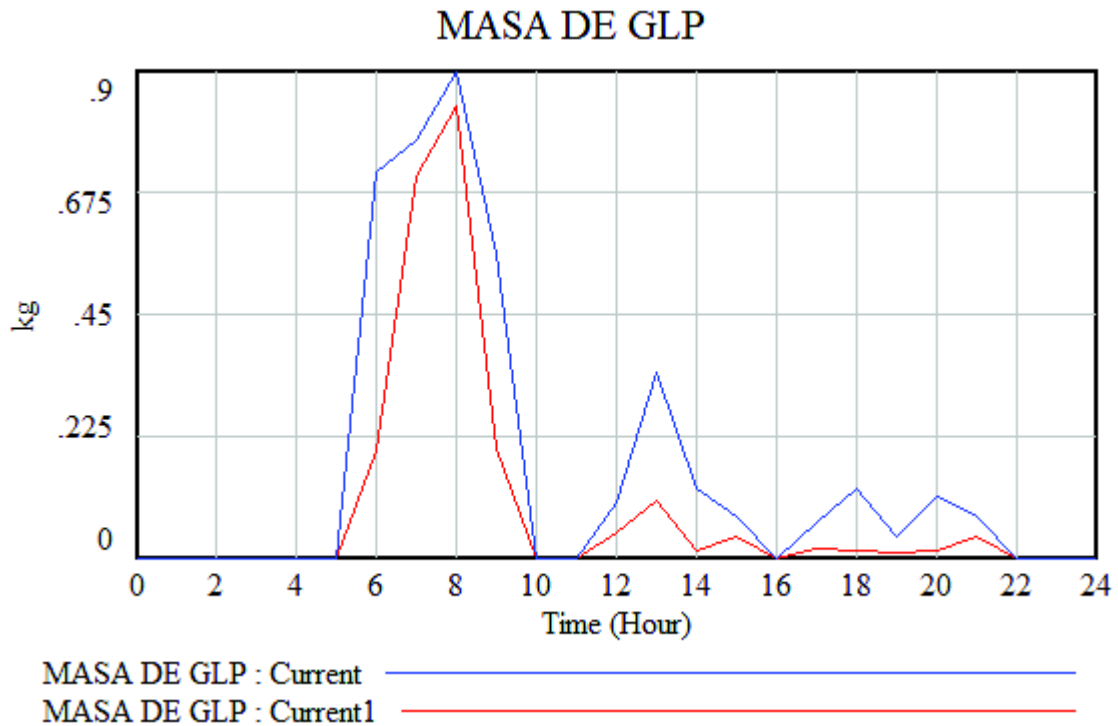


Figura 42. Variación teórico-real de la cantidad de GLP que se ahorra al implementar el sistema de recuperación de calor para precalentar el agua (Propia).

Como se puede observar en la figura 42, la cantidad de GLP necesario para calentar el agua se ha reducido importantemente desde el escenario inicial del sistema sin recuperador (Current) hasta llegar a la curva del sistema con recuperador bajo condiciones reales (Current1) gracias al sistema de precalentamiento de agua propuesto en este estudio.

9. DINERO = Cantidad de dinero que le cuesta al hogar cuando va a utilizar el sistema de calentamiento de agua sanitaria

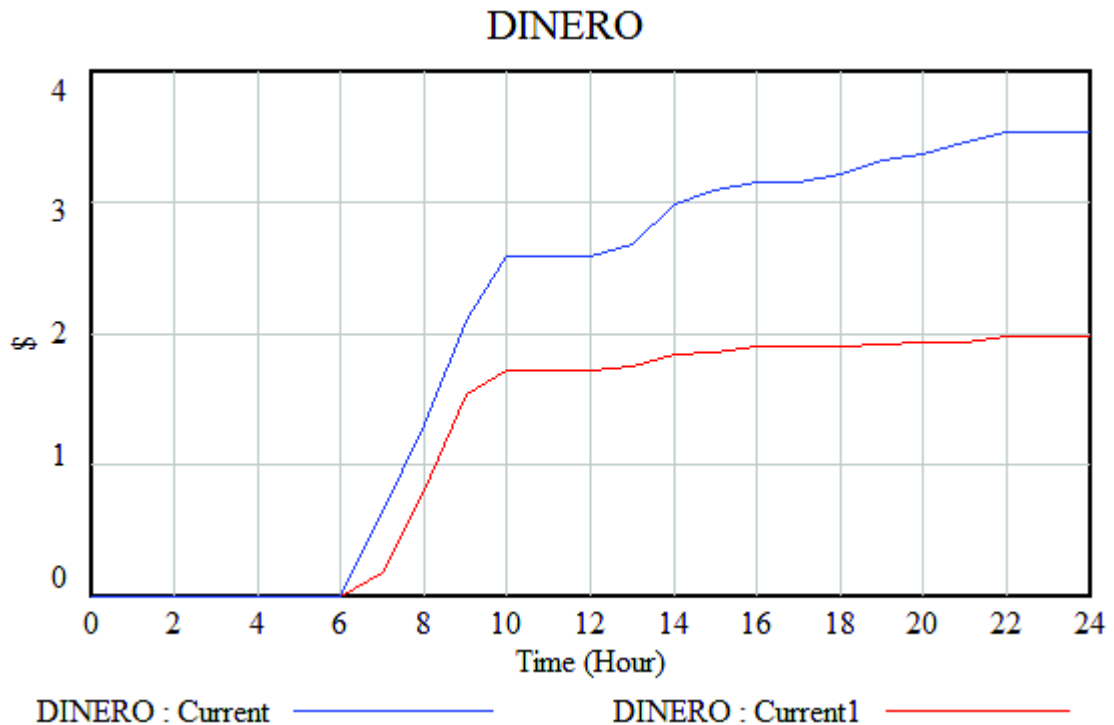


Figura 43. Ahorro de dinero al implementar el sistema de precalentamiento de agua (Propia).

Como se puede observar en la figura 43, el ahorro de dinero es significativo. Inicialmente el cálculo teórico de cómo se encuentran actualmente la situación apuntaba a que el costo por cilindro de GLP recaer en \$4.61. El valor pasa a un valor de \$3.53 con el sistema con recuperador con temperaturas constantes y por último al valor de \$1.97 con el sistema con recuperador bajo condiciones apegadas a la realidad. Por lo que es un ahorro mayor al estimado en la parte teórica en los cálculos.

Análisis económico

Con el valor del VAN en \$1580.21, y el TIR en 34%, el sistema es económicamente viable y puede ser interesante invertir en estos sistemas en un futuro en la ciudad de Quito.

Con el tiempo de recuperación de la inversión de 2.8 años, el estudio tiene una muy buena proyección a corto y mediano plazo.

4. CONCLUSIONES

- En la simulación del sistema se pudo evidenciar el ahorro tanto en el recurso (GLP) como en dinero, con lo cual se cumplió con el objetivo principal del estudio. Inicialmente el cálculo teórico de cómo se encuentran actualmente la situación apuntaba a que el costo por cilindro de GLP recae en \$4.61. El valor pasa a un valor de \$3.53 con el sistema con recuperador con temperaturas constantes y por último al valor de \$1.97 con el sistema con recuperador bajo condiciones reales. Por lo que es un ahorro mayor al estimado en la parte teórica en los cálculos.
- El calefón con el sistema de recuperación aporta solamente con el 55% de la energía necesaria en el punto pico de consumo.
- Se cuantificó el potencial energético de cada elemento constitutivo del sistema de ACS, con lo cual se creó un perfil de consumo diario apegado a la realidad en donde al sumar el consumo de cada uso dio como resultado un perfil total en cuanto a la masa de agua que se utiliza en el sistema.
- Al tener flujo turbulento entre los fluidos caliente y frío y tener una pared delgada de cobre entre ellos, es decir, los materiales y diseño buscan asegurar la máxima transferencia de calor y eficiencia posible por parte del sistema de pre-calentamiento de agua para lograr el mayor aporte de calor al sistema de ACS de la vivienda.
- Mediante varias iteraciones se logró tener el dimensionamiento más conveniente del recuperador en cuanto a longitud, tamaño, materiales y forma.
- Realizando el análisis económico del sistema por medio de los tres métodos (VAN, TIR y tiempo de recuperación de la inversión) se determinó que la inversión se recupera en un intervalo de tiempo de 2.8 años, lo cual es bastante aceptable con un TIR de 34%. Por tanto, se concluye que el estudio es rentable y además, comparando la vida útil del sistema contra la inversión es completamente beneficioso para la economía de los hogares quiteños ya que después de la recuperación de la inversión en 3 años el resto será ganancia-ahorro neta.

Referencias Bibliográficas

- Anaya, A., Cauich, G., Funabazama, O., & Gracia, V. (2014). *Evaluación de ecuaciones de factor de fricción explícito para tuberías*. México D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Andes, A. (01 de 09 de 2011). *La República*. Obtenido de <http://www.larepublica.ec/blog/sociedad/2011/09/01/segun-los-resultados-del-censo-en-ecuador-hay-14483-499-de-habitantes/>
- Arnell, M., Lundin, E., & Jeppsson, U. (2017). Sustainability Analysis for Wastewater Heat Recovery. *HAVA*, 42.
- Banco Central del Ecuador. (03 de 2018). *Tasas de interés*. Obtenido de <https://contenido.bce.fin.ec/docs.php?path=/documentos/Estadisticas/SectorMonFin/TasasInteres/Indexe.htm>
- Castells, X. (2012). *Tratamiento y Valorización Energética de Residuos*. Madrid: Ediciones Diaz de Santos, S.A.
- Çengel, Y., & Ghajar, A. (2011). Transferencia de calor y masa. En Y. Çengel, & A. Ghajar, *Transferencia de calor y masa* (pág. 945). México: Mc Graw Hill.
- Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. (2003). *BVSDE*. Obtenido de Diseño del Sistema de Calentamiento de Agua Solar: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cosude/xix.pdf>
- CIDTA. (s.f.). <http://cidta.usal.es/>. Obtenido de <http://cidta.usal.es/http://cidta.usal.es/cursos/ETAP/modulos/libros/Caracteristicas.PDF>
- Comisión de Planificación y Nomenclatura. (2003). *Normas de Arquitectura y Urbanismo para el D.M.Q.*
- Criollo Cumbe, A. V., & Pogo Guamán, Á. M. (2011). *Diseño de un sistema dual de calentamiento de agua, por medio de energía solar y glp y diseño estructural de la cubierta para la piscina de la hostería "Los Juanes" en el cantón Santa Isabel*. Cuenca.
- CSP-Today. (10 de Diciembre de 2010). <http://es.csptoday.com/>. Obtenido de <http://es.csptoday.com/http://es.csptoday.com/tecnolog%C3%ADa/almacenamiento-de-calor-las-diferentes-opciones-se-acumulan>
- DAS Experto Ambiental S.R.L. . (2018). *Intercambiador de calor especial para planta de tratamiento cloacal más eficiente*. Obtenido de <http://www.das-argentina.com.ar/downloads/intercambiador-calor-para-aguas-residuales.html>
- Dávila Moya, W., & Obando Rosero, F. (03 de 2006). *Biblioteca digital de la EPN*. Obtenido de <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/145>
- Domínguez, A. M. (2008). *Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)*. Obtenido de Bibliotecas y Archivos del CSIC: http://bvirtual.bibliotecas.csic.es/primo_library/libweb/action/display.do?tabs=detailsTab&ct

=display&fn=search&doc=csicdSPACE10261%2f7361&indx=1&reclDs=csicdSPACE10261%2f7361&reclDxs=0&elementId=0&renderMode=poppedOut&displayMode=full&frbrVersion=&frbg=&

- EPMAPS. (2016). <http://www.aguaquito.gob.ec/>. Obtenido de <http://www.aguaquito.gob.ec/>: <http://www.aguaquito.gob.ec/sistema-de-distribucion>
- Fernández-Salvador, V. (2012). *Simulación Energética de una Vivienda de Consumo Casi Nulo*. Guipúzcoa: Publicaciones DYNA SL.
- Ganapathy, V. (1982). *Applied Heat transfer*. Oklahoma: Penn Well Publishing Company.
- GENTHERM. (s.f.). Especificaciones de combustible gaseoso común para generadores termoeléctricos. *Energía donde la necesite*, 1.
- Hatt, T., Saelzer, G., Hempel, R., & Gerber, A. (2012). Alto confort interior con mínimo consumo energético a partir de la implementación del estándar "Passivhaus" en Chile. *Revista de la Construcción*.
- HUBER Technology. (2018). *Aprovechamiento del calor perdido de las aguas residuales generadas in situ - Informe práctico utilizando el ejemplo de la residencia de ancianos Hofmatt/Suiza*. Obtenido de <http://www.huber.es/es/global/huber-report/ablage-berichte/energy-from-wastewater/aprovechamiento-del-calor-perdido-de-las-aguas-residuales-generadas-in-situ-informe-practico-utilizando-el-ejemplo-de-la-residencia-de-ancianos-hofmattsuiza.html>
- Incropera, F., & DeWitt, D. (1999). *Fundamentos de Transferencia de Calor*. México: Prentice Hall.
- INEC. (2010). *CENSO DE POBLACIÓN Y VIVIENDA*. INEC.
- INEC. (2010). *CENSO DE POBLACIÓN Y VIVIENDA*. INEC.
- INEN. (2015). *Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1744*. Obtenido de http://www.normalizacion.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/07/nTE_inen_1744.pdf
- Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados. (2010). Obtenido de <https://www.aya.go.cr/centroDocumetacion/catalogoGeneral/Estimaci%C3%B3n%20de%20consumo%20de%20agua%20potable%20en%20una%20casa.pdf>
- Instituto Espacial Ecuatoriano (IEE). (01 de 2014). *Generación de Geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1:25000*. Obtenido de app.sni.gob.ec/sni-link/sni/PDOT/.../QUITO/.../mt_quito_socioeconomico.doc
- KISENSE. (2016). *El futuro es el gas*. Obtenido de <http://www.eurocalefon.com/calefones.html>
- Known. (16 de 06 de 2017). Obtenido de <https://knowi.es/las-claves-para-la-ducha-perfecta/>
- Martin G., C. (20 de 01 de 2016). *TodoDermo*. Obtenido de La temperatura ideal del agua en la ducha, entre 25 y 30 grados: <http://www.correofarmaceutico.com/tododermo/cuidados-de-la-piel/la-temperatura-ideal-del-agua-de-la-ducha-entre-25-y-30-grados>

- Martínez, Á. Y. (29 de 06 de 2012). *Interempresas*. Obtenido de CTC y los materiales con cambio de fase: gestión térmica eficiente: http://www.interempresas.net/Componentes_Mecanicos/Articulos/98083-CTC-y-los-materiales-con-cambio-de-fase-gestion-termica-eficiente.html
- MediaTrends. (2015). *¿Qué tipo de lavadora te conviene más?* Obtenido de <https://www.mediatrends.es/a/35427/lavadora-5-tipos/>
- MEER. (21 de 08 de 2015). *SlidePlayer*. Obtenido de <http://slideplayer.es/slide/6128255/>
- Metcalf & Eddy, Inc. (1995). *Ingeniería de aguas residuales*. Mc Graw Hill. Obtenido de Propiedades físicas del agua: <http://www.miliarium.com/Paginas/Prontu/Tablas/Aguas/PropiedadesFisicasAgua.htm>
- MICSE. (2015). Balance Energético Nacional. En MCSE, *Balance Energético Nacional* (pág. 79). Quito: Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos.
- Ministerio de Defensa Nacional. (2013). *Atlas Geográfico de la República del Ecuador*.
- Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda. (2011). *Norma Hidrosanitaria NHE Agua*. Quito.
- Mírez, J. (2012). *SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGIA*. Puno: XIX Simposio Peruano de Energía Solar y del Ambiente (XIX- SPES).
- MSSSI. (s.f.). *Sistemas de agua caliente sanitaria*. Obtenido de https://www.msssi.gob.es/ciudadanos/saludAmbLaboral/agenBiologicos/pdfs/3_leg.pdf
- ONU. (2015). Convención Marco sobre el Cambio Climático. Plataforma de Durban para una Acción Reforzada. *Plataforma de Durban para una Acción Reforzada*, (pág. 40). París.
- ONU. (11 de 05 de 2016). *ONU Cambio Climático Noticias*. Obtenido de Los países de la OCDE desligan aumento de la energía y emisiones de CO2: <http://newsroom.unfccc.int/es/noticias/los-paises-de-la-ocde-desligan-aumento-de-la-energia-y-emisiones-de-co2/>
- Organización Mundial de la Salud. (2014). *Cadena Ser*. Obtenido de http://cadenaser.com/ser/2014/01/20/sociedad/1390187610_850215.html
- Salud, B. (s.f.). *Buena Salud*. Obtenido de <http://www.revistabuenasalud.com/ducha-diaria-que-temperatura-es-la-adecuada/>
- Servicio Ecuatoriano de Normalización. (2014). *RTE INEN 109*. Obtenido de <http://www.normalizacion.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2014/08/RTE-109.pdf>
- Silva Vargas, S. (10 de 2009). USO EFICIENTE DE LA ENERGÍA EN VIVIENDAS. APLICACIONES EN CALEFACCIÓN, CALENTAMIENTO DE AGUAS SANITARIAS Y AISLACIÓN DE LA EVOLVENTE. Santiago de Chile, Chile.
- SISS. (s.f.). *Inodoros o WC*. Obtenido de <http://www.siss.gob.cl/577/w3-article-8619.html>
- SISS. (s.f.). *Presión de agua potable*. Obtenido de <http://www.siss.gob.cl/577/w3-article-8619.html>

- SiSS. (s.f.). *Manual para el consumo responsable de agua potable*. Obtenido de http://www.siss.gob.cl/586/articles-9103_recurso_1.pdf
- Spriet, J., & Hendrick, P. (2017). Wastewater as a Heat Spurce for Individual Residence Heating. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, 19.
- Subsecretaría de Hábitat y Asentamientos Humanos (SHAH). (12 de 2015). *Hábitat y Vivienda*. Obtenido de https://www.habitatyvivienda.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2017/05/Informe-Pais-Ecuador-Enero-2016_vf.pdf
- Trebol-a. (24 de 07 de 2009). *Consumo de agua al fregar*. Obtenido de <http://www.trebol-a.com/2009/07/24/consumo-de-agua-al-fregar/>
- twenergy. (18 de 12 de 2012). *¿Cuánta agua consumimos en un hogar?* Obtenido de <http://twenergy.com/a/cuanta-agua-consumimos-en-un-hogar-725>
- UCLM. (s.f.). *UCLM*. Obtenido de https://previa.uclm.es/area/ing_rural/Hidraulica/Temas/TablaRugosidadAbsolutaMateriales.pdf
- Universidad Carlos II de Madrid. (10 de 2010). *Universidad Carlos II de Madrid*. Obtenido de https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/10795/PFC_Alfredo_Rodriguez_deVicente.pdf;jsessionid=C2A3943360364DF01940283E21177239?sequence=1
- Universidad de Granada. (21 de 10 de 2016). *Diseño de tanques de almacenamiento*. Obtenido de http://www.ugr.es/~aulavirtualpfc/qi/descargas/documentos/Disenio_Tanques_Almacenamiento.pdf
- Valiente B., A. (09 de 2015). *Intercambiadores de doble tubo*. Obtenido de Wordpress: <https://librosdrvaliente.files.wordpress.com/2015/09/capc3adtulo-2-cambiadores-de-doble-tubo.pdf>
- WHA. (2010). <http://www.worldhabitatawards.org/>. Obtenido de [https://www.bshf.org/es/premios-mundiales-del-habitat/ganadores-y-finalistas/viviendas-ahorradoras-de-energia-y-pasivas-en-ljubljana/](http://www.worldhabitatawards.org/https://www.bshf.org/es/premios-mundiales-del-habitat/ganadores-y-finalistas/viviendas-ahorradoras-de-energia-y-pasivas-en-ljubljana/)
- Wong, L., Mui, K., & Guan, Y. (2010). Shower water heat recovery in high-rise residential buildings of Hong Kong. *Applied Energy*, 7.
- Çengel, Y., & Ghajar, A. (2011). *Transferencia de Calor y Masa*. México D.F.: McGraw Hill.

Anexos

ANEXO A: Situación de los Servicios Básicos según área rural y urbana en Quito (Instituto Espacial Ecuatoriano (IEE), 2014).

CATEGORIA	CANTÓN		URBANO		RURAL	
	Caso	%	Caso	%	Caso	%
SERVICIO DE AGUA						
De red pública	609387	96,03%	455320	98,13%	154067	90,29%
De pozo	4245	0,67%	2188	0,47%	2057	1,21%
De río, vertiente, acequia o canal	16771	2,64%	4621	1,00%	12150	7,12%
De carro repartidor	1339	0,21%	586	0,13%	753	0,44%
Otro (Agua lluvia/albarrada)	2869	0,45%	1266	0,27%	1603	0,94%
Total	634611	100,00%	463981	100,00%	170630	100,00%
ELIMINACIÓN DE EXCRETAS						
Conectado a red pública de alcantarillado	576955	90,91%	448405	96,64%	128550	75,34%
Conectado a pozo séptico	31728	5,00%	7641	1,65%	24087	14,12%
Conectado a pozo ciego	10131	1,60%	2856	0,62%	7275	4,26%
Con descarga directa al mar, río, lago o quebrada	10031	1,58%	3635	0,78%	6396	3,75%
Letrina	942	0,15%	325	0,07%	617	0,36%
No tiene	4824	0,76%	1119	0,24%	3705	2,17%
Total	634611	100,00%	463981	100,00%	170630	100,00%
SERVICIO ELECTRICO EN LA VIVIENDA						
Si Tiene	631739	99,55%	462806	99,75%	168933	99,01%
No Tiene	2872	0,45%	1175	0,25%	1697	0,99%
Total	634611	100,00%	463981	100,00%	170630	100,00%

ANEXO B: Capacidad volumétrica y eficiencia de los calentadores de agua según el tipo (Servicio Ecuatoriano de Normalización, 2014).

Eficiencia Térmica (%)		
Tipo de calentador	Volumen (L)	Eficiencia
Almacenamiento (calderas y termo-tanques)	1 – 40	76
	40 – 62	77
	62 – 106	79
	106 – 400	82
Instantáneo (calefones)		84

ANEXO C: Características de los intercambiadores de calor (González Mendizabal, 2002).

Tipo	Características constructivas	Aplicaciones
Tubo y coraza	Haz de tubos de una carcasa cilíndrica, con presencia de deflectores para generar turbulencia y soportar los tubos. El arreglo de tubos es paralelo al eje longitudinal de la carcasa y puede estar fijo o ser de cabezal flotante. Tubos internos lisos a aleteados.	Multiuso. Prácticamente se amolda a cualquier servicio, por lo general es el primer intercambiador de calor que se considera en una determinada aplicación.
Doble tubo	Dos tubos concéntricos en forma de "U" u horquilla. El tubo interno puede ser liso o poseer aletas.	Se utilizan cuando se requieren áreas de transferencia de calor pequeñas (9.3 a 18.6 m ²). Son muy útiles en operaciones a altas presiones.
Láminas empacas: PHE con empacaduras	Serie de láminas corrugadas separadas entre sí por empacaduras.	Muy utilizado en la industria alimenticia, sobre todo con fluidos viscosos. Cuando se requieren condiciones sanitarias extremas.
Láminas empacas: PHE con empacaduras	Serie de láminas corrugadas separadas entre sí y soldadas en sus bordes.	Manejo de fluidos viscosos y sobretodo peligrosos o a altas presiones.
Espiral (SHE)	Láminas metálicas enrolladas una sobre la otra en forma de espiral.	No presentan problemas de expansión diferencial. Muy empleados en servicios criogénicos y cuando se manejan fluidos muy viscosos, lodos o líquidos con sólidos en suspensión (industria de papel)

ANEXO D: Intervalos de operación para los intercambiadores de calor más comunes (González Mendizabal, 2002).

Tipo	Temperatura máxima de operación (°C)	Presión máxima de operación (kPa)	Superficie de intercambio de calor (m ²)	Observaciones
Tubo y carcaza	-200 a 700	35000	5 a 1000	Versátil. Se usa para casi cualquier aplicación, independientemente de la tarea a realizar, temperatura y presión. Limitaciones de tipo metalúrgico.
PHE con empacaduras	-40 a 180	3000	1 a 1200	Alta eficiencia térmica, flexible, bajo ensuciamiento, compacto, bajo peso, sin vibración, fácil mantenimiento. El material de la empacadura puede limitar el tipo de fluido de trabajo. Usualmente es la unidad más barata para unas condiciones de operación dadas.
PHE sin empacaduras	-200 a 980 (dependiendo del tipo)	35000	Hasta 10000	Es una alternativa a los intercambiadores de tubo y coraza y los PHE sin empacaduras, siempre y cuando se pueda realizar una

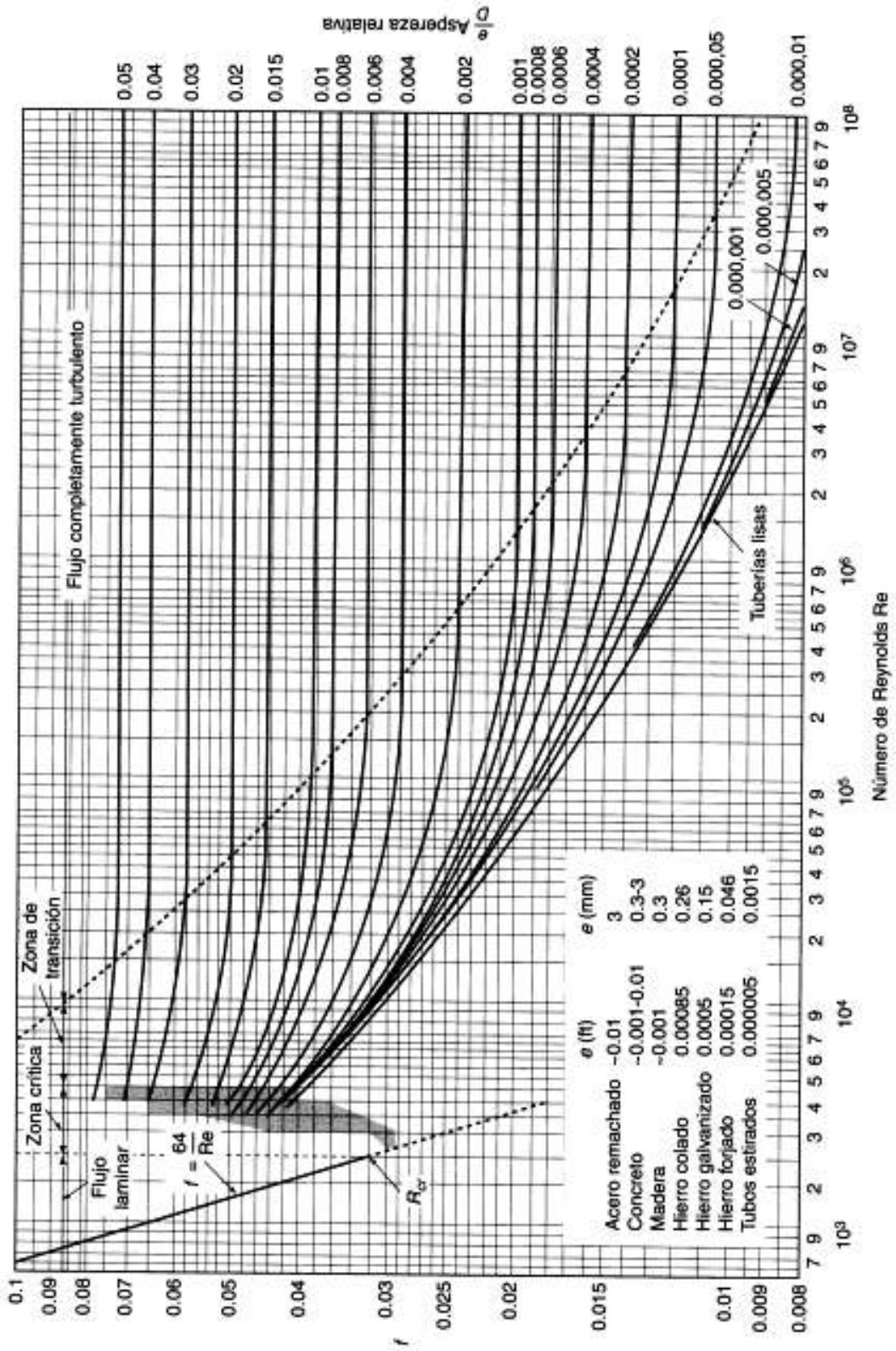
				limpieza química sin dificultad. Su uso está limitado por la diferencia de presión entre los dos fluidos (entre 4000 – 8000 KPa, dependiendo del tipo del fluido).
SHE	400	20	0.5 a 350	Alta eficiencia térmica, bajo ensuciamiento, fácil mantenimiento. Puede manejar suspensiones, barros y líquidos fibrosos.

ANEXO E: Comparación entre los intercambiadores de calor más comunes (González Mendizabal, 2002).

Aspecto a comparar	tubo y coraza	PHE	SHE
Respuesta en operaciones líquido-líquido	Altos coeficientes globales de transferencia de calor para $Re > 2100$	Altos coeficientes globales de calor para $Re > 10$.	
Resistencia	Alta	Baja	Media
Área de transferencia de calor	Grande	Muy grande	Mediana
Costos básicos	Altos	Bajos	Altos
Mantenimiento	Difícil de inspeccionar, limpieza química muy buena por la carcasa y aceptable o pobre para los tubos. Limpieza mecánica prácticamente imposible. Reparaciones aceptables.	Completamente accesible para inspección, limpieza química y manual. Fácil reemplazo de todas sus partes.	La inspección varía de buena a pobre. Limpieza química muy buena. Limpieza mecánica varía de buena a pobre. Reparación pobre.
Limitaciones de espacio y peso (para la misma operación)	Requiere de un espacio considerable y además un espacio	Ligeras y ocupan poco espacio. No requieren de espacio adicional para mantenimiento.	Ligeras y ocupan menos espacio que el de tubo y coraza.

	amplio para mantenimiento.		
Diferencia de temperaturas mínima entre los tubos	Hasta 5 °C	Hasta 1 °C	No especificado
Temperatura de operación	No tiene restricciones específicas.	32 a 66 °C usando empacaduras de caucho.	No tiene restricciones específicas.
Caída de presión (a velocidad promedio y longitud de flujo comparables)	Baja.	Alta (hasta 100 veces mayor que la de tubo y coraza).	Media.
Niveles de presión	Dependiendo del diseño.	Generalmente de 0.1 a 1.6 MPa, pudiendo llegar hasta 2.5 MPa.	Alrededor de 2 MPa.
Aplicaciones	<p>Intercambio de calor líquido-líquido.</p> <p>Calentamiento de vapores.</p> <p>Condensación.</p>	<p>Intercambio de calor líquido-líquido.</p> <p>Calentamiento de vapores a baja presión (menores a 450 KPa).</p> <p>Plantas de enfriamiento en corrientes de procesos.</p> <p>Operación con fluidos muy corrosivos, de cualquier viscosidad o ensuciamiento medio. Para expansiones programadas.</p>	<p>Intercambio de calor en gases a altas temperaturas.</p> <p>Re hervidores.</p> <p>Condensadores.</p> <p>Bajas presiones (menos de 1100 KPa).</p> <p>Opera con fluidos de cualquier viscosidad y fluidos muy sucios.</p>

ANEXO F: Diagrama de Moody (Gonzalo).



ANEXO G: Programación

(01) "\$ / kg GLP"=

0.88

Units: \$/kg GLP

(02) Aalm=

0.0998

Units: m²

(03) "Ahorro %"=

0.25

Units: Porcentaje

(04) Arec=

0.176

Units: m²

(05) Cp=

4.186

Units: kJ/kg*°C

(06) "D hydr."=

0.0127

Units: m

(07) DENSIDAD DE AGUA=

1000

Units: kg/m³

(08) Dh=

0.0127

Units: m

(09) DINERO= INTEG (

MASA DE GLP*\$ / kg GLP",

0)

Units: **undefined**

(10) Ducha(

[(0,0)-(24,200)],(0,0),(1,0),(2,0),(3,0),(4,0),(5,0),(6,0),(7,190),(8,190),
(9,0),(10,0),(11,0),(12,0),(13,0),(14,0),(15,0),(16,0),(17,0),(18,0),(19,0),
(20,0),(21,0),(22,0),(23,0),(24,0))

Units: lt/h

(11) e alm=

0.001

Units: m

(12) FINAL TIME = 24

Units: Hour

The final time for the simulation.

(13) Fregadero(

[(0,0)-(24,60)],(1,0),(2,0),(3,0),(4,0),(5,0),(6,13.4),(7,0),(8,26.8),(9,0),
(10,0),(11,0),(12,53.6),(13,0),(14,26.8),(15,0),(16,0),(17,13.4),(18,26.8),
(19,0),(20,0),(21,0),(22,0),(23,0),(24,0))

Units: lt/h

(14) halm = WITH LOOKUP (

Talm,

[(0,0)-(60,300)],(0.01,0.001),(5,21.02),(10,42.022),(15,62.982),(20,83.915),
(25,104.83),(30,125.74),(35,146.64),(40,167.53),(45,188.44),(50,209.34),
(55,230.26),(60,251.18))

Units: W/(m2*°C)

(15) hf=

Nuf*(Kf/"D hidr.")

Units: W/(m2*°C)

(16) hh=

Nuh*(Kh/Dh)

Units: W/(°C*m2)

(17) HHV GLP=

49.3

Units: kJ/kg

(18) hinfinito=

20

Units: W/(m²*°C)

(19) INITIAL TIME = 0

Units: Hour

The initial time for the simulation.

(20) Kalm=

13.4

Units: W/(m*°C)

(21) Kf=

0.606

Units: W/(°C*m)

(22) Kh=

0.628

Units: W/(m*°C)

(23) Lavabo(

[(0,0)-(24,200)],(1,0),(2,0),(3,0),(4,0),(5,0),(6,168),(7,4),(8,4),(9,0),
(10,0),(11,0),(12,0),(13,104),(14,0),(15,48),(16,0),(17,0),(18,0),(19,8),(
20,24),(21,48),(22,0),(23,0),(24,0))

Units: lt/h

(24) Lavadora(

[(0,0)-(24,200)],(1,0),(2,0),(3,0),(4,0),(5,0),(6,0),(7,0),(8,0),(9,150),
(10,0),(11,0),(12,0),(13,0),(14,0),(15,0),(16,0),(17,0),(18,0),(19,0),(20,
0),(21,0),(22,0),(23,0),(24,0))

Units: lt/h

(25) LMTD=

IF THEN ELSE(To-T'ent<0,0.001 , To-T'ent)

Units: °C

(26) "m (punto)"=

0.134

Units: kg/s

(27) MASA DE AGUA=

(Ducha(Time)+Fregadero(Time)+Lavabo(Time)+Lavadora(Time))/DENSIDAD DE

AGUA

Units: m3

(28) MASA DE GLP=

Qtotal/(HHV GLP*n cal)

Units: kg

(29) n cal=

0.8

Units: **undefined**

(30) Nuf=

0.023*(Ref^(4/5))*(Prf^(0.4))

Units: Dmnl

(31) Nuh=

0.023*(Reh^(4/5))*(Prh^(0.4))

Units: Dmnl

(32) Prf=

6.62

Units: Dmnl

(33) Prh=

4.62

Units: Dmnl

(34) "Q'ent (punto)"=

"Qent (punto)"-"Qent (punto)"**"Ahorro %")

Units: kW

(35) Qalm=

"Qalm (punto)"*Time

Units: **undefined**

(36) "Qalm (punto)"=

"Qrec (punto)"-"Qperdidas (punto)"

Units: kW

(37) "Qent (punto)"=

IF THEN ELSE("m (punto)"*Cp*(Ti-Tent)<0,0,"m (punto)"*Cp*(Ti-Tent))

Units: kW

(38) "Qperdidas (punto)"=

IF THEN ELSE(IF THEN ELSE(MASA DE AGUA=0,((Talm-Tinfinito)/((1/(halm*Aalm)))+(e alm/(Kalm*Aalm))+1/(hinfinito*Aalm))))*3.6,0)<0,0,IF THEN ELSE(MASA DE AGUA =0,((Talm-Tinfinito)/((1/(halm*Aalm)))+(e alm/(Kalm*Aalm))+1/(hinfinito*Aalm)))*3.6,0))

Units: kW

(39) Qrec=

("Qrec (punto)"*Time)

Units: kJ

(40) "Qrec (punto)"=

IF THEN ELSE(MASA DE AGUA=0, 0, (U*Arec*LMTD)/1000)

Units: kW

(41) "Qrec (punto)1"=

"Qent (punto)"-"Q'ent (punto)"

Units: kW

(42) Qtotal=

IF THEN ELSE(MASA DE AGUA=0, 0, IF THEN ELSE("Qalm (punto)">MASA DE AGUA

Cp(Ti-Tent), MASA DE AGUA*Cp*(Ti-Tent),(MASA DE AGUA*Cp*(Ti-Tent))- "Qalm (punto)"
))

Units: kJ

(43) Ref=

$(4 \cdot m \text{ (punto)}) / (3.14159 \cdot (D \text{ hidr.}) \cdot v \text{f est})$

Units: Dmnl

(44) Reh=

$(4 \cdot m \text{ (punto)}) / (3.14159 \cdot (Dh) \cdot v \text{h est})$

Units: Dmnl

(45) SAVEPER =

TIME STEP

Units: Hour [0,?]

The frequency with which output is stored.

(46) T'ent=

IF THEN ELSE(Ti-("Q'ent (punto)"/("m (punto)"*Cp))<15,15.001,Ti-("Q'ent (punto)"
/("m (punto)"*Cp)))

Units: °C

(47) Talm=

T'ent

Units: °C

(48) Tent=

15

Units: °C

(49) Tf prom=

$(Tent + T'ent) / 2$

Units: °C

(50) Th prom=

$(To + Tsal) / 2$

Units: °C

(51) $T_i =$

60

Units: °C

(52) TIME STEP = 1

Units: Hour [0,?]

The time step for the simulation.

(53) $T_{infinite} =$

15

Units: °C

(54) $T_o =$

40

Units: °C

(55) $T_{sal} =$

IF THEN ELSE($T_o - ("Q_{rec} \text{ (punto)} / ("m \text{ (punto)} * C_p)) < 15, 15, T_o - ("Q_{rec} \text{ (punto)} / ("m \text{ (punto)} * C_p))$)

Units: °C

(56) $U =$

$1 / ((1/h_f) + (1/h_h))$

Units: W/m²*°C

(57) $v_f \text{ est} = \text{WITH LOOKUP (}$

$T_f \text{ prom,}$

$(([5,0)-(50,0.002]),(5,0.001519),(10,0.001307),(15,0.001138),(20,0.001002),$
 $(20.625,0.000988125),(25,0.000891),(30,0.000798),(35,0.00072),(40,0.000653)$
 $),(45,0.000596),(50,0.000547))$

Units: s*N/m²

(58) $v_h \text{ est} = \text{WITH LOOKUP (}$

$T_h \text{ prom,}$

$(([5,0)-(50,0.002]),(5,0.001519),(10,0.001307),(15,0.001138),(20,0.001002),$
 $(25,0.000891),(30,0.000798),(34.375,0.00072975),(35,0.00072),(40,0.000653)$
 $),(45,0.000596),(50,0.000547))$

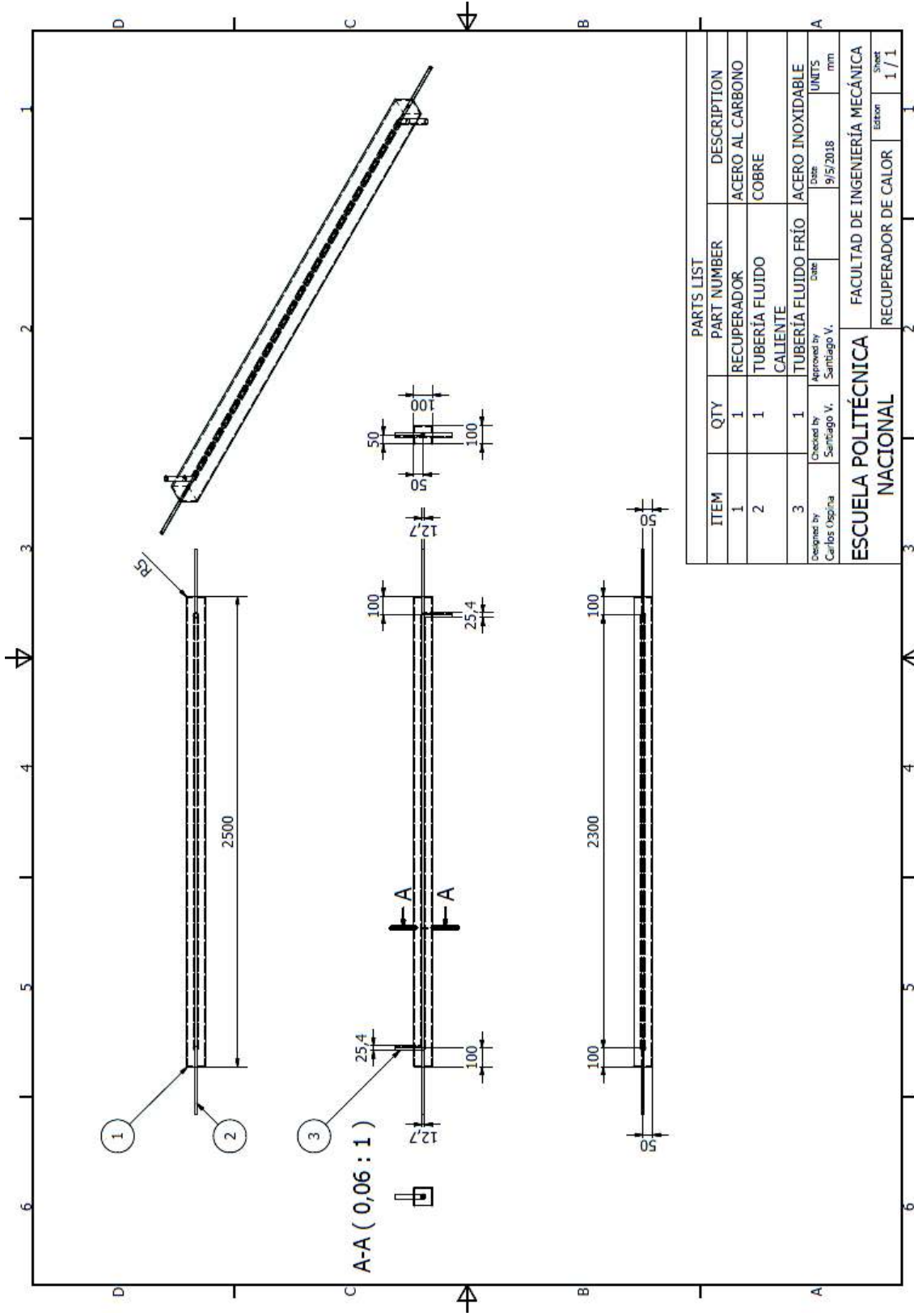
Units: (N*s)/m²

(59) Volumen Agua=

MASA DE AGUA/DENSIDAD DE AGUA

Units: m³

ANEXO H: Plano intercambiador de calor



ANEXO I: Plano tanque de almacenamiento

