

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

**OPTIMIZACIÓN DE EQUIPOS TÉRMICOS Y TERMODINÁMICOS
CON ENFOQUE MECATRÓNICO**

**ANÁLISIS PARAMÉTRICO PARA OPTIMIZACIÓN DE UNA BOMBA
DE CALOR DE 5kW DE USO DOMÉSTICO**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO**

CRISTHIAN EDUARDO SISALEMA ORBE

cristhian.sisalema@epn.edu.ec

DIRECTOR: PhD. ÁLVARO GONZALO XAVIER AGUINAGA BARRAGÁN

alvaro.aguinaga@epn.edu.ec

DMQ, febrero 2022

CERTIFICACIONES

Yo, Cristhian Eduardo Sisalema Orbe declaro que el trabajo de integración curricular 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.

Cristhian Eduardo Sisalema Orbe

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por Cristhian Eduardo Sisalema Orbe, bajo mi supervisión.

PhD. Álvaro Gonzalo Xavier Aguinaga Barragán
DIRECTOR

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

Cristhian Eduardo Sisalema Orbe

PhD. Álvaro Gonzalo Xavier Aguinaga Barragán

DEDICATORIA

El presente trabajo de titulación va dedicado principalmente a Dios quien me ha bendecido por todo este trayecto universitario de mi vida y a mi madre quien es mi pilar fundamental e inspiración de lucha.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por la sabiduría y las bendiciones brindadas en todo momento.

A mi madre por su completo apoyo en todo este tiempo de estudio universitario.

A mi tutor PhD. Álvaro Aguinaga por toda la ayuda brindada a lo largo de la realización de este trabajo de titulación.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES.....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
ÍNDICE DE TABLAS.....	VII
ÍNDICE FIGURAS.....	VIII
RESUMEN	X
ABSTRACT	XI
1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO.....	1
1.1 Objetivo general	2
1.2 Objetivos específicos	2
1.3 Alcance.....	2
1.4 Marco teórico.....	3
Bomba de calor y su principio de funcionamiento	4
Componentes de la bomba de calor.....	6
Tipos de bombas de calor	8
Recurso energético solar	11
2 METODOLOGÍA.....	13
2.1 Enfoque Metodológico	13
2.2 Descripción del proceso metodológico	13
2.3 Modelo matemático cuasiestático del sistema de bomba de calor	14
Análisis termodinámico.....	15
Eficiencia energética y exergética del sistema	18
2.4 Modelo matemático dinámico en espacio de estado	20

3	RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	21
3.1	Resultados.....	21
	Datos para la simulación computacional	21
	Resultados preliminares de operación del sistema sin asistencia solar	23
	Banco de parámetros operacionales del sistema para su optimización.	26
	Análisis de sensibilidad del sistema	27
	Sistema optimizado de bomba de calor	36
3.2	Conclusiones.....	38
3.3	Recomendaciones	39
4	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	40
5	ANEXOS	41

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades termofísicas del agua y aire	22
Tabla 2. Características del termotanque	22
Tabla 3. Propiedades termofísicas del refrigerante R-134a.....	23
Tabla 4. Datos del colector solar	23
Tabla 5. Resultados del ciclo termodinámico presente en el sistema	24
Tabla 6. Potencias de los componentes del sistema bomba de calor	24
Tabla 7. Indicadores de rendimiento de la bomba de calor	24
Tabla 8. Banco de variación de parámetros	27
Tabla 9. Potencias de los componentes del sistema bomba de calor con asistencia solar	27
Tabla 10. Indicadores de rendimiento de la bomba de calor con asistencia solar	28
Tabla 11. Tiempo de calentamiento del termotanque con aislante de poliuretano expandido considerando diferentes espesores en el sistema bomba de calor	30
Tabla 12. Tiempo de calentamiento del termotanque con aislante de corcho considerando diferentes espesores en el sistema bomba de calor	31
Tabla 13. Tiempo de calentamiento del termotanque con aislante de poliuretano expandido considerando diferentes espesores en el sistema bomba de calor con asistencia solar	33
Tabla 14. Tiempo de calentamiento del termotanque con aislante de corcho considerando diferentes espesores en el sistema bomba de calor con asistencia solar	34
Tabla 15. Parámetros optimizados del sistema bomba de calor	37

ÍNDICE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de Flujos Energéticos de la Bomba de Calor.....	4
Figura 2. Diagrama T-s del ciclo ideal de refrigeración por compresión de vapor. .	5
Figura 3. Diagrama T-s del ciclo real de refrigeración por compresión de vapor. ...	6
Figura 4. Componentes de una bomba de calor	8
Figura 5. Esquema de funcionamiento de una bomba de calor geotérmica.....	9
Figura 6. Esquema de funcionamiento de una bomba de calor asistida por aire. .	10
Figura 7. Esquema de funcionamiento de una bomba de calor de expansión directa con asistencia solar	11
Figura 8. Mapa de la irradiación solar global horizontal Anual	12
Figura 9. Mapa de la irradiación solar directa normal Anual	12
Figura 10. Diagrama de flujo de la metodología	14
Figura 11. Comportamiento termodinámico de la Bomba de Calor.	25
Figura 12. Control analógico de temperatura de la Bomba de Calor.	26
Figura 13. Comportamiento termodinámico de la Bomba de Calor con Asistencia Solar.	29
Figura 14. Control analógico de temperatura de la Bomba de Calor con Asistencia Solar.	29
Figura 15. Resultados obtenidos al variar el espesor del aislante tipo poliuretano expandido del termotanque en el sistema bomba de calor.....	30
Figura 16. Resultados obtenidos al variar el espesor del aislante tipo corcho del termotanque en el sistema bomba de calor.	31
Figura 17. Resultados obtenidos al variar el espesor del aislante tipo poliuretano expandido del termotanque en el sistema bomba de calor con asistencia solar. .	33
Figura 18. Resultados obtenidos al variar el espesor del aislante tipo corcho del termotanque en el sistema bomba de calor con asistencia solar.	34
Figura 19. Resultados obtenidos del control analógico del sistema considerando las variaciones propuestas del análisis de sensibilidad.	35

Figura 20. Calentamiento inicial del termotanque para el sistema de bomba de calor optimizado.	36
Figura 21. Control analógico de temperatura del sistema de bomba de calor optimizado.	37

RESUMEN

El presente está enfocado en desarrollar una metodología de optimización mediante un enfoque mecatrónico para los sistemas de bombas de calor con aplicaciones domésticas; el caso en particular que presenta el trabajo es la provisión de agua caliente sanitaria por medio de una bomba de calor con una capacidad de 5 kW.

Fundamentalmente el trabajo parte de una revisión bibliográfica en donde se toma un mayor énfasis en el proceso termodinámico que presenta el sistema a estudiar, para luego continuar con la realización de la metodología en donde se subdivide en el análisis cuasiestático del sistema y análisis dinámico del mismo. La metodología propuesta considera la aplicación del software computacional Matlab para la optimización del sistema, considerándose que el sistema sea aplicado a condiciones termofísicas de Quito; en el proceso de optimización se consideran variables como la ausencia o presencia de asistencia solar en el evaporador, el tipo de aislante del termotanque que contiene el agua sanitaria y el tamaño del espesor del aislante.

Finalmente se obtuvieron los resultados realizando un análisis de sensibilidad considerando una variación de las variables mencionadas anteriormente, en donde el sistema de bomba de calor con asistencia solar, aislante en el termotanque de material de poliuretano expandido de espesor de 14 cm presentó una mejora considerable del 50% de factores de rendimiento de operación con relación a los datos preliminares arrojados por las condiciones iniciales que fueron consideradas para el sistema de bomba de calor.

PALABRAS CLAVE: Bomba de calor, optimización, enfoque mecatrónico, análisis de sensibilidad, rendimiento.

ABSTRACT

This paper is focused on providing optimization tools through a mechatronic approach for heat pump systems with domestic applications; the particular case presented in the work is the provision of domestic hot water by means of a heat pump with a capacity of 5 kW.

Fundamentally, the work starts with a bibliographic review where a greater emphasis is placed on the thermodynamic process of the system to be studied, and then continues with the methodology, which is subdivided into a quasi-static analysis of the system and a dynamic analysis of the same. The proposed methodology considers the application of the computational software MATLAB for the optimization of the system, considering that the system is applied to thermophysical conditions of Quito; in the optimization process variables such as the absence or presence of solar assistance in the evaporator, the type of insulation of the water heater containing the sanitary water and the size of the insulation thickness are considered.

Finally, the results were obtained by performing a sensitivity analysis considering a variation of the variables mentioned above, where the heat pump system with solar assistance, insulation in the water heater made of expanded polyurethane material with a thickness of 14 [cm] presented a considerable improvement of 50% of the operating performance factors in relation to the preliminary data yielded by the initial conditions that were considered for the heat pump system.

KEYWORDS: Heat pump, optimization, mechatronic approach, sensitivity analysis, performance.

1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO

El calor en términos termodinámicos se refiere al intercambio de energía dado a un gradiente de temperaturas entre dos elementos o sistemas; al hablar de calor es importante definir a la energía como la capacidad de un cuerpo para producir trabajo y producir movimiento, cabe destacar que dentro de la energía se encuentra la exergía que hace alusión el máximo trabajo útil que se puede obtener de un flujo de energía (Rodríguez, 1990). Todos estos parámetros son de vital importancia para los sistemas de climatización de hogares debido a que ellos son los encargados de brindar una sensación de confort térmico a sus usuarios. El uso cada vez más dominante de tecnologías de climatización de hogares ha resultado en un alto consumo de energía, en donde los principales perjudicados son los usuarios debidos a los altos costes de operación del sistema, ya que al no presentar un estudio previo de implantación de los sistemas para distintas configuraciones ha hecho que devenga en un consumo desmesurado de energía.

El análisis de sistemas dinámicos térmicos se fundamenta en la implementación de un enfoque mecatrónico, el cual aglutina varias disciplinas de la ingeniería mecánica como el caso del control automático, la dinámica de sistemas y al referirse a sistemas dinámicos térmicos, cabe resaltar de incluir en el análisis las cátedras de termodinámica y transferencia de calor, los cuales dan una visión más amplia y sobre todo de mayor concordancia con el comportamiento del sistema para su evaluación.

Siguiendo lo expuesto y en consecuencia el presente proyecto se enfoca en: realizar una revisión bibliográfica de los sistemas de bombas de calor, el proceso termodinámico que los rige, los tipos de bombas de calor que existen según el tipo de alimentación en el evaporador; para luego definir la metodología del trabajo, considerando un análisis matemático que define el comportamiento del sistema, este análisis se enfoca en un comportamiento cuasiestático y un comportamiento dinámico. Posteriormente se procede modelar mediante un enfoque mecatrónico – paramétrico el comportamiento de un sistema de bomba de calor de alimentación eléctrica de la red eléctrica nacional para uso doméstico enfocado en la provisión de agua caliente sanitaria, considerando condiciones de trabajo termofísicas de Quito, para la obtención de resultados preliminares mediante el empleo de un software computacional llamado Matlab; con ello seguidamente elaborar un banco de variaciones de parámetros de funcionamiento del sistema para observar el comportamiento en cuanto a variables de eficiencia del sistema de bomba de calor. Una vez realizado el análisis del comportamiento del sistema frente al cambio de variables como: la existencia o no de asistencia solar en el evaporador, el tipo de material que conforma al aislante del termotanque y una serie de modificaciones en el tamaño de espesor del aislante del

termotanque; se selecciona la mejor alternativa que presente una mejora considerable en cuando a parámetros de eficiencia frente a los resultados obtenidos inicialmente por parte de la bomba de calor.

1.1 Objetivo general

Optimizar el sistema de bomba de calor de 5kW mediante un enfoque mecatrónico – paramétrico para obtener un mayor aprovechamiento energético en sistemas de calefacción doméstica.

1.2 Objetivos específicos

1. Estructurar el estado de arte referente a la bomba de calor en sistemas de calefacción doméstica.
2. Configurar el modelo mecatrónico paramétrico que presente mayor concordancia con la operatividad del sistema.
3. Simular el modelo mecatrónico paramétrico del sistema de bomba de calor a fin de obtener parámetros de funcionamiento.
4. Realizar un análisis de sensibilidad paramétrica que refleje la criticidad de los parámetros obtenidos por simulación.
5. Determinar los parámetros óptimos para el máximo aprovechamiento energético en la bomba de calor para sistemas de calentamiento y refrigeración de hogares.

1.3 Alcance

El desarrollo del presente trabajo de integración curricular presenta sus bases en la aplicación de las siguientes actividades propuestas por los objetivos específicos.

Objetivo Específico 1 (OE1) Estructurar el estado de arte referente a la bomba de calor en sistemas calefacción doméstica.

- Actividad (A1.1). Compilación de información bibliográfica.
- Actividad (A1.2). Análisis y sistematización de la información recopilada.
- Actividad (A1.3). Estructuración del reporte del estado del arte con la información sistematizada.

Objetivo Específico 2 (OE2) Configurar el modelo mecatrónico paramétrico que presente mayor concordancia con la operatividad del sistema.

- Actividad (A2.1). Determinación de parámetros operacionales del sistema, tales como: planta, parámetros de entrada, parámetros de salida y perturbaciones.
- Actividad (A2.2). Establecimiento de las ecuaciones fundamentales que rigen el comportamiento dinámico del sistema.
- Actividad (A2.3). Desarrollo del modelo mecatrónico paramétrico.
- Actividad (A2.4). Elaboración del informe del modelo mecatrónico paramétrico.

Objetivo Específico 3 (OE3) Simular el modelo mecatrónico paramétrico del sistema de bomba de calor a fin de obtener parámetros de funcionamiento.

- Actividad (A3.1). Ejecución de la simulación del modelo mecatrónico paramétrico con los parámetros operacionales iniciales del sistema.

Objetivo Específico 4 (OE4) Realizar un análisis de sensibilidad paramétrica que refleje la criticidad de los parámetros obtenidos por simulación.

- Actividad (A4.1). Desarrollo de un banco de variaciones de parámetros operacionales.
- Actividad (A4.2). Determinación de parámetros óptimos que maximicen la eficiencia energética y exergética del sistema mediante simulaciones del banco de variaciones de parámetro operacionales.

Objetivo Específico 5 (OE5) Determinar los parámetros óptimos para el máximo aprovechamiento energético en la bomba de calor para sistemas de calentamiento y refrigeración de hogares.

- Actividad (A5.1). Simulación del modelo mecatrónico paramétrico con los parámetros operacionales optimizados del sistema.
- Actividad (A5.2). Evaluación de resultados obtenidos en cuanto a eficiencia energética y exergética, considerando los parámetros optimizados del sistema.

1.4 Marco teórico

Exponer el marco teórico relevante relacionado con el tema, incluyendo los argumentos que justifican la validez de lo realizado, con una revisión bibliográfica pertinente.

Bomba de calor y su principio de funcionamiento

El avance tecnológico en el campo de las energías renovables, principalmente para el alcance de la eficiencia energética en cuanto a usos domésticos se refiere, ha hecho que se desarrollen los sistemas de bombas de calor con aplicaciones en calefacción y refrigeración. Una bomba de calor no es más que una máquina térmica la cual transfiere energía en forma de calor entre un elemento que presente una menor temperatura hacia otro que presente una temperatura más elevada; todo este procedimiento es realizado con la finalidad de que exista una sensación de confort térmico por el usuario.

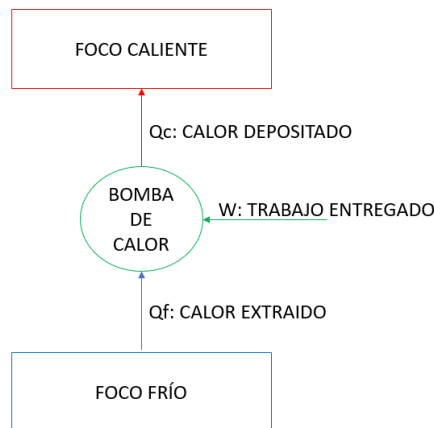


Figura 1. Diagrama de Flujos Energéticos de la Bomba de Calor

Fuente: Propia

Termodinámicamente hablando los sistemas de bombas de calor su funcionamiento se encuentra regido por el de ciclo de refrigeración por compresión de vapor; donde los sistemas de bombas de calor miden su capacidad por el coeficiente de operación, comúnmente conocido como "COP"; el trabajar en ciclo de refrigeración por compresión de vapor para las bombas de calor, significa que el fluido de trabajo presenta distintos cambios de fase a lo largo del recorrido que tenga que realizar por el sistema para con ello lograr la transferencia de calor requerida (Cengel & Boles, 2012).

El ciclo ideal de refrigeración por compresión de vapor típicamente está representado por 4 fases, los cuales son:

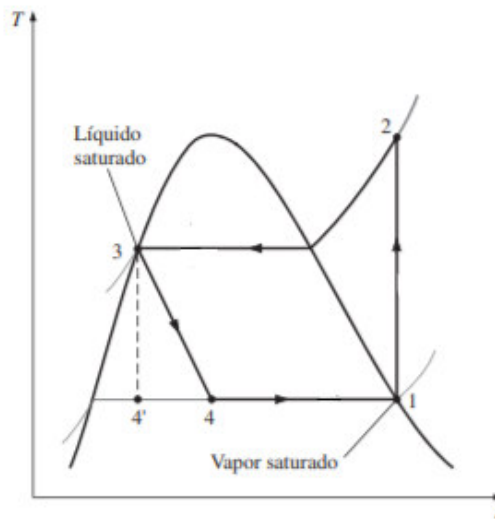


Figura 2. Diagrama T-s del ciclo ideal de refrigeración por compresión de vapor.

Fuente: (Cengel & Boles, 2012)

- **Compresión Isentrópica (1-2):** Esta primera etapa del ciclo consiste en que el fluido de trabajo, principalmente un determinado refrigerante, ingrese a un compresor de baja presión para con ello sea comprimido y alcance un estado de vapor sobrecalentado, todo esto gracias a que el fluido de trabajo obtuvo la presión de condensación.
- **Rechazo de calor (2-3):** Una vez que el fluido de trabajo se encuentre en un estado de vapor sobre calentado, este mismo pasa hacia el condensador permitiendo con ello que se efectúe la transferencia de calor con la fuente de mayor temperatura, obteniéndose así la condensación del fluido del trabajo.
- **Proceso isoentálpico (3-4):** Terminado el proceso de condensación del fluido de trabajo, este mismo se dirige a la válvula de expansión en donde su presión disminuirá drásticamente presentando con un efecto de este proceso que parte del fluido se evapore; cabe destacar que, aunque la presión del fluido de trabajo disminuya su entalpía permanece constante.
- **Absorción de calor (4-1):** Para finalizar el proceso de refrigeración por compresión de vapor, el fluido de trabajo es dirigido hacia un evaporador en donde se produce la transferencia de calor entre el fluido de trabajo y el foco frío; ya que en este punto el fluido de trabajo toma energía del foco frío para así presentar un estado de vapor saturado y continuar su camino por las otras etapas del ciclo.

Cabe destacar que el proceso de ciclo real presenta un sinnúmero de diferencias con un proceso de ciclo ideal dado principalmente por irreversibilidades existentes en el proceso de compresión, lo cual se refleja en el aumento de entropía del fluido de trabajo; estas irreversibilidades presentes en el ciclo real de refrigeración son producidas en parte por la fricción del refrigerante y la imposibilidad de controlar su estado con una exacta precisión, dada la última particularidad en el proceso, se considera que el fluido de trabajo presente un sobrecalentamiento mínimo que asegure su evaporación al momento de entrar en el compresor (Muñoz, 2020).

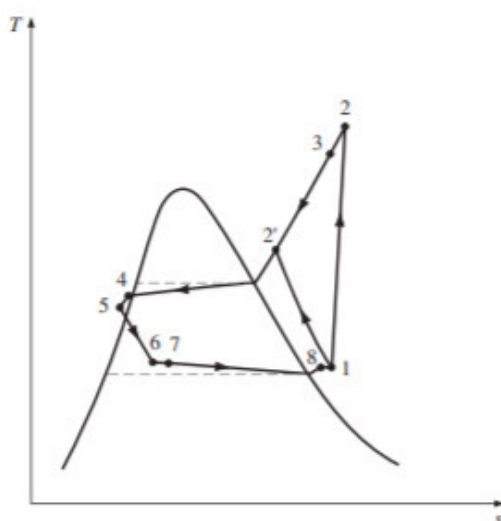


Figura 3. Diagrama T-s del ciclo real de refrigeración por compresión de vapor.

Fuente: (Cengel & Boles, 2012)

Componentes de la bomba de calor

Refrigerante

Como primer integrante y elemento más importante de una bomba de calor se presenta al refrigerante, ya que gracias a dicho elemento existe la posibilidad de transferir calor desde una fuente de baja temperatura hacia una fuente de alta temperatura. En las bombas de calor los refrigerantes de mayor empleabilidad son: R-134A y el R407C, debido a sus características óptimas en cuanto a disminución de efectos negativos ambientales se refiere.

Evaporador

El segundo elemento que compone una bomba de calor es el evaporador, como se mencionó en el apartado anterior, la misión de este elemento es la de absorber la energía presente en el foco frío para con ello el fluido de trabajo presente un estado de vapor sobrecalentado; algo que no se mencionó en el apartado anterior es que la toma de energía del foco frío se lo realiza por medio de transferencia de calor ya sea por convección natural, convección forzada y hasta por radiación, el tipo de intercambio de calor usado en este elemento es determinado principalmente por el modelo de bomba de calor (Españeira, 2015).

Compresor

Como tercer integrante del sistema de bomba de calor se encuentra el compresor, el cual tiene como principal función permitir que exista una circulación del fluido del trabajo por todo el sistema, así mismo, presenta la misión de aumentar la presión del fluido de trabajo y que este mismo presente el estado de vapor sobrecalentado. El compresor presenta dos principales tipos los cuales son presentados a continuación:

- **Compresores dinámicos:** Este tipo de compresores presentan la particularidad de que, al absorber el fluido de trabajo con el uso del rotor, este fluido procede a adquirir una mayor energía cinética. Cabe destacar que los compresores dinámicos son principalmente usados al momento de requerir mayores capacidades de refrigeración debido al óptimo manejo de grandes caudales en su haber (Muñoz, 2020).
- **Compresores Volumétricos:** Al hablar de este tipo de equipos, se hace alusión a compresores que mediante una simplificación de volumen del fluido se obtiene el aumento de presión requerido. Este tipo de compresores se subdividen entre rotatorios (desplazan volumen mediante la rotación de elementos rotativos) y reciprocantes (mediante el uso de un pistón el cual presenta un movimiento cíclico, se produce la reducción de volumen del fluido del trabajo) (Muñoz, 2020).

Condensador

Como se expuso anteriormente, en la fase de rechazo de calor existe la presencia de un condensador, en este elemento el fluido de trabajo transfiere energía en forma de calor hacia el foco caliente, produciendo con ello que se efectúe la condensación del fluido del trabajo (Muñoz, 2020). El calor que no es tomado por el condensador es concentrado por fluidos como aire y agua según sean los usos propuestos.

Si el calor rechazado es concentrado por aire significa que la bomba de calor es usada con fines de calefacción, en este tipo de sistemas la transferencia de calor es basada en tubos aleteados y en la convección ya sea natural o forzada. En cambio, si el calor rechazado es concentrado por agua, la bomba de calor es usada principalmente para la generación de agua caliente de uso sanitario, en este tipo de configuración la transferencia de calor se la realiza por medio de intercambiadores de calor de placas planas, coraza y tubos, etc.

Válvula de expansión

Al momento de que se haya efectuado la condensación del fluido del trabajo sigue el proceso isoentálpico en el cual prima la acción del elemento conocido como válvula de expansión, este elemento tiene como misión fundamental la disminución de la presión del fluido de trabajo.

El hecho que se use una válvula de expansión frente a tubos capilares es que la válvula de expansión permite el control del caudal del fluido de trabajo, así mismo como su temperatura al ingresar al evaporador (Muñoz, 2020).

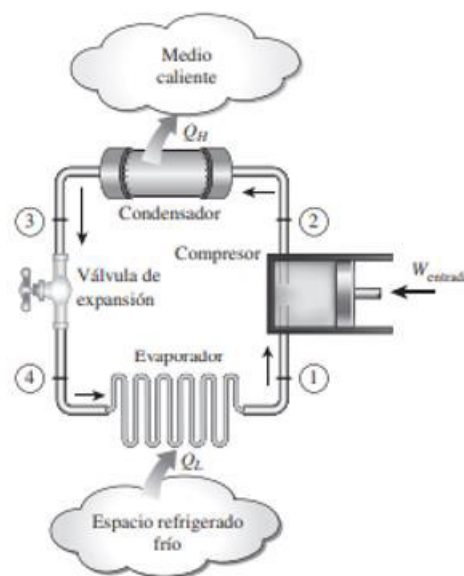


Figura 4. Componentes de una bomba de calor

Fuente: (Cengel & Boles, 2012)

Tipos de bombas de calor

Alrededor del globo, las bombas de calor se clasifican según diferentes criterios y estos pueden ser según: el tipo de proceso que realicen, la configuración de origen y destino que presenten, el diseño y el funcionamiento que posean las máquinas, etc. Para este estudio

se considera clasificar a las bombas de calor según el tipo de asistencia que poseen, en esta clasificación se encuentran tres tipos de bombas de calor, los cuales son:

Bomba de calor geotérmica

Esta configuración de bomba de calor presenta su principal particularidad es que en sí el elemento considera a su elemento de baja temperatura bajo tierra, es decir aprovecha energía del subsuelo el cual se encuentra en un rango de temperatura de entre 10 °C y 15 °C aproximadamente; cabe destacar que este tipo de configuración de bomba de calor presenta una gran ventaja para aplicaciones de refrigeración de verano dado a que en esa temporada la temperatura de la fuente de menor temperatura se encuentra hasta en un máximo de 20°C, lo cual hace que exista una mayor presencia de energía para procesos de refrigeración.

Para la instalación de este tipo de bomba de calor es imperante la realización de un estudio geológico que determine la viabilidad del proyecto, ya que existe una alta probabilidad que la energía aprovechada del subsuelo no sea suficiente (Moreno, 2013).

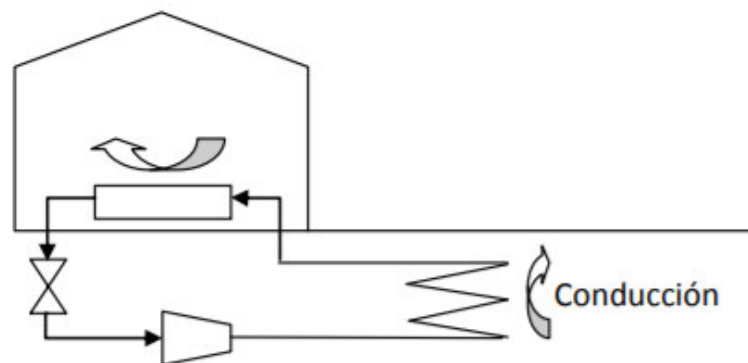


Figura 5. Esquema de funcionamiento de una bomba de calor geotérmica

Fuente: (Moreno, 2013)

Bomba de calor asistida por aire.

El modelo de bomba de calor asistida por aire presenta una característica fundamental que lo diferencia de otros modelos y es que considera como elemento de menor temperatura al aire circundante del evaporador, en otras palabras, absorbe calor del aire. En este modelo de bomba de calor se efectúa transferencia de calor por el método de convección forzada en el evaporador entre el aire y el fluido de trabajo.

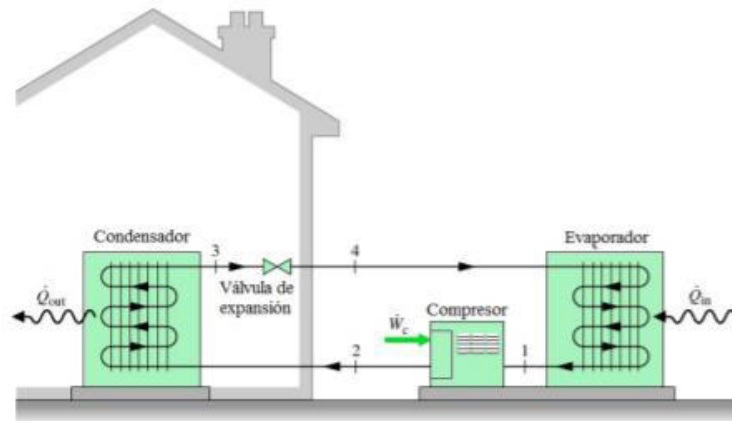


Figura 6. Esquema de funcionamiento de una bomba de calor asistida por aire.

Fuente: (Muñoz, 2020)

Bomba de calor de expansión directa con asistencia solar.

Este tipo de modelo de bomba de calor es uno de los más conocidos debido a su particularidad de reemplazar el evaporador típico de las bombas de calor, por un sistema de colectores los cuales son los encargados de realizar la misma misión que el evaporador tradicional, adicionalmente se debe mencionar que gracias a esta particularidad la transferencia de calor presente en el colector del sistema de bomba de calor está fundamentada en la convección natural, la convección forzada por parte del viento que interactúa en el sistema y por la radiación misma de la luz solar; esta característica de poseer más de tres métodos de transferencia de calor en los colectores hace que este tipo de sistema presente una mayor eficiencia frente a otros modelos de bomba de calor. Así mismo otra ventaja que se puede mencionar del sistema es que el consumo energético del modelo de bomba de calor es menor frente a otros debido a que no necesitan la presencia de ventiladores, pero del mismo modo la principal desventaja de este sistema es que se requiere la presencia de una superficie de considerable tamaño en donde se considera la colocación de los colectores solares.

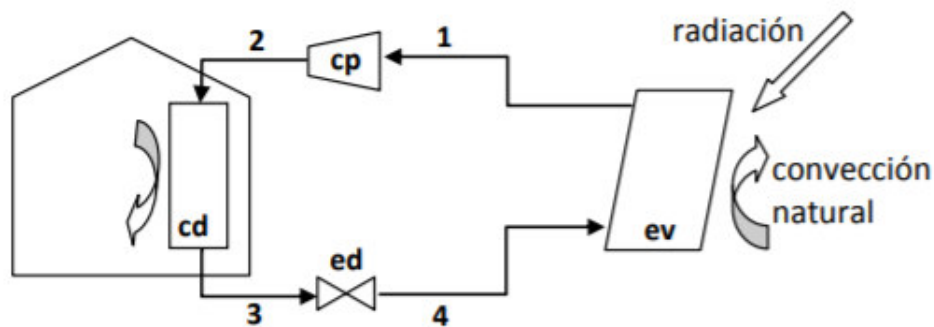


Figura 7. Esquema de funcionamiento de una bomba de calor de expansión directa con asistencia solar

Fuente: (Moreno, 2013)

Recurso energético solar

El territorio ecuatoriano al estar situado justo en el centro de la línea ecuatorial, presenta una alta recepción de radiación solar, es por ello que para sistemas de aprovechamiento solar se presentan grandes beneficios en cuanto a eficiencia energética se trata, cabe destacar que la geografía del territorio ecuatoriano es irregular es por ello que esta característica de una alta captación de energía solar se concentran en lugares en donde priman su ubicación en lugares altos, es decir a varios metros sobre el nivel del mar sobre la Cordillera de los Andes, tal es el caso de las provincias de Imbabura, Loja y Pichincha en donde la implementación de sistemas de aprovechamiento de energía solar no tendrían mayor problema debido a la existencia irradiación solar global horizontal de aproximadamente 5 kWh/m^2 . En el Ecuador por el promedio anual de irradiación solar global horizontal se encuentra en un rango que va entre 2.9 kWh/m^2 a 6.3 kWh/m^2 (Vaca & Ordoñez, 2019).

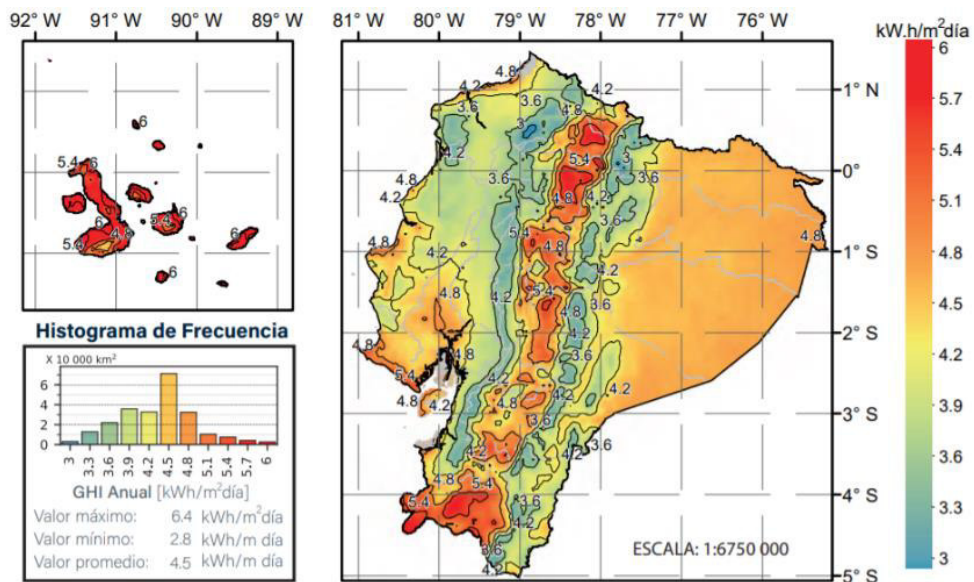


Figura 8. Mapa de la irradiación solar global horizontal Anual

Fuente: (Vaca & Ordoñez, 2019)

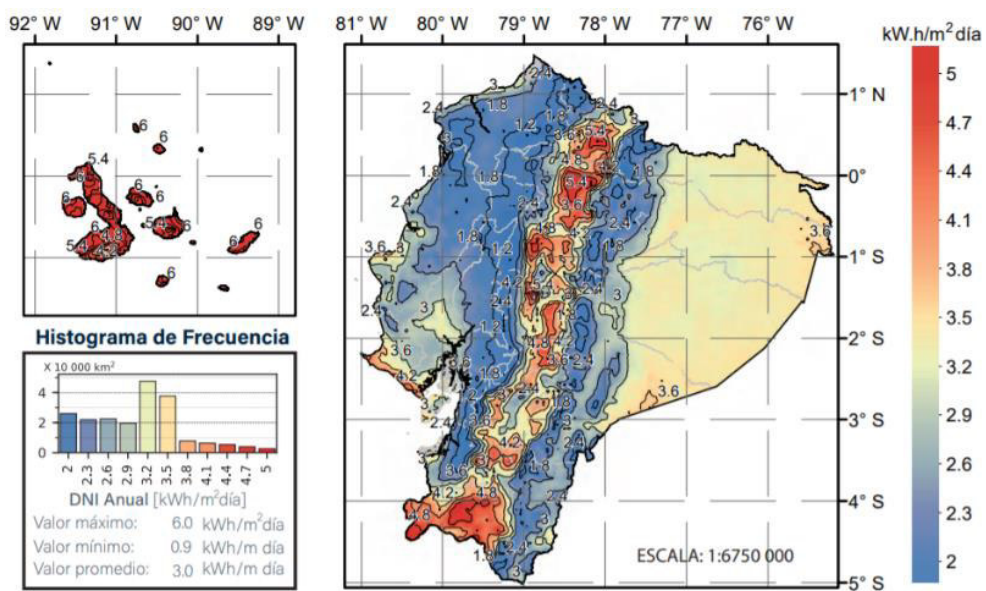


Figura 9. Mapa de la irradiación solar directa normal Anual

Fuente: (Vaca & Ordoñez, 2019)

2 METODOLOGÍA

La finalidad del presente trabajo es la modelización y optimización de un sistema de bomba de calor de uso doméstico para lo cual es imprescindible la determinación de parámetros operacionales del sistema, todo esto acompañado del establecimiento de las ecuaciones fundamentales en las que el sistema basa su funcionamiento, todas estas características hacen que este trabajo se lo aborde se lo aborde como un trabajo de tipo exploratorio.

2.1 Enfoque Metodológico

Enfoque Mecatrónico

Es por ello que el desarrollo del análisis paramétrico de una bomba de calor de uso doméstico es tratado mediante un enfoque cuantitativo y correlacional orientado hacia más hacia el campo de la mecatrónica debido a la cantidad de cátedras que componen dicho campo; concentrando en su haber ciencias propias de la ingeniería mecánica como la termodinámica, la transferencia de calor, la dinámica de sistemas acompañada del control automático; todo esto con la directriz de comprender de manera exacta el sistema térmico, haciendo alusión a su operación.

Para subsanar los problemas que presentan la implementación de dichos sistemas de climatización en cuanto a su alto consumo y baja eficiencia energética, se considera como mejor opción la optimización energética del sistema mediante un enfoque mecatrónico paramétrico, basando el sistema en modelos matemáticos en espacio de estado, los cuales estarán regidos por la primera y segunda ley de la termodinámica.

2.2 Descripción del proceso metodológico

El proceso para el desarrollo del análisis paramétrico para optimización de una bomba de calor está compuesto por un total de 4 etapas en las cuales engloban un conjunto de actividades capaces de dar cumplimiento a los objetivos propuestos en el presente trabajo; el proceso mencionado se encuentra detallado en la (Figura 10).

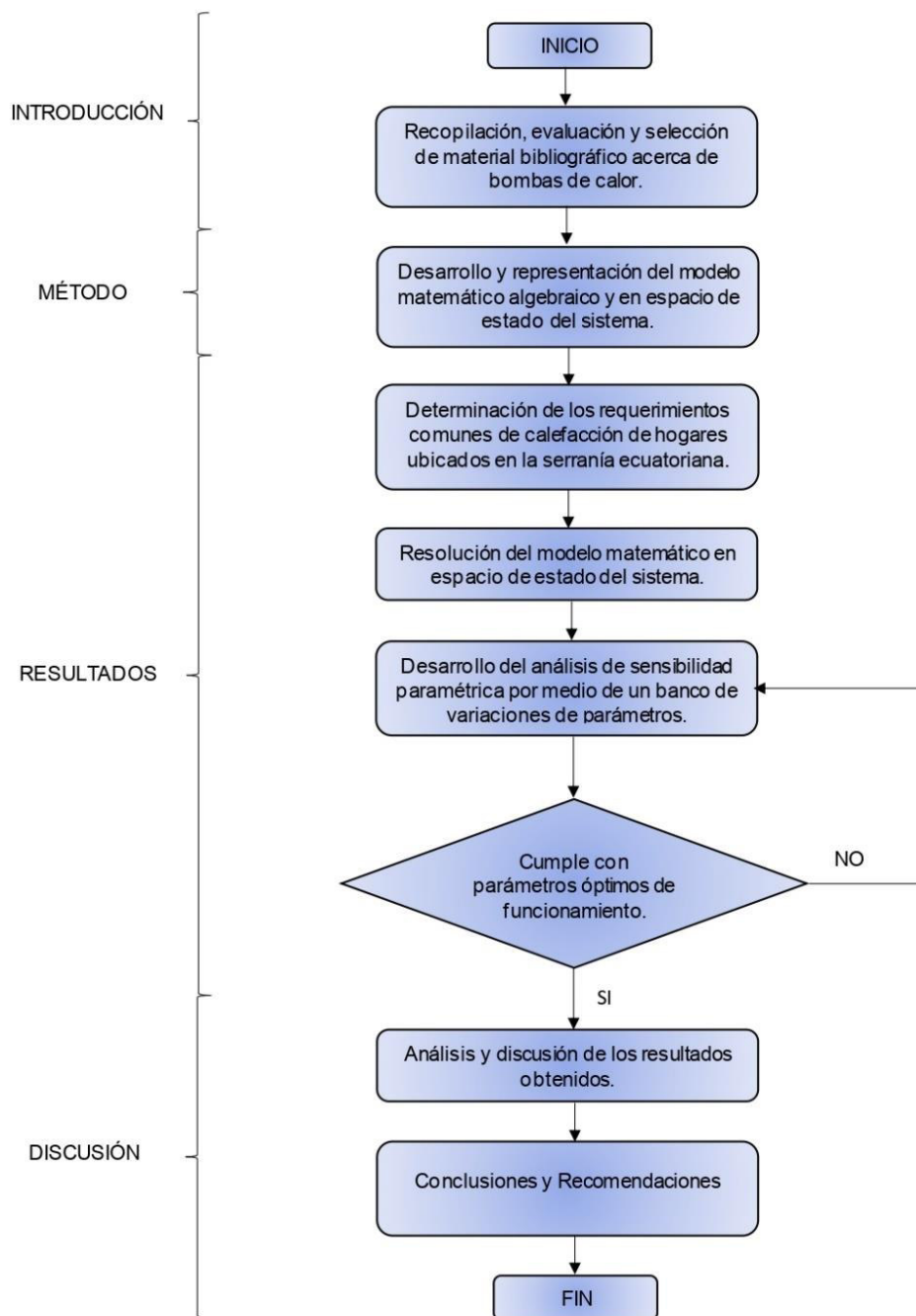


Figura 10. Diagrama de flujo de la metodología

Fuente: Propia

2.3 Modelo matemático cuasiestático del sistema de bomba de calor

El modelo matemático del sistema a estudiar se lo realiza de manera general, considerando ciertas particularidades al final como la existencia de asistencia solar en el evaporador.

Análisis termodinámico

Los sistemas térmicos tienen su base de funcionamiento en la Primera Ley de la Termodinámica que hace alusión a la conservación de energía, esta particularidad en el caso de bombas de calor, se lo visualiza con la siguiente ecuación:

$$\Delta E_{\text{energía}} = E_{\text{entrada}} - E_{\text{salida}}$$

Ecuación 1. Balance de energías del sistema.

Donde:

$\Delta E_{\text{energía}}$ Variación de energía de la planta.

E_{entrada} Energía que entra al sistema.

E_{salida} Energía que sale del sistema

Cabe destacar que la planta a controlar está compuesta por 4 fases en donde los cuales existe la presencia de un flujo másico constante, quedando así la primera ecuación representada de la siguiente manera:

$$\dot{m}(\Delta h) = \dot{Q} - \dot{W}$$

Ecuación 2. Primera ley de la termodinámica.

Donde:

\dot{m} Flujo másico del refrigerante.

Δh Variación de entalpías.

\dot{Q} Flujo de Calor

\dot{W} Flujo de Trabajo

Una vez analizado de manera general la ecuación directora del sistema se procede con el análisis particular de cada uno de los componentes de la bomba de calor.

Evaporador

El primer componente a desarrollar es el evaporador dado que aquí es donde empieza el ciclo de calefacción. Este elemento viene regido por la siguiente ecuación:

$$Q_{Evap} = \dot{m} (h_{evap,in} - h_{evap,out})$$

Ecuación 3. Flujo de calor absorbido en el evaporador.

Donde:

Q_{Evap} Flujo de calor absorbido por el evaporador.

$h_{evap,in}$ Entalpía a la entrada del evaporador.

$h_{evap,out}$ Entalpía a la salida del evaporador.

Compresor

En segundo lugar, del ciclo de funcionamiento de una bomba de calor, se encuentra ubicado el compresor, el cual presenta la siguiente ecuación.

$$-W_{Comp} = \dot{m} (h_{comp,out} - h_{comp,in})$$

Ecuación 4. Flujo de trabajo en el compresor.

Donde:

W_{Comp} Flujo de trabajo del compresor.

$h_{comp,out}$ Entalpía a la salida del compresor

$h_{comp,in}$ Entalpía a la entrada del compresor

Condensador

En la tercera etapa del ciclo de funcionamiento de una bomba de calor, se encuentra ubicado el condensador el cual presenta la siguiente ecuación directora:

$$Q_{Cond} = \dot{m} (h_{cond,out} - h_{cond,in})$$

Ecuación 5. Flujo de calor del condensador.

Donde:

Q_{Cond} Flujo de calor del condensador.

$h_{cond,out}$ Entalpía a la salida del condensador.

$h_{cond,in}$ Entalpía a la entrada del condensador

Válvula de Expansión

El cuarto y último elemento del ciclo antes de regresar al colector, es el evaporador el cual presenta la particularidad de que allí existe un proceso de expansión isoentálpica, lo cual viene representado por la siguiente ecuación:

$$h_{válvula,in} = h_{válvula,out}$$

Ecuación 6. Igualdad de entalpías en la válvula de expansión.

Donde:

$h_{válvula,in}$ Entalpía a la entrada de la válvula de expansión.

$h_{válvula,out}$ Entalpía a la salida la válvula de expansión.

Asistencia solar para la bomba de calor

Al existir modelos de bombas de calor que presentan asistencia solar en el evaporador por medio de un colector, se calcula en primer lugar el flujo calórico de radiación absorbido por el colector, el cual presenta la siguiente ecuación:

$$\dot{Q}_{rad} = \frac{IND * A_{TC}}{H_{sol,prom}}$$

Ecuación 7. Flujo de calor por radiación absorbido por el colector.

Donde:

\dot{Q}_{rad} Flujo de calor por radiación absorbido por el colector.

IND Insolación normal directa.

A_{TC} Área total de transferencia de calor

IND Horas de sol promedio

Seguido del cálculo del flujo calórico de radiación absorbido por el colector, se procede con el cálculo del flujo de calor absorbido por el evaporador con asistencia solar y el flujo de calor entregado por el condensador con asistencia solar.

$$Q_{evap,asis} = Q_{rad} + Q_{Evap}$$

Ecuación 8. Flujo de calor del evaporador con asistencia solar.

$$Q_{cond,asis} = Q_{evap,asis} + W_{Comp}$$

Ecuación 9. Flujo de calor del condensador con asistencia solar.

Donde:

$Q_{evap,asis}$ Flujo de calor absorbido por el evaporador con asistencia solar.

$Q_{cond,asis}$ Flujo de calor entregado por el condensador con asistencia solar.

Eficiencia energética y exergética del sistema

Una vez analizados cada uno de los elementos de la bomba de calor, es importante conocer el rendimiento que posee el sistema para con ello conocer cuál es el desempeño máximo que posee el sistema, en el caso de máquinas térmicas como las bombas de calor la eficiencia energética viene determinado por el cálculo del coeficiente de desempeño del sistema (COP), el cual relaciona parámetros como el calor que cede el condensador y la potencia que es consumida por el compresor para que así se efectúe el movimiento del fluido de trabajo alrededor de todo el sistema, este coeficiente viene determinado por la ecuación:

$$COP = \frac{Q_{Cond}}{W_{Comp}}$$

Ecuación 10. Coeficiente de desempeño del sistema.

Donde:

COP Coeficiente de desempeño.

Para el caso de la existencia de asistencia solar en el evaporador el cálculo del coeficiente de desempeño del sistema se ajusta a las nuevas variables presentadas en el apartado anterior y se la determina de la siguiente manera:

$$COP_{asis} = \frac{Q_{Cond,asis}}{W_{Comp}}$$

Ecuación 11. Coeficiente de desempeño del sistema con asistencia solar.

Donde:

COP_{asis} Coeficiente de desempeño del sistema con asistencia solar.

El sistema de bomba de calor es un proceso termodinámicamente reversible lo cual data que puede el proceso ser revertido realizando cambios ínfimos en alguna propiedad perteneciente al sistema sin alterar el mismo ni el entorno que lo rodea. Es por ello por lo que para analizar la posibilidad de optimizar cualquier sistema térmico se lo realiza por medio del análisis de la eficiencia exergética, la cual viene determinada por la siguiente ecuación:

$$\eta_{ex} = \frac{\text{Exergía Recuperada}}{\text{Exergía Suministrada}}$$

Ecuación 12. Eficiencia exergética expresada en términos de exergía.

Donde:

η_{ex} Eficiencia exergética.

Para el caso de las bombas de calor al ser equipos cíclicos, y ser de carácter termodinámico reversible, la eficiencia exergética se lo puede representar:

$$\eta_{ex} = \frac{COP}{COP_{REV}}$$

Ecuación 13. Eficiencia exergética para sistemas de bombas de calor

Donde:

COP_{REV} Coeficiente de desempeño reversible.

El término del coeficiente de desempeño reversible para el caso de bombas de calor se lo calcula del siguiente modo:

$$COP_{REV} = \frac{1}{1 - \frac{T_{FF}}{T_{FC}}}$$

Ecuación 14. Coeficiente de desempeño reversible.

Donde:

T_{FF} Temperatura del foco frío.

T_{FC} Temperatura del foco caliente.

2.4 Modelo matemático dinámico en espacio de estado

El modelo matemático en espacio de estado no es muy diferente al modelo matemático algebraico ya que los dos parten del mismo análisis termodinámico amparado en la Primera Ley de la Termodinámica, el cual data del balance de energías; la particularidad del modelo en espacio de estado es que se empieza aplicando un análisis diferencial a la Primera Ley de la Termodinámica.

$$\frac{d(\Delta Energía)}{dt} = E_{entrada} - E_{salida}$$

Ecuación 15. Balance diferencial de energía del sistema

Donde:

$\frac{d(\Delta Energía)}{dt}$ Diferencial de la variación de energía de la planta.

$E_{entrada}$ Flujo de energía que entra al sistema.

E_{salida} Flujo de energía que sale del sistema

En el caso de la bomba de calor, el flujo de calor que se provee del condensador al foco caliente se lo transfiere a un elemento que puede ser agua o aire según sea la configuración de la bomba, la ecuación regente de este elemento viene dado por:

$$\frac{d(\Delta Energía)}{dt} = m_e * C_{Pe} * \frac{d(\Delta T)}{dt}$$

Ecuación 16. Flujo de calor del elemento a calefactar.

Donde:

$\frac{d(\Delta Energía)}{dt}$	Diferencial de la variación de Temperatura.
m_e	Masa del elemento receptor de la carga térmica del condensador
C_{pe}	Calor específico del elemento receptor de la carga térmica del condensador

Al operar la (Ecuación 15) y (Ecuación 16) se obtiene la ecuación directora de todo el sistema de bomba a controlar para su respectivo análisis paramétrico.

$$\frac{d(\Delta T)}{dt} = -\frac{P_{erd} * \Delta T}{m_e * C_{pe}} + \frac{W_{Comp}}{m_e * C_{pe}}$$

Ecuación 17. Modelo matemático diferencial del sistema.

Donde:

P_{erd} Pérdidas por transferencia de calor.

Por lo tanto, el modelo matemático cerrado en espacio de estado queda configurado de la siguiente manera:

$$[\Delta T] = \left[-\frac{P_{erd}}{m_e * C_{pe}} \right] * [\Delta T] + \left[\frac{1}{m_e * C_{pe}} \right] * [Q_{Cond}]$$

Ecuación 18. Modelo matemático en espacio de estado del sistema.

3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.1 Resultados

Datos para la simulación computacional

Para el caso de estudio se considera una bomba de calor aplicado para el provisionamiento de agua caliente sanitaria para un típico hogar de la serranía ecuatoriana, para este aparato se toma en cuenta que poseerá aprovechamiento de la red eléctrica nacional para alimentar el compresor.

Como parámetros iniciales de entrada en todo el sistema, se procede primero con la definición de las propiedades termofísicas del agua, dado que es el principal producto que se requiere manipular para su uso doméstico. Cabe destacar que en el termotanque existen pérdidas de calor por convección natural debido al aire circundante, es por ello que es

importante analizar el coeficiente de convección externo del sistema el cual según Hernández & Lobato (2020) afirman que para la ciudad de Quito el coeficiente de convección del aire es “ $7.3109 \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$ ” (p. 42).

Tabla 1. Propiedades termofísicas del agua y aire

Parámetro	Valor
Temperatura del agua en estado natural	14 [°C]
Temperatura del agua caliente para uso doméstico	45 [°C]
Masa del agua	300 [kg]
Calor específico del agua	4180 $\left[\frac{J}{kg \cdot K} \right]$
Coeficiente de convección del aire	7.3109 $\left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$
Temperatura del ambiente	19 [°C]

(Fuente: (Hernández & Lobato, 2020))

Si el uso especificado para la bomba de calor es el provisionamiento de agua caliente sanitaria, se considera como planta a controlar el termotanque de almacenamiento de agua, el cual presenta las siguientes características:

Tabla 2. Características del termotanque

Parámetro	Valor
Altura del termotanque	2 [m]
Diámetro del termotanque	0.5 [m]
Capacidad de agua	300 [lt]
Material constitutivo	Acero AISI 304
Espesor del material constitutivo	3.5 [mm]
Conductividad térmica del material constitutivo	14.9 $\left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$
Tipo de aislante	Poliuretano expandido
Espesor del aislante	8 [cm]
Conductividad térmica del aislante	0.023 $\left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$

(Fuente: Propia)

Uno de los parámetros más importantes para el funcionamiento de una bomba de calor es el tipo de refrigerante a ser usado, debido a que este elemento transfiere calor de una fuente a otra fuente de diferente temperatura; para el caso particular de una bomba de calor uso de agua caliente sanitaria, se propone la implementación del refrigerante R-134a debido a su facilidad de obtención en el mercado y sus óptimas propiedades termofísicas que hacen que su uso sea óptimo para cualquier aplicación en sistemas térmicos de refrigeración que se desee.

Tabla 3. Propiedades termofísicas del refrigerante R-134a

Parámetro	Valor
Presión de condensación	414.9 [kPa]
Presión de evaporación	1891 [kPa]
Temperatura de condensación	60 [°C]
Temperatura de evaporación	10 [°C]
Flujo másico	0.035 $\left[\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right]$

(Fuente: (DuPont Suva, 2004))

Es de interés particular mencionar que la presencia de gran cantidad de radiación solar en el Ecuador, exactamente en la serranía ecuatoriana, hace posible la existencia de una mayor eficiencia de funcionamiento en el sistema de bomba de calor por la implementación de un colector solar que asista en el evaporador. A continuación, son presentados los datos requeridos para la ejecución del modelo matemático de la bomba de calor con asistencia solar en el evaporador:

Tabla 4. Datos del colector solar

Parámetro	Valor
Irradiación solar directa normal	5400 $\left[\frac{\text{W}\cdot\text{h}}{\text{m}^2\cdot\text{día}}\right]$
Area de transferencia de calor en el colector solar	5 [m ²]
Horas de sol promedio	5 [h]

(Fuente: (Vaca & Ordoñez, 2019))

Resultados preliminares de operación del sistema sin asistencia solar

La simulación del modelo matemático propuesto para el control de temperatura en el termostato para uso de agua caliente sanitaria considera una bomba de calor normal sin

ningún tipo de asistencia en el evaporador y con toma de electricidad de la red eléctrica nacional para la alimentación del compresor, obteniéndose con ello los siguientes resultados:

Tabla 5. Resultados del ciclo termodinámico presente en el sistema

Parámetro	Valor
Entalpía a la entrada del condensador	287.4 $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$
Entalpía a la entrada del evaporador	139.2 $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$
Entalpía a la entrada del compresor	256.2 $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$
Entalpía a la salida del compresor	287.4 $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

(Fuente: Propia)

Los primeros resultados del ciclo termodinámico del sistema fueron obtenidos gracias a la ayuda del software EES.

Siguiendo con la resolución del sistema de bomba de calor sin la presencia de asistencia solar en el evaporador, se obtienen las potencias correspondientes a cada uno de los componentes integrantes del sistema:

Tabla 6. Potencias de los componentes del sistema bomba de calor

Parámetro	Valor
Potencia en el condensador	5187 [W]
Potencia en el evaporador	4095 [W]
Potencia del compresor	1092 [W]

(Fuente: Propia)

Una vez obtenidos las potencias respectivas de cada uno de los componentes que interactúan en el sistema de bomba de calor, se procede con un análisis de rendimiento del sistema para verificar si el estado en que opera es óptimo o no. A continuación, se presentan los parámetros de rendimiento del sistema:

Tabla 7. Indicadores de rendimiento de la bomba de calor

Parámetro	Valor
COP	4.75
Eficiencia Exergética	38.83 %

(Fuente: Propia)

En el sistema se obtuvo un coeficiente de desempeño de 4.75 el cual es un buen dato numérico ya que nos indica una operación óptima al ser un número mayor a la unidad.

Para el modelamiento del sistema de bomba de calor, se consideró la aplicación de dos procesos, los cuales son: en primer lugar, el calentamiento inicial del termotanque y posteriormente el control analógico del sistema.

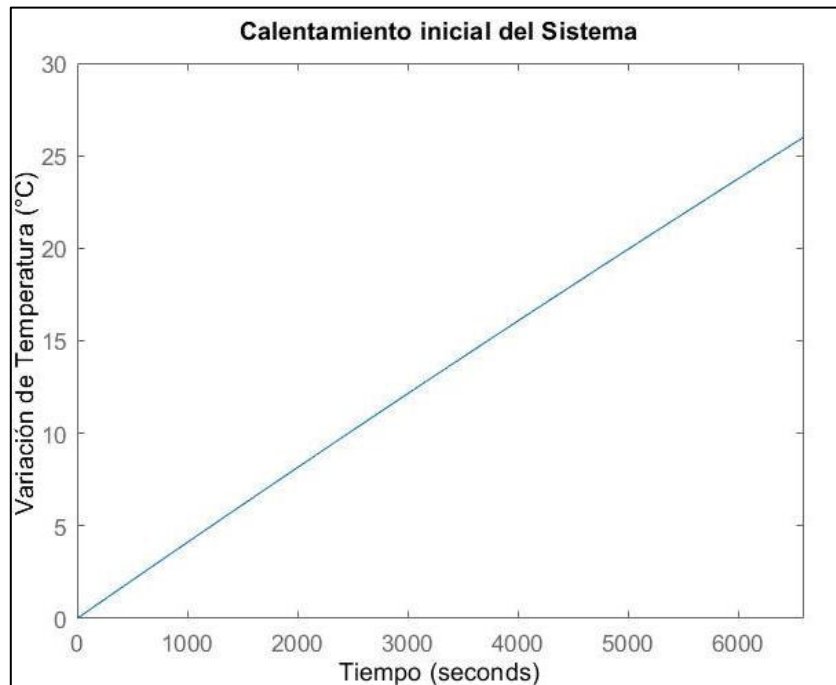


Figura 11. Comportamiento termodinámico de la Bomba de Calor.

Fuente: Propia

Como se puede evidenciar en el primer gráfico el proceso de calentamiento del termotanque para encontrarse en estado de operación toma alrededor de 6000 segundos lo cual aproximadamente data de 1 hora y 40 minutos, todo este tiempo tomaría para el calentamiento de aproximadamente 300 kg de agua contenida en el termotanque.

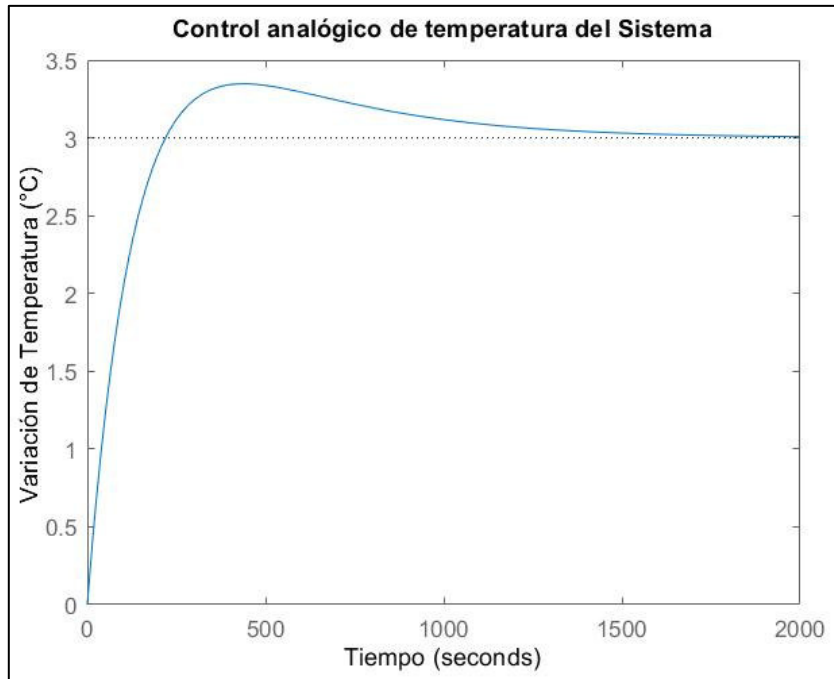


Figura 12. Control analógico de temperatura de la Bomba de Calor .

Fuente: Propia

El proceso de control del calentamiento del termostato, se lo realiza aplicando un control analógico de temperatura del sistema en donde se considera que la planta tendrá una variación de 3 [°C] y presentará una condición de estabilización en aproximadamente 2000 segundos lo cual equivale aproximadamente a 33 minutos.

Banco de parámetros operacionales del sistema para su optimización.

Los resultados preliminares obtenidos para la bomba de calor sin asistencia solar de uso enfocado a provisión de agua caliente sanitaria han sido aceptables, considerando un enfoque mecatrónico para la realización de la modelización y simulación del sistema; sin embargo, existe la posibilidad de optimizar al sistema variando parámetros como el tipo de aislante del termostato y las longitudes de este; es por ello la necesidad de crear un banco de variación de parámetros para que con ello se tenga un registro de qué parámetro ayuda a optimizar el sistema.

Este banco de parámetros se aplicará al sistema de bomba de calor sin la presencia de asistencia y al sistema de bomba de calor con la presencia de asistencia solar en el evaporador.

Tabla 8. Banco de variación de parámetros

Parámetro	Valor
Aislante: Poliuretano expandido	
Conductividad térmica del aislante	0.023 $\left[\frac{W}{m \cdot K}\right]$
Espesor inicial del aislante	8 [cm]
Primera variación del espesor	10 [cm]
Segunda variación del espesor	12 [cm]
Tercera variación del espesor	14 [cm]
Aislante: Corcho	
Conductividad térmica del aislante	0.039 $\left[\frac{W}{m \cdot K}\right]$
Espesor inicial del aislante	8 [cm]
Primera variación del espesor	10 [cm]
Segunda variación del espesor	12 [cm]
Tercera variación del espesor	14 [cm]

(Fuente: Propia)

Análisis de sensibilidad del sistema

Como se ha detallado con anterioridad en el banco de variación de parámetros, se considera la existencia de una bomba de calor con asistencia solar en el evaporador es por ello antes de realizar el análisis de sensibilidad del sistema se requiere la resolución de la bomba de calor con asistencia solar para obtención de resultados preliminares y posteriormente realización del análisis de sensibilidad considerando todos estos parámetros mencionados como: asistencia solar; tipo de aislante y espesor del aislante

En la introducción del presente trabajo se detalló acerca del Mapa Solar del Ecuador, en donde el cual indica el gran potencial que tiene el país, principalmente en la región interandina para el aprovechamiento energético solar; es por ello por lo que se considera la implementación de un colector solar.

Tabla 9. Potencias de los componentes del sistema bomba de calor con asistencia solar

Parámetro	Valor
Potencia en el condensador con asistencia solar	9687 [W]
Potencia en el evaporador con asistencia solar	8595 [W]
Potencia del compresor	1092 [W]

(Fuente: Propia)

Del mismo modo que en el sistema de bomba de calor anterior, se procede con la obtención de los indicadores de rendimiento del sistema.

Tabla 10. Indicadores de rendimiento de la bomba de calor con asistencia solar

Parámetro	Valor
COP con asistencia solar	8.8709
Eficiencia Exergética con asistencia solar	72.52%

(Fuente: Propia)

En el sistema con asistencia de calor se refleja una mejora significativa en los indicadores de rendimiento del sistema ya que, gracias a la asistencia solar, se ha logrado obtener casi el doble del coeficiente de desempeño y de eficiencia energética del sistema.

En la simulación del sistema de bomba de calor con asistencia solar, existe un cambio considerable al representar el calentamiento inicial del termostato.

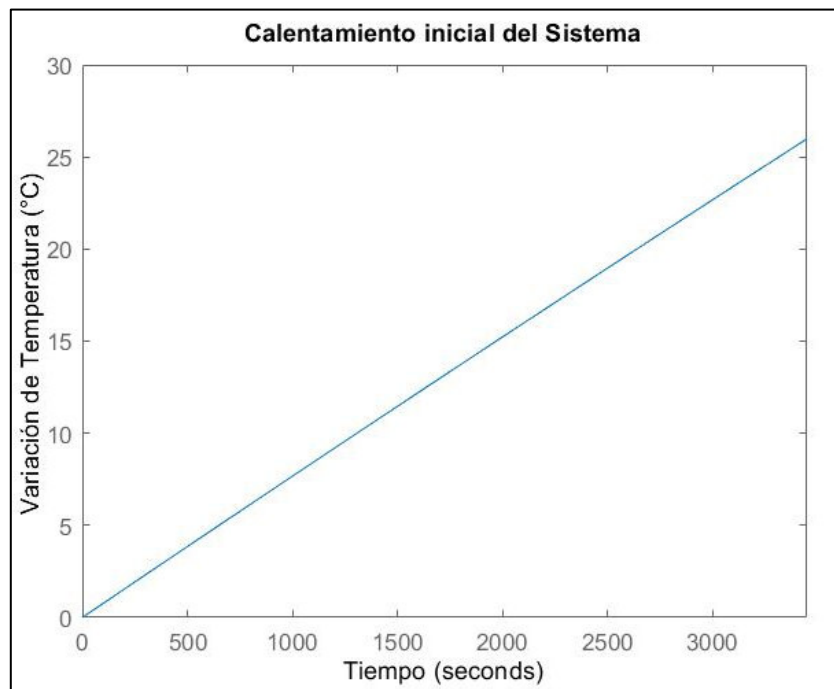


Figura 13. Comportamiento termodinámico de la Bomba de Calor con Asistencia Solar .

Fuente: Propia

Al momento de representar el comportamiento termodinámico del sistema, se evidencia el notable cambio y reducción del tiempo de calentamiento del termostato que antes consistía en alrededor de 1 hora y 40 minutos a tan solo 58 minutos, esto representa prácticamente la mitad de tiempo que le toma a una bomba de calor convencional. Sin embargo, en cuanto a la representación del control del calentamiento del termostato no existe ninguna variación con el sistema anterior.

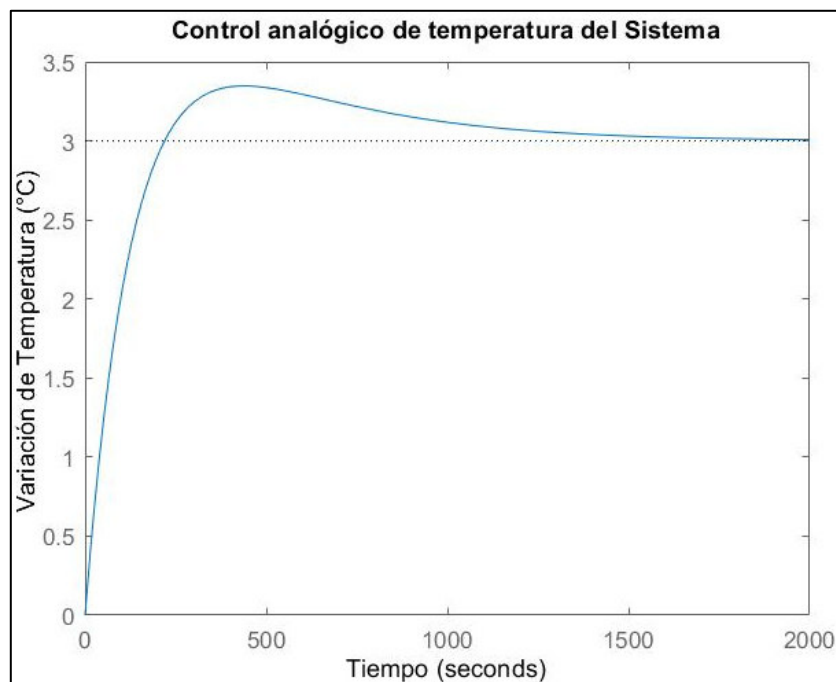


Figura 14. Control analógico de temperatura de la Bomba de Calor con Asistencia Solar.

Fuente: Propia

Como se puede evidenciar el control analógico del sistema propuesto no contiene ninguna variación en cuanto a tiempo de alcance de variación de temperatura se requiere ya que igual que el sistema anterior, el tiempo de estabilización del sistema quedaría en 2000 segundos o 33 minutos aproximadamente.

La realización del análisis de sensibilidad del sistema propuesto consiste en la evaluación mecánica de los dos tipos de sistemas por separado, considerando en cada sistema variaciones del espesor del aislante y dos tipos de aislantes, los cuales son los de mayor presencia en el mercado y luego se compara ambos tipos de sistemas.

Sistema de bomba de calor sin asistencia solar

En el primer sistema, se aborda en la necesidad de variar el espesor del aislante propuesto al inicio que es el poliuretano expandido, obteniéndose con ello los siguientes resultados:

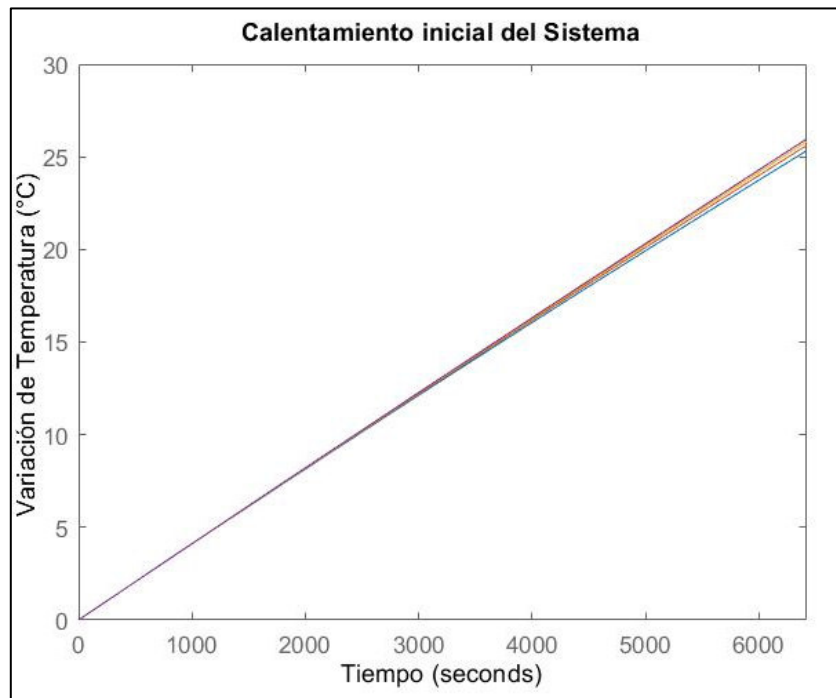


Figura 15. Resultados obtenidos al variar el espesor del aislante tipo poliuretano expandido del termotanque en el sistema bomba de calor.

Fuente: Propia

Para un mejor entendimiento de la (Figura 15), se procede con la obtención de una tabla de resultados, donde se pueda evidenciar de mejor manera el tiempo de calentamiento que llevó el termotanque al considerar diferentes espesores.

Tabla 11. Tiempo de calentamiento del termotanque con aislante de poliuretano expandido considerando diferentes espesores en el sistema bomba de calor

Parámetro	Valor	Tiempo
Aislante: Poliuretano expandido		
Primera medida del espesor	8 [cm]	6600 [s]
Segunda medida del espesor	10 [cm]	6530 [s]
Tercera medida del espesor	12 [cm]	6470 [s]
Cuarta medida del espesor	14 [cm]	6420 [s]

(Fuente: Propia)

Una vez obtenidos los resultados al variar el espesor del aislante, se obtiene que el tiempo de calentamiento va aminorando cada vez que el espesor aumente debido a que se restringe en que las pérdidas de calor del termotanque sean menores.

Ahora se procede con la consideración de otro tipo de material aislante que recubra al termotanque y de igual manera se realiza la variación de tamaño del espesor del aislante para observar el comportamiento del sistema:

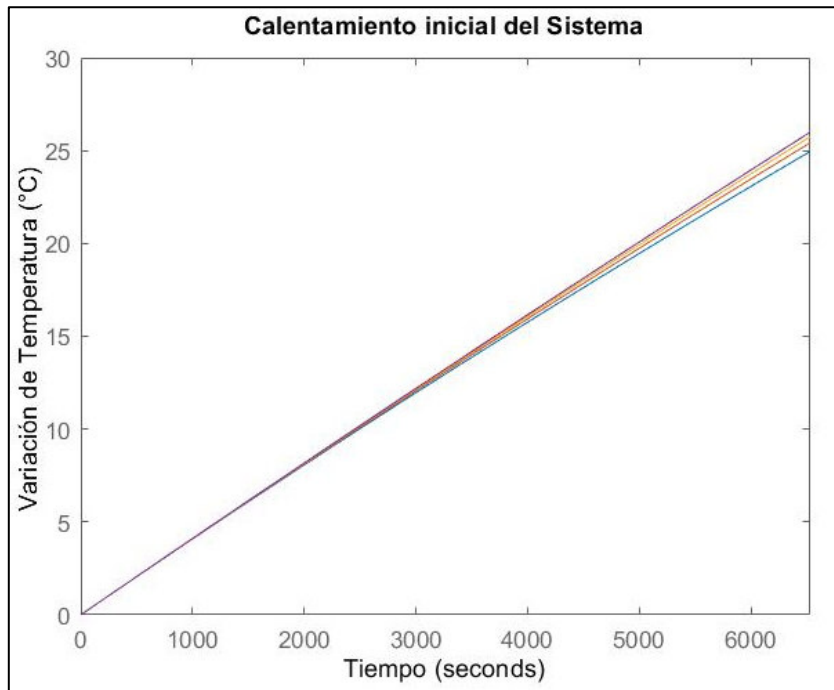


Figura 16. Resultados obtenidos al variar el espesor del aislante tipo corcho del termotanque en el sistema bomba de calor.

Fuente: Propia

Al variar el tipo de aislante a corcho y siguiendo el mismo proceso de variación de espesores de este, se obtienen los siguientes resultados en cuanto a calentamiento del termotanque:

Tabla 12. Tiempo de calentamiento del termotanque con aislante de corcho considerando diferentes espesores en el sistema bomba de calor

Parámetro	Valor	Tiempo
Aislante: Corcho		
Primera medida del espesor	8 [cm]	6830 [s]
Segunda medida del espesor	10 [cm]	6700 [s]

Tercera medida del espesor	12 [cm]	6600 [s]
Cuarta medida del espesor	14 [cm]	6530 [s]

(Fuente: Propia)

Como se puede observar gracias al gráfico y a los resultados, se repite el mismo patrón de que al tener un mayor tamaño de espesor del aislante se minimizan las pérdidas por convección en el termotanque.

Cabe destacar que al comparar los dos tipos de aislantes en el sistema de bomba de calor sin asistencia solar se evidencia que existen mayores pérdidas de calor en el corcho y esto es verificable al notar que el tiempo de calentamiento en el termotanque toma una mayor magnitud que en el caso del aislante de poliuretano en donde el tiempo de calentamiento es casi siempre alrededor de 100 segundos más bajo en todos los espesores propuestos.

Sistema de bomba de calor con asistencia solar en el evaporador

Este segundo sistema de bomba de calor al igual que el primero presenta dos tipos de variaciones de parámetros para visualizar de mejor manera su comportamiento y sobre todo para la elección de componentes del termotanque que hacen que el sistema opere en condiciones de rendimiento óptimas. Para esto y siguiendo el ejemplo del sistema anterior se procede con la realización de un análisis del comportamiento del sistema solo variando el parámetro del tamaño de espesor del aislante de poliuretano expandido, obteniéndose con ello los siguientes resultados:

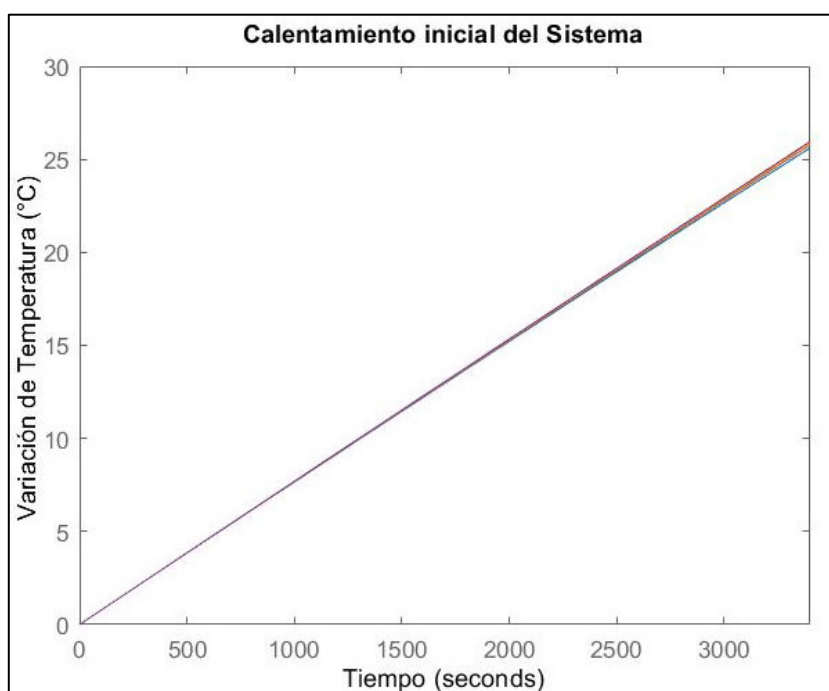


Figura 17. Resultados obtenidos al variar el espesor del aislante tipo poliuretano expandido del termotanque en el sistema bomba de calor con asistencia solar.

Fuente: Propia

En este caso particular la visualización de resultados en la (Figura 17) presenta ciertas dificultades es por ello por lo que se presenta a continuación una tabla conteniendo la variación del parámetro de tamaño del aislante:

Tabla 13. Tiempo de calentamiento del termotanque con aislante de poliuretano expandido considerando diferentes espesores en el sistema bomba de calor con asistencia solar

Parámetro	Valor	Tiempo
Aislante: Poliuretano expandido		
Primera medida del espesor	8 [cm]	3450 [s]
Segunda medida del espesor	10 [cm]	3430[s]
Tercera medida del espesor	12 [cm]	3420 [s]
Cuarta medida del espesor	14 [cm]	3400 [s]

(Fuente: Propia)

Los resultados obtenidos en esta primera parte de variación de parámetros en el sistema de bomba de calor con asistencia solar, nos muestran una notable variación en el tiempo de calentamiento del termotanque, también se evidencia que el aumento de tamaño en el espesor del aislante si reduce pérdidas pero no presentan mayor relevancia debido a que desde la media inicial del espesor que está planteada como 8 [cm] y la medida final planteada del espesor del aislante que es 14 [cm], solo existe una variación de 50 [s].

Al cambiar el tipo de aislante en el sistema al corcho y además de ello siguiendo la variación de tamaño del espesor de este, se obtuvieron los siguientes resultados para el sistema de bomba de calor con asistencia solar en el evaporador:

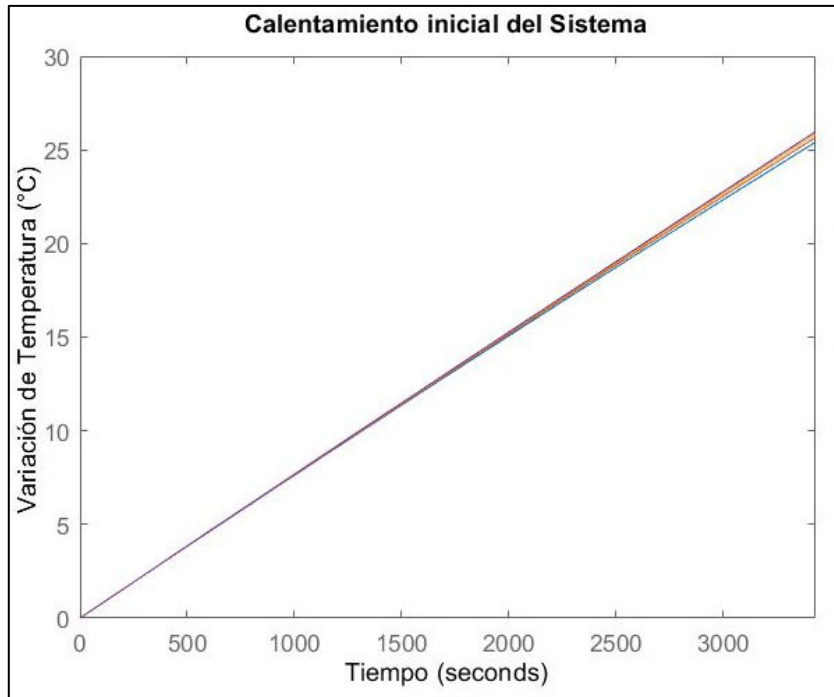


Figura 18. Resultados obtenidos al variar el espesor del aislante tipo corcho del termotanque en el sistema bomba de calor con asistencia solar.

Fuente: Propia

La visualización de resultados del calentamiento del termotanque considerando la presente variación de parámetros, se presenta a continuación:

Tabla 14. Tiempo de calentamiento del termotanque con aislante de corcho considerando diferentes espesores en el sistema bomba de calor con asistencia solar

Parámetro	Valor	Tiempo
Aislante: Corcho		
Primera medida del espesor	8 [cm]	3510 [s]
Segunda medida del espesor	10 [cm]	3480[s]
Tercera medida del espesor	12 [cm]	3450 [s]
Cuarta medida del espesor	14 [cm]	3430 [s]

(Fuente: Propia)

Como se puede observar el comportamiento seguido al aumentar el tamaño del espesor del aislante es el mismo ya que se minimizan pérdidas por convección, y al igual que el otro sistema al cambiar el tipo de aislante de poliuretano expandido a corcho, el sistema presenta mayores pérdidas de calor, haciendo que el tiempo de calentamiento del

termotanque resulte mayor que considerando el aislante de poliuretano. Lo más importante que destacar de este análisis de sensibilidad es que la mejor opción de implementación para un sistema de bomba de calor es el que presenta asistencia solar en el evaporador y que presente un tamaño considerable de espesor del aislante, no dejando de lado que el aislante debe ser de poliuretano expandido para lograr una máxima mitigación en lo posible de pérdidas de calor por convección.

Cabe mencionar que en todos los casos de variación de tamaño de espesor del aislante y del tipo de aislante, se obtuvo el mismo resultado que el sistema presenta estabilización alrededor de 17 minutos, considerando una variación de temperatura aproximada de 3 [°C], como se puede observar en la siguiente gráfica:

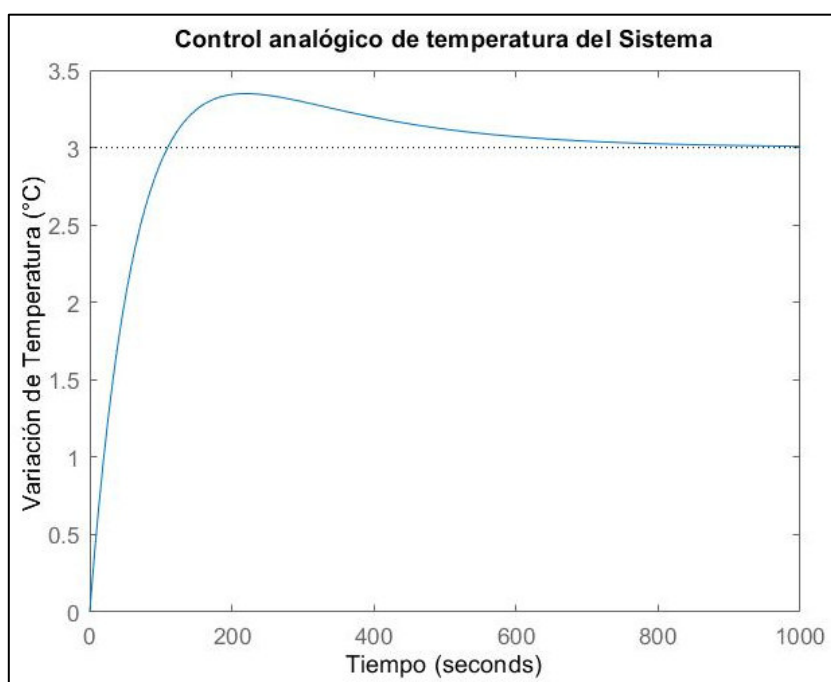


Figura 19. Resultados obtenidos del control analógico del sistema considerando las variaciones propuestas del análisis de sensibilidad.

Fuente: Propia

Del mismo modo los indicadores de rendimiento de los sistemas no sufren alteraciones en lo más mínimo al realizarse el cambio de parámetros propuestos como el tamaño de espesor del aislante y el tipo de aislante, pero si presenta cambios solo al momento de considerar o no la existencia de asistencia solar en el evaporador de la bomba de calor.

Sistema optimizado de bomba de calor

Una vez realizado el análisis de sensibilidad del sistema se obtuvo que el sistema se encuentra optimizado al considerar un espesor de alrededor 14 [cm], con el tipo de aislante de poliuretano expandido el cual tiene una conductividad térmica de $0.023 \left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$, así mismo se reconoce la necesidad de implementar un colector solar que asista al evaporador para con ello generar una mayor eficiencia del sistema y se reduzcan los tiempos de calentamiento del termotanque, a continuación, se presentan los resultados al optimizar el sistema de bomba de calor:

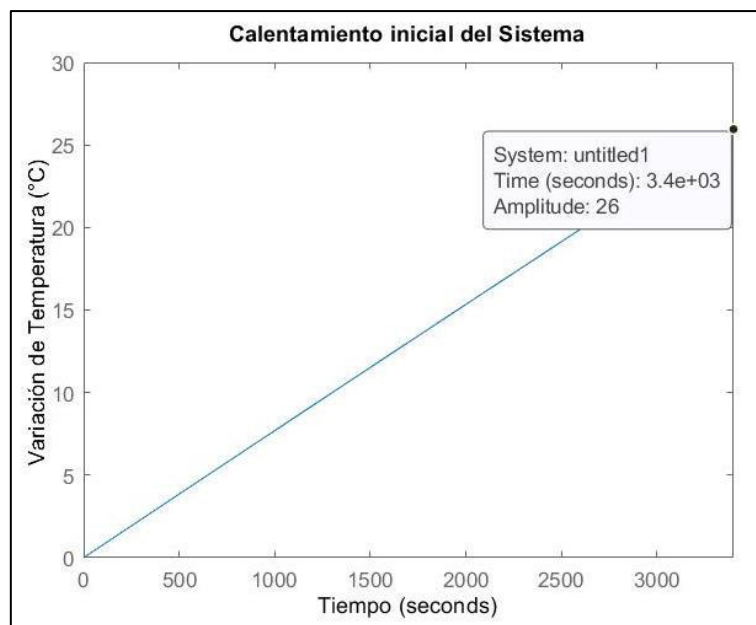


Figura 20. Calentamiento inicial del termotanque para el sistema de bomba de calor optimizado.

Fuente: Propia

Para este caso el calentamiento del termotanque se lleva a cabo alrededor de 3400 segundos lo cual equivale a 57 minutos aproximadamente lo cual es un tiempo muy inferior a lo obtenido preliminarmente.

En cuanto al control analógico de temperatura del sistema, se obtiene una notable mejoría dado que el tiempo de estabilización del sistema presenta una disminución de casi el 50%, ya que el sistema se estabiliza alrededor de 1000 segundos lo que equivale aproximadamente a 17 minutos.

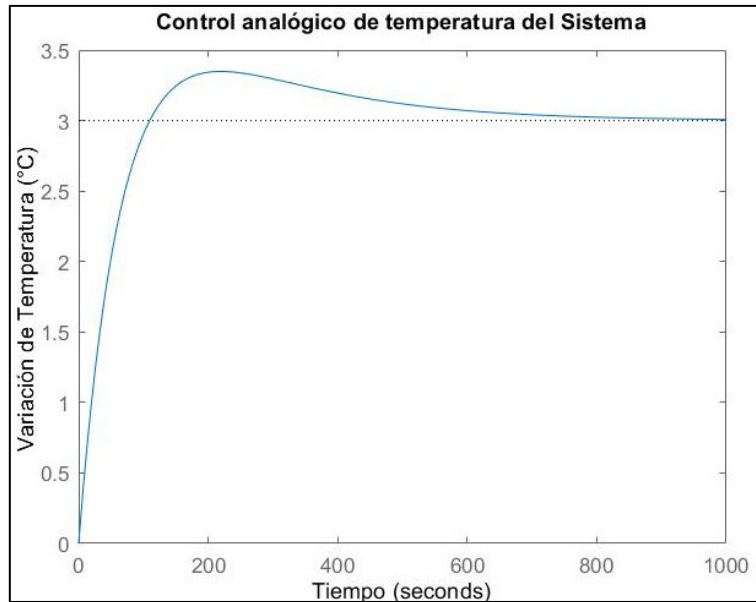


Figura 21. Control analógico de temperatura del sistema de bomba de calor optimizado.

Fuente: Propia

La visualización en cuanto a mejora de parámetros de funcionamiento del sistema, se lo evidencia de mejor manera en la siguiente tabla:

Tabla 15. Parámetros optimizados del sistema bomba de calor

Parámetro	Parámetro Inicial	Parámetro optimizado	Porcentaje de optimización
Coeficiente de desempeño	4.75	8.8709	86.76%
Eficiencia exergética	38.83 %	72.52 %	86.76%
Pérdidas en el sistema	18.5538[W]	8.8212[W]	52.46%
Tiempo de respuesta del sistema en lazo abierto.	6600 [s]	3400 [s]	48.48%
Tiempo de respuesta del sistema en lazo cerrado.	2000 [s]	1000 [s]	50.00 %

(Fuente: Propia)

La optimización del sistema ha llevado a una mejora considerable de operación ya que la mayoría de los parámetros presentan un porcentaje de optimización mayor al 50% lo que equivale a mejores prestaciones de funcionamiento del sistema; reduciendo las pérdidas de calor y aumentando con ello la eficiencia del sistema.

3.2 Conclusiones

Los objetivos propuestos en el presente trabajo de titulación se cumplieron a cabalidad dado que el sistema inicial fue optimizado de tal manera que se obtuvo un mejor aprovechamiento energético, dando como resultado un mayor coeficiente de desempeño del sistema y una mayor eficiencia exergética.

La asistencia solar en el evaporador del sistema, el aislante que recubre al termotanque almacenador de agua que es de poliuretano expandido y un espesor de 14 cm del aislante son parámetros que optimizan el aprovechamiento energético de la bomba de calor; estos parámetros mejoran el coeficiente de desempeño y la eficiencia exergética del sistema en más de un 50%.

Al considerar el potencial solar de la serranía ecuatoriana, la cual viene determinada gracias a la privilegiada ubicación del país el cual se encuentra justo en la línea Equinoccial; da la posibilidad de aplicar métodos de mejora para los sistemas de bombas de calor, tal es el caso de instalar un colector solar que asista al evaporador y con ello aumente el calor entregado por parte del condensador y a su vez mejore la eficiencia del sistema; todo esto con la misma potencia absorbida del compresor del refrigerante.

Con la aplicación de Matlab, se ejecutó y desarrolló el enfoque mecatrónico del sistema, donde el cual consistió en el control de temperatura del producto que se desea entregar; todo este enfoque puede ser usado en un sin número de aplicaciones de la bomba de calor ya sea para uso de agua caliente sanitaria, calefacción de hogares por medio de un radiador o en sistemas de refrigeración doméstica.

Uno de los mejores aislantes para aplicaciones en sistemas de calefacción que pueden ser encontrados en el mercado es el poliuretano expandido, el cual minimiza al máximo las pérdidas de calor por convección que pueden existir en elementos que tienen como función mantener el calor de sus productos.

La modelación en lazo abierto del sistema de bomba de calor, el cual determina el calentamiento inicial al elemento que se desea entregar calor; presenta una notable disminución del tiempo que lleva el proceso de calentamiento en los casos de variación de parámetros donde se considera la asistencia de un colector solar en el evaporador, obteniéndose una reducción de alrededor la mitad del tiempo de calentamiento que le lleva a una bomba de calor de tipo convencional.

La modelación en lazo cerrado del sistema de bomba de calor, el cual representa el control de la temperatura del sistema; en todos los casos que se presentó en la variación de

parámetros a optimizar, se obtuvo el mismo resultado ya que la temperatura de consigna fue de 3 [°C], pero la diferencia de este resultado con el resultado preliminar del sistema se fundamentó en disminuir el tiempo de respuesta del controlador para el alcance de la consigna de temperatura.

3.3 Recomendaciones

Tomar en cuenta que la aplicación de un sistema de calor optimizado mediante la aplicación de asistencia solar por medio de un colector solar en el evaporador solo va enfocado a la región interandina del Ecuador ya que presenta valores adecuados de radiación solar que alcanzan casi los 6.3 kWh/m² de irradiación solar.

Se recomienda la realización a futuro de pruebas de optimización del sistema considerando diferentes tipos de aislantes para comprobar si el aislante de poliuretano expandido es la mejor opción para un termotanque en una bomba de calor que provea agua caliente sanitaria.

En un estudio a futuro deberá estudiarse el comportamiento del sistema de bomba de calor con asistencia solar utilizando otro tipo de refrigerante del sistema para observar el desenvolvimiento del equipo en cuanto a la capacidad y trabajo que realizado por el compresor.

Se recomienda seguir con el estudio de aplicaciones de bombas de calor para sus posteriores optimizaciones, dado que este tipo de tecnologías no se encuentran plenamente desarrollados en el país y a más de ello presentan un sin número de aplicaciones en el campo industrial.

Para estudios posteriores se recomienda la aplicación de asistencia geotérmica en el evaporador para con ello visualizar el trabajo realizado por la bomba de calor y determinar las diferencias existentes entre este tipo de asistencia y la asistencia solar.

4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Cengel, Y., & Boles, M. (2012). *Termodinámica* (Séptima ed.). México, D.F.: Mc Grawhill.
- DuPont Suva. (2004). *DuPont HFC-134a Properties, Uses, Storage, and Handling*. Obtenido de <https://www.general-refrigeration.gr/images/eshop/catalog/products/0454/files/R134a%20information.pdf>
- Espiñeira, P. (22 de Septiembre de 2015). *Funcionamiento de la bomba de calor para calefacción y agua caliente*. Obtenido de <https://www.caloryfrio.com/calefaccion/bomba-de-calor/bomba-de-calor.html>
- Hernández, L., & Lobato, C. (Septiembre de 2020). *Análisis y simulación mediante fluent de ANSYS del proceso de condensación por convección forzada con ventiladores axiales en refrigeradores domésticos de hasta 500 litros de capacidad*. Obtenido de <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/19271/1/UPS%20-%20TTS161.pdf>
- Moreno, A. (Septiembre de 2013). *Modelo teórico y validación experimental de una bomba de calor de expansión directa con asistencia solar: eficiencia energética*. Obtenido de https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/17910/tesis_amancio_moreno_rodriguez_2013.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Muñoz, C. (2020). *Evaluación técnica y económica de bombas de calor asistidas por energía solar en expansión directa, para producción de agua caliente sanitaria*. Obtenido de <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/176066/Evaluaci%3%b3n-t%3%a9cnica-y-econ%3%b3mica-de-bombas-de-calor-asistidas-por-energ%3%ada-solar-en-expansi%3%b3n-directa.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Rodriguez, J. (1990). *INTRODUCCIÓN A LA TERMODINÁMICA CON ALGUNAS APLICACIONES DE INGENIERÍA*. México: Universidad Tecnológica Nacional.
- Vaca, D., & Ordoñez, F. (2019). *MAPA SOLAR del Ecuador 2019*. Obtenido de https://www.ingenieriaverde.org/wp-content/uploads/2020/01/Mapa_Solar_del_Ecuador_2019.pdf

5 ANEXOS

ANEXO I.

Código de programación en EES para la obtención de variables termodinámicas del sistema

$$T_{ev} = 10 [C]$$

$$T_{con} = 60 [C]$$

$$P_{ev} = P_{sat}(R134a;T=T_{ev})$$

$$P_{cond} = 1890,99 [kPa]$$

$$h_1 = \text{Enthalpy}(R134a;T=T_{ev};x=1)$$

$$s_1 = \text{Entropy}(R134a;T=T_{ev};x=1)$$

$$s_2 = s_1$$

$$h_2 = \text{Enthalpy}(R134a;s=s_2;P=P_{cond})$$

$$h_3 = \text{Enthalpy}(R134a;T=T_{con};P=P_{cond})$$

$$h_4 = h_3$$

ANEXO II.

Código de programación en MATLAB del sistema preliminar de bomba de calor

```
%-----MODELACION DE BOMBA DE CALOR-----%
%
%Parámetro a variar: Tipo de aislante Poliuretano expandido
clear all;
%Parámetros iniciales de funcionamiento de la bomba de calor
Tamb = 19; % Temperatura del ambiente[°C]
Taf = 14; % Temperatura agua fria [°C]
Tac = 45; % Temperatura agua caliente [°C]
me = 300; % masa de agua contenida en el termotanque[kg]
Cpe = 4180; % Calor específico del agua [J/kg*K]
kacero = 14.9; % conductividad termica pared de acero AISI 304 del termotanque[w/mK]
esp_acero = 0.0035; % espesor placa de acero [m]
kais = 0.023; % conductividad termica del aislante del termotanque[w/mK]
esp_ais = 0.08; % espesor aislante [m]
Altura = 2; % altura del termotanque [m]
diametroT = 0.5; % altura del termotanque [m]
haire = 7.3019; % coeficiente de convección natural del aire [w/m2K]
r4 = diametroT/2; % radio del termotanque [m]
r3 = r4-esp_acero; % radio del termotanque sin el espesor de la placa de acero exterior [m]
r2 = r4-esp_acero-esp_ais; % radio del termotanque sin el espesor de la placa de acero
exterior y aislante [m]
r1 = r4-esp_acero-esp_ais-esp_acero; % radio del termotanque sin los espesores de las
placas de acero y aislante [m]

%Cálculo de pérdidas de calor en el termotanque por convección
Rkaceroint = (log(r2/r1))/(2*pi*Altura*kacero); % resistencia térmica de la placa de acero
interior [K/W]
Rkais = (log(r3/r2))/(2*pi*Altura*kais); % resistencia térmica del aislamiento [K/W]
Rkaceroext = (log(r4/r3))/(2*pi*Altura*kacero); % resistencia térmica de la placa de acero
exterior [K/W]
Rhaire = 1/(2*pi*Altura*r4*haire); % resistencia térmica de conveccion por el aire [K/W]
Rtotal= (Rkaceroint + Rkais + Rkaceroext +Rhaire); % resistencia térmica total del
termotanque [K/W]
Perd = ((Tac-Tamb)/Rtotal) % Perdidas de calor en el termotanque por conveccion [W]

%Condiciones termodinámicas del sistema
hcond_in = 287.4; %Entalpia a la entrada del condensador [kJ/kg]
hcond_out = 139.2; %Entalpia a la salida del condensador [kJ/kg]
hevap_in = 139.2; %Entalpia a la entrada del evaporador [kJ/kg]
hevap_out = 256.2; %Entalpia a la salida del evaporador [kJ/kg]
hcomp_in = 256.2; %Entalpia a la entrada del compresor [kJ/kg]
hcomp_out = 287.4; %Entalpia a la salida del compresor [kJ/kg]
mfr = 0.035; %Flujo masico del refrigerante [kg/s]
%Cálculo de la carga del Condensador, Evaporador y Compresor
Qcond = mfr*(hcond_in-hcond_out)*1000 %Flujo de calor en el condensador y Potencia de
calentamiento [W]
Qevap = mfr*(hevap_out-hevap_in)*1000 %Flujo de calor en el evaporador [W]
Qcomp = mfr*(hcomp_out-hcomp_in)*1000 %Potencia Compresor[W]

% MODELO EN ESPACIO DE ESTADOS
```

```

A=[-Perd/(me*Cpe)];
B=[1/(me*Cpe)];
C=[1];
D=[0];
SS=ss(A,B,C,D);
GP=tf(SS);

% COMPORTAMIENTO TERMODINÁMICO

% lazo abierto
Gp1 = GP(1,1);
%consignadeltaT = Tac-Tamb = 26 % Delta temperatura Termotanque/ambiente [°C]
pause
step(Qcond*Gp1,6600);
ylabel('Variación de Temperatura (°C)')
xlabel('Tiempo')
title('Calentamiento inicial del Sistema')
pause

% lazo cerrado
DeltaT = 3; %Delta de temperatura de control del sistema [°C]
[Gc, info] = pidtune(Gp1, 'PID', 0.01)
H = feedback(Gp1*Gc,1)
step(DeltaT*H)
ylabel('Variación de Temperatura (°C)')
xlabel('Tiempo')
title('Control analógico de temperatura del Sistema')

% Análisis energético
COP = Qcond/Qcomp % Coeficiente de desempeño del sistema

% Análisis exerético
COPrev = 1/(1-((Tamb+273)/(Tac+273)))% Coeficiente de desempeño reversible del sistema
Efi_exer = (COP/COPrev)*100 %Eficiencia exerética del sistema

```

ANEXO III.

Código de programación en MATLAB del sistema de bomba de calor con asistencia solar

```
%-----MODELACION DE BOMBA DE CALOR ASISTENCIA SOLAR-----  
---%  
%  
%Parámetro a variar: Tipo de aislante Poliuretano expandido  
%longitud de espesor: 8cm  
clear all;  
%Parámetros iniciales de funcionamiento de la bomba de calor  
Tamb = 19; % Temperatura del ambiente[°C]  
Taf = 14; % Temperatura agua fria [°C]  
Tac = 45; % Temperatura agua caliente [°C]  
consignadeltaT = Tac-Tamb; % Delta temperatura Termostato/ambiente oC  
me = 300; % masa de agua contenida en el termostato[kg]  
Cpe = 4180; % Calor específico del agua [J/kg*K]  
kacero = 14.9; % conductividad termica pared de acero AISI 304 del termostato[w/mK]  
esp_acero = 0.0035; % espesor placa de acero [m]  
kais = 0.023; % conductividad termica del aislante del termostato[w/mK]  
esp_ais = 0.08; % espesor aislante [m]  
Altura = 2; % altura del termostato [m]  
diametroT = 0.5; % altura del termostato [m]  
haire = 7.3019; % coeficiente de convección natural del aire [W/m2K]  
r4 = diametroT/2; % radio del termostato [m]  
r3 = r4-esp_acero; % radio del termostato sin el espesor de la placa de acero exterior [m]  
r2 = r4-esp_acero-esp_ais; % radio del termostato sin el espesor de la placa de acero  
exterior y aislante [m]  
r1 = r4-esp_acero-esp_ais-esp_acero; % radio del termostato sin los espesores de las  
placas de acero y aislante [m]  
  
%Cálculo de pérdidas de calor en el termostato por convección  
Rkaceroint = (log(r2/r1))/(2*pi*Altura*kacero); % resistencia térmica de la placa de acero  
interior [K/W]  
Rkais = (log(r3/r2))/(2*pi*Altura*kais); % resistencia térmica del aislamiento [K/W]  
Rkaceroext = (log(r4/r3))/(2*pi*Altura*kacero); % resistencia térmica de la placa de acero  
exterior [K/W]  
Rhaire = 1/(2*pi*Altura*r4*haire); % resistencia térmica de conveccion por el aire [K/W]  
Rtotal= (Rkaceroint + Rkais + Rkaceroext +Rhaire); % resistencia térmica total del  
termostato [K/W]  
Perd = ((Tac-Tamb)/Rtotal); % Perdidas de calor en el termostato por conveccion [W]  
  
%cálculos provistos por la asistencia solar en el evaporador  
DNI = 5400; % Irradiacion solar directa normal por año en la Serranía ecuatoriana en  
promedio [W*h/m2*dia]  
ATT = 5; % Area de transferencia de calor en el colector solar [m2]  
Hsol = 6; % Horas de sol en promedio [h]  
Grad = (DNI*ATT)/Hsol; % Flujo de calor por radiación  
  
%Condiciones termodinámicas del sistema  
hcond_in = 287.4; %Entalpia a la entrada del condensador [kJ/kg]  
hcond_out = 139.2; %Entalpia a la salida del condensador [kJ/kg]  
hevap_in = 139.2; %Entalpia a la entrada del evaporador [kJ/kg]  
hevap_out = 256.2; %Entalpia a la salida del evaporador [kJ/kg]
```



```

hcomp_in = 256.2; %Entalpia a la entrada del compresor [kJ/Kg]
hcomp_out = 287.4; %Entalpia a la salida del compresor [kJ/Kg]
mfr = 0.035; %Flujo masico del refrigerante [kg/s]
%Cálculo de la carga del Condensador, Evaporador y Compresor
Qcond = mfr*(hcond_in-hcond_out)*1000; %Flujo de calor en el condensador y Potencia de
calentamiento [W]
Qevap = mfr*(hevap_out-hevap_in)*1000; %Flujo de calor en el evaporador [W]
Qcomp = mfr*(hcomp_out-hcomp_in)*1000; %Potencia Compresor[W]

%Cálculo de los componente considerando asistencia solar
QevapAS = Qevap+Qrad %Flujo de calor en el evaporador con asistencia solar [W]
QcondAS = QevapAS+Qcomp %Potencia calorífica en el condensador con asistencia solar [W]

% MODELO EN ESPACIO DE ESTADOS
A=[-Perd/(me*Cpe)];
B=[1/(me*Cpe)];
C=[1];
D=[0];
SS=ss(A,B,C,D);
GP=tf(SS);

% COMPORTAMIENTO TERMODINÁMICO

% lazo abierto
Gp1 = GP(1,1);
%consignadeltaT = Tac-Tamb = 26 % Delta temperatura Termotanque/ambiente [°C]
pause
step(QcondAS*Gp1,3450);
ylabel('Variación de Temperatura (°C)')
xlabel('Tiempo')
title('Calentamiento inicial del Sistema')
pause

% lazo cerrado
DeltaT = 3; %Delta de temperatura de control del sistema [°C]
[Gc, info] = pidtune(Gp1, 'PID', 0.01)
H = feedback(Gp1*Gc,1)
step(DeltaT*H)
ylabel('Variación de Temperatura (°C)')
xlabel('Tiempo')
title('Control analógico de temperatura del Sistema')

% Análisis energético
COPAS = QcondAS/Qcomp % Coeficiente de desempeño del sistema

% Análisis exergético
COPrev = 1/(1-((Tamb+273)/(Tac+273)))% Coeficiente de desempeño reversible del sistema
Efi_exer = (COPAS/COPrev)*100 %Eficiencia exergética del sistema

```

ANEXO IV.

Código de programación en MATLAB del análisis de sensibilidad de la bomba de calor sin asistencia solar con aislante tipo poliuretano expandido variando el tamaño del espesor del aislante

```
% GRÁFICAS ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD %
clear all
clc
% Sistema de Bomba de calor sin Asistencia Solar_Parámetro de variación espesor del
poliuretano %
%Condiciones termodinámicas del sistema
hcond_in = 287.4; %Entalpia a la entrada del condensador [kJ/kg]
hcond_out = 139.2; %Entalpia a la salida del condensador [kJ/kg]
hevap_in = 139.2; %Entalpia a la entrada del evaporador [kJ/kg]
hevap_out = 256.2; %Entalpia a la salida del evaporador [kJ/kg]
hcomp_in = 256.2; %Entalpia a la entrada del compresor [kJ/kg]
hcomp_out = 287.4; %Entalpia a la salida del compresor [kJ/kg]
mfr = 0.035; %Flujo masico del refrigerante [kg/s]
%Cálculo de la carga del Condensador, Evaporador y Compresor
Qcond = mfr*(hcond_in-hcond_out)*1000, %Flujo de calor en el condensador y Potencia de
calentamiento [W]
Qevap = mfr*(hevap_out-hevap_in)*1000; %Flujo de calor en el evaporador [W]
Qcomp = mfr*(hcomp_out-hcomp_in)*1000; %Potencia Compresor[W]

%-----Espesor del aislante de 8 cm-----
%
Tamb = 19; % Temperatura del ambiente[°C]
Taf = 14; % Temperatura agua fria [°C]
Tac = 45; % Temperatura agua caliente [°C]
me = 300; % masa de agua contenida en el termotanque[kg]
Cpe = 4180; % Calor específico del agua [J/kg*K]
kacero = 14.9; % conductividad termica pared de acero AISI 304 del termotanque[w/mK]
esp_acero = 0.0035; % espesor placa de acero [m]
kais = 0.023; % conductividad termica del aislante del termotanque[w/mK]
esp_aisl = 0.08; % espesor aislante [m]
Altura = 2; % altura del termotanque [m]
diametroT = 0.5; % altura del termotanque [m]
haire = 7.3019; % coeficiente de convección natural del aire [w/m2K]
r41 = diametroT/2; % radio del termotanque [m]
r31 = r41-esp_acero; % radio del termotanque sin el espesor de la placa de acero exterior
[m]
r21 = r41-esp_acero-esp_aisl; % radio del termotanque sin el espesor de la placa de acero
exterior y aislante [m]
r11 = r41-esp_acero-esp_aisl-esp_acero; % radio del termotanque sin los espesores de las
placas de acero y aislante [m]

%Cálculo de pérdidas de calor en el termotanque por convección
Rkaceroint1 = (log(r21/r11))/(2*pi*Altura*kacero); % resistencia térmica de la placa de
acero interior [K/W]
Rkais1 = (log(r31/r21))/(2*pi*Altura*kais); % resistencia térmica del aislamiento [K/W]
Rkaceroext1 = (log(r41/r31))/(2*pi*Altura*kacero); % resistencia térmica de la placa de
```

```

acero exterior [K/W]
Rhaire1 = 1/(2*pi*Altura*r41*haire); % resistencia térmica de conveccion por el aire [K/W]
Rtotal1= (Rkaceroint1 + Rkais1 + Rkaceroext1 +Rhaire1); % resistencia térmica total del
termotanque [K/W]
Perd1 = ((Tac-Tamb)/Rtotal1) % Perdidas de calor en el termotanque por conveccion [W]

%-----Espesor del aislante de 10 cm-----
%-----%

esp_ais2 = 0.10; % espesor aislante [m]
r42 = diametroT/2; % radio del termotanque [m]
r32 = r42-esp_acero; % radio del termotanque sin el espesor de la placa de acero exterior
[m]
r22 = r42-esp_acero-esp_ais2; % radio del termotanque sin el espesor de la placa de acero
exterior y aislante [m]
r12 = r42-esp_acero-esp_ais2-esp_acero; % radio del termotanque sin los espesores de las
placas de acero y aislante [m]

%Cálculo de pérdidas de calor en el termotanque por convección
Rkaceroint2 = (log(r22/r12))/(2*pi*Altura*kacero); % resistencia térmica de la placa de
acero interior [K/W]
Rkais2 = (log(r32/r22))/(2*pi*Altura*kais); % resistencia térmica del aislamiento [K/W]
Rkaceroext2 = (log(r42/r32))/(2*pi*Altura*kacero); % resistencia térmica de la placa de
acero exterior [K/W]
Rhaire2 = 1/(2*pi*Altura*r42*haire); % resistencia térmica de conveccion por el aire [K/W]
Rtotal2= (Rkaceroint2 + Rkais2 + Rkaceroext2 +Rhaire2); % resistencia térmica total del
termotanque [K/W]
Perd2 = ((Tac-Tamb)/Rtotal2); % Perdidas de calor en el termotanque por conveccion [W]

%-----Espesor del aislante de 12 cm-----
%-----%

esp_ais3 = 0.12; % espesor aislante [m]
r43 = diametroT/2; % radio del termotanque [m]
r33 = r43-esp_acero; % radio del termotanque sin el espesor de la placa de acero exterior
[m]
r23 = r43-esp_acero-esp_ais3; % radio del termotanque sin el espesor de la placa de acero
exterior y aislante [m]
r13 = r43-esp_acero-esp_ais3-esp_acero; % radio del termotanque sin los espesores de las
placas de acero y aislante [m]

%Cálculo de pérdidas de calor en el termotanque por convección
Rkaceroint3 = (log(r23/r13))/(2*pi*Altura*kacero); % resistencia térmica de la placa de
acero interior [K/W]
Rkais3 = (log(r33/r23))/(2*pi*Altura*kais); % resistencia térmica del aislamiento [K/W]
Rkaceroext3 = (log(r43/r33))/(2*pi*Altura*kacero); % resistencia térmica de la placa de
acero exterior [K/W]
Rhaire3 = 1/(2*pi*Altura*r43*haire); % resistencia térmica de conveccion por el aire [K/W]
Rtotal3= (Rkaceroint3 + Rkais3 + Rkaceroext3 +Rhaire3); % resistencia térmica total del
termotanque [K/W]
Perd3 = ((Tac-Tamb)/Rtotal3); % Perdidas de calor en el termotanque por conveccion [W]

%-----Espesor del aislante de 14 cm-----
%-----%

esp_ais4 = 0.14; % espesor aislante [m]

```

```

r44 = diametroT/2; % radio del termotanque [m]
r34 = r44-esp_acero; % radio del termotanque sin el espesor de la placa de acero exterior [m]
r24 = r44-esp_acero-esp_ais4; % radio del termotanque sin el espesor de la placa de acero exterior y aislante [m]
r14 = r44-esp_acero-esp_ais4-esp_acero; % radio del termotanque sin los espesores de las placas de acero y aislante [m]

%Cálculo de pérdidas de calor en el termotanque por convección
Rkaceroint4 = (log(r24/r14))/(2*pi*Altura*kacero); % resistencia térmica de la placa de acero interior [K/W]
Rkais4 = (log(r34/r24))/(2*pi*Altura*kais); % resistencia térmica del aislamiento [K/W]
Rkaceroext4 = (log(r44/r34))/(2*pi*Altura*kacero); % resistencia térmica de la placa de acero exterior [K/W]
Rhaire4 = 1/(2*pi*Altura*r44*haire); % resistencia térmica de conveccion por el aire [K/W]
Rtotal4=(Rkaceroint4 + Rkais4 + Rkaceroext4 +Rhaire4); % resistencia térmica total del termotanque [K/W]
Perd4 = ((Tac-Tamb)/Rtotal4); % Perdidas de calor en el termotanque por convencion [W]

%----- MODELO EN ESPACIO DE ESTADOS-----%
A1 = [-Perd1/(me*Cpe)];
A2 = [-Perd2/(me*Cpe)];
A3 = [-Perd3/(me*Cpe)];
A4 = [-Perd4/(me*Cpe)];
B1 = [1/(me*Cpe)];
B2 = [1/(me*Cpe)];
B3 = [1/(me*Cpe)];
B4 = [1/(me*Cpe)];

C = [1];
D = [0];
SS1 = ss(A1, B1, C, D);
SS2 = ss(A2, B2, C, D);
SS3 = ss(A3, B3, C, D);
SS4 = ss(A4, B4, C, D);

GP11 = tf(SS1);
GP22 = tf(SS2);
GP33 = tf(SS3);
GP44 = tf(SS4);

Gp1 = GP11(1,1);
Gp2 = GP22(1,1);
Gp3 = GP33(1,1);
Gp4 = GP44(1,1);

% CONTROL EN LAZO ABIERTO (TERMOSTATO)
% Potencia de calentamiento del agua
% DeltaT = 26 [°C]

step(Qcond*Gp1,6600);
title('Calentamiento inicial del sistema')
xlabel('Tiempo')
ylabel('Variación de Temperatura (°C)')

hold on
step(Qcond*Gp2,6530);

```

```
step(Qcond*Gp3,6470);
step(Qcond*Gp4,6420);
```

ANEXO V.

Código de programación en MATLAB del análisis de sensibilidad de la bomba de calor sin asistencia solar con aislante tipo corcho variando el tamaño del espesor del aislante

```
% GRÁFICAS ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD %
clear all
clc
% Sistema de Bomba de calor sin Asistencia Solar_Parámetro de variación espesor del corcho
%

%Condiciones termodinámicas del sistema
hcond_in = 287.4; %Entalpia a la entrada del condensador [kJ/Kg]
hcond_out = 139.2; %Entalpia a la salida del condensador [kJ/Kg]
hevap_in = 139.2; %Entalpia a la entrada del evaporador [kJ/Kg]
hevap_out = 256.2; %Entalpia a la salida del evaporador [kJ/Kg]
hcomp_in = 256.2; %Entalpia a la entrada del compresor [kJ/Kg]
hcomp_out = 287.4; %Entalpia a la salida del compresor [kJ/Kg]
mfr = 0.035; %Flujo masico del refrigerante [kg/s]
%Cálculo de la carga del Condensador, Evaporador y Compresor
Qcond = mfr*(hcond_in-hcond_out)*1000, %Flujo de calor en el condensador y Potencia de calentamiento [W]
Qevap = mfr*(hevap_out-hevap_in)*1000; %Flujo de calor en el evaporador [W]
Qcomp = mfr*(hcomp_out-hcomp_in)*1000; %Potencia Compresor[W]

%-----Espesor del aislante de 8 cm-----%
%-----%
Tamb = 19; % Temperatura del ambiente[°C]
Taf = 14; % Temperatura agua fria [°C]
Tac = 45; % Temperatura agua caliente [°C]
me = 300; % masa de agua contenida en el termotanque[kg]
Cpe = 4180; % Calor específico del agua [J/kg*K]
kacero = 14.9; % conductividad termica pared de acero AISI 304 del termotanque[W/mK]
esp_acero = 0.0035; % espesor placa de acero [m]
kais = 0.039; % conductividad termica del aislante del termotanque[W/mK]
esp_aisl = 0.08; % espesor aislante [m]
Altura = 2; % altura del termotanque [m]
diametroT = 0.5; % altura del termotanque [m]
haire = 7.3019; % coeficiente de convección natural del aire [W/m2K]
r41 = diametroT/2; % radio del termotanque [m]
r31 = r41-esp_acero; % radio del termotanque sin el espesor de la placa de acero exterior [m]
r21 = r41-esp_acero-esp_aisl; % radio del termotanque sin el espesor de la placa de acero exterior y aislante [m]
r11 = r41-esp_acero-esp_aisl-esp_acero; % radio del termotanque sin los espesores de las placas de acero y aislante [m]

%Cálculo de pérdidas de calor en el termotanque por convección
Rkaceroint = (log(r21/r11))/(2*pi*Altura*kacero); % resistencia térmica de la placa de
```

```

acero interior [K/W]
Rkais = (log(r31/r21))/(2*pi*Altura*kais); % resistencia térmica del aislamiento [K/W]
Rkaceroext = (log(r41/r31))/(2*pi*Altura*kacero); % resistencia térmica de la placa de
acero exterior [K/W]
Rhaire = 1/(2*pi*Altura*r41*haire); % resistencia térmica de conveccion por el aire [K/W]
Rtotal1= (Rkaceroext + Rkais + Rkaceroext +Rhaire); % resistencia térmica total del
termotanque [K/W]
Perd1 = ((Tac-Tamb)/Rtotal1) % Perdidas de calor en el termotanque por conveccion [W]

%-----Espesor del aislante de 10 cm-----
-----%

esp_ais2 = 0.10; % espesor aislante [m]
r42 = diametroT/2; % radio del termotanque [m]
r32 = r42-esp_acero; % radio del termotanque sin el espesor de la placa de acero exterior
[m]
r22 = r42-esp_acero-esp_ais2; % radio del termotanque sin el espesor de la placa de acero
exterior y aislante [m]
r12 = r42-esp_acero-esp_ais2-esp_acero; % radio del termotanque sin los espesores de las
placas de acero y aislante [m]

%Cálculo de pérdidas de calor en el termotanque por convección%
Rkaceroext = (log(r22/r12))/(2*pi*Altura*kacero); % resistencia térmica de la placa de
acero interior [K/W]
Rkais = (log(r32/r22))/(2*pi*Altura*kais); % resistencia térmica del aislamiento [K/W]
Rkaceroext = (log(r42/r32))/(2*pi*Altura*kacero); % resistencia térmica de la placa de
acero exterior [K/W]
Rhaire = 1/(2*pi*Altura*r42*haire); % resistencia térmica de conveccion por el aire [K/W]
Rtotal2= (Rkaceroext + Rkais + Rkaceroext +Rhaire); % resistencia térmica total del
termotanque [K/W]
Perd2 = ((Tac-Tamb)/Rtotal2); % Perdidas de calor en el termotanque por conveccion [W]

%-----Espesor del aislante de 12 cm-----
-----%

esp_ais3 = 0.12; % espesor aislante [m]
r43 = diametroT/2; % radio del termotanque [m]
r33 = r43-esp_acero; % radio del termotanque sin el espesor de la placa de acero exterior
[m]
r23 = r43-esp_acero-esp_ais3; % radio del termotanque sin el espesor de la placa de acero
exterior y aislante [m]
r13 = r43-esp_acero-esp_ais3-esp_acero; % radio del termotanque sin los espesores de las
placas de acero y aislante [m]

%Cálculo de pérdidas de calor en el termotanque por convección
Rkaceroext = (log(r23/r13))/(2*pi*Altura*kacero); % resistencia térmica de la placa de
acero interior [K/W]
Rkais = (log(r33/r23))/(2*pi*Altura*kais); % resistencia térmica del aislamiento [K/W]
Rkaceroext = (log(r43/r33))/(2*pi*Altura*kacero); % resistencia térmica de la placa de
acero exterior [K/W]
Rhaire = 1/(2*pi*Altura*r43*haire); % resistencia térmica de conveccion por el aire [K/W]
Rtotal3= (Rkaceroext + Rkais + Rkaceroext +Rhaire); % resistencia térmica total del
termotanque [K/W]
Perd3 = ((Tac-Tamb)/Rtotal3); % Perdidas de calor en el termotanque por conveccion [W]

%-----Espesor del aislante de 14 cm-----

```

```

-----%

esp_ais4 = 0.14; % espesor aislante [m]
r44 = diametroT/2; % radio del termotanque [m]
r34 = r44-esp_acero; % radio del termotanque sin el espesor de la placa de acero exterior [m]
r24 = r44-esp_acero-esp_ais4; % radio del termotanque sin el espesor de la placa de acero exterior y aislante [m]
r14 = r44-esp_acero-esp_ais4-esp_acero; % radio del termotanque sin los espesores de las placas de acero y aislante [m]

%Cálculo de pérdidas de calor en el termotanque por convección
Rkaceroint = (log(r24/r14))/(2*pi*Altura*kacero); % resistencia térmica de la placa de acero interior [K/W]
Rkais = (log(r34/r24))/(2*pi*Altura*kais); % resistencia térmica del aislamiento [K/W]
Rkaceroext = (log(r44/r34))/(2*pi*Altura*kacero); % resistencia térmica de la placa de acero exterior [K/W]
Rhaire = 1/(2*pi*Altura*r44*haire); % resistencia térmica de conveccion por el aire [K/W]
Rtotal4= (Rkaceroint + Rkais + Rkaceroext +Rhaire); % resistencia térmica total del termotanque [K/W]
Perd4 = ((Tac-Tamb)/Rtotal4) % Perdidas de calor en el termotanque por conveccion [W]

%----- MODELO EN ESPACIO DE ESTADOS-----%
A1 = [-Perd1/(me*Cpe)];
A2 = [-Perd2/(me*Cpe)];
A3 = [-Perd3/(me*Cpe)];
A4 = [-Perd4/(me*Cpe)];
B1 = [1/(me*Cpe)];
B2 = [1/(me*Cpe)];
B3 = [1/(me*Cpe)];
B4 = [1/(me*Cpe)];

C = [1];
D = [0];
SS1 = ss(A1, B1, C, D);
SS2 = ss(A2, B2, C, D);
SS3 = ss(A3, B3, C, D);
SS4 = ss(A4, B4, C, D);

GP11 = tf(SS1);
GP22 = tf(SS2);
GP33 = tf(SS3);
GP44 = tf(SS4);

Gp1 = GP11(1,1);
Gp2 = GP22(1,1);
Gp3 = GP33(1,1);
Gp4 = GP44(1,1);

% CONTROL EN LAZO ABIERTO (TERMOSTATO)
% Potencia de calentamiento del agua
% DeltaT = 26 [°C]

step(Qcond*Gp1,6830);
title('Calentamiento inicial del sistema')
xlabel('Tiempo')
ylabel('Variación de Temperatura (°C)')

```

```

hold on
step(Qcond*Gp2, 6700);
step(Qcond*Gp3, 6600);
step(Qcond*Gp4, 6530);

```

ANEXO VI.

Código de programación en MATLAB del análisis de sensibilidad de la bomba de calor con asistencia solar con aislante tipo poliuretano expandido variando el tamaño del espesor del aislante

```

% GRÁFICAS ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD %
clear all
clc
% Sistema de Bomba de calor con Asistencia Solar_Parámetro de variación espesor del
poliuretano %
%cálculos provistos por la asistencia solar en el evaporador
DNI = 5400; % Irradiacion solar directa normal por año en la Serranía ecuatoriana en
promedio [w*h/m2*dia]
ATT = 5; % Area de transferencia de calor en el colector solar [m2]
Hsol = 6; % Horas de sol en promedio [h]
Qrad = (DNI*ATT)/Hsol; % Flujo de calor por radiación

%Condiciones termodinámicas del sistema
hcond_in = 287.4; %Entalpia a la entrada del condensador [kJ/kg]
hcond_out = 139.2; %Entalpia a la salida del condensador [kJ/kg]
hevap_in = 139.2; %Entalpia a la entrada del evaporador [kJ/kg]
hevap_out = 256.2; %Entalpia a la salida del evaporador [kJ/kg]
hcomp_in = 256.2; %Entalpia a la entrada del compresor [kJ/kg]
hcomp_out = 287.4; %Entalpia a la salida del compresor [kJ/kg]
mfr = 0.035; %Flujo masico del refrigerante [kg/s]
%Cálculo de la carga del Condensador, Evaporador y Compresor
Qcond = mfr*(hcond_in-hcond_out)*1000; %Flujo de calor en el condensador y Potencia de
calentamiento [W]
Qevap = mfr*(hevap_out-hevap_in)*1000; %Flujo de calor en el evaporador [W]
Qcomp = mfr*(hcomp_out-hcomp_in)*1000; %Potencia Compresor[W]

%Cálculo de los componente considerando asistencia solar
QevapAS = Qevap+Qrad %Flujo de calor en el evaporador con asistencia solar [W]
QcondAS = QevapAS+Qcomp %Potencia calorífica en el condensador con asistencia solar [W]

%-----Espesor del aislante de 8 cm-----
%
Tamb = 19; % Temperatura del ambiente[°C]
Taf = 14; % Temperatura agua fria [°C]
Tac = 45; % Temperatura agua caliente [°C]
me = 300; % masa de agua contenida en el termotanque[kg]
Cpe = 4180; % Calor específico del agua [J/kg*K]
kacero = 14.9; % conductividad termica pared de acero AISI 304 del termotanque[W/mK]
esp_acero = 0.0035; % espesor placa de acero [m]
kais = 0.023; % conductividad termica del aislante del termotanque[W/mK]

```



```

esp_ais1 = 0.08; % espesor aislante [m]
Altura = 2; % altura del termotanque [m]
diametroT = 0.5; % altura del termotanque [m]
haire = 7.3019; % coeficiente de convección natural del aire [W/m2K]
r41 = diametroT/2; % radio del termotanque [m]
r31 = r41-esp_acero; % radio del termotanque sin el espesor de la placa de acero exterior [m]
r21 = r41-esp_acero-esp_ais1; % radio del termotanque sin el espesor de la placa de acero exterior y aislante [m]
r11 = r41-esp_acero-esp_ais1-esp_acero; % radio del termotanque sin los espesores de las placas de acero y aislante [m]

%Cálculo de pérdidas de calor en el termotanque por convección
Rkaceroint1 = (log(r21/r11))/(2*pi*Altura*kacero); % resistencia térmica de la placa de acero interior [K/W]
Rkais1 = (log(r31/r21))/(2*pi*Altura*kais); % resistencia térmica del aislamiento [K/W]
Rkaceroext1 = (log(r41/r31))/(2*pi*Altura*kacero); % resistencia térmica de la placa de acero exterior [K/W]
Rhaire1 = 1/(2*pi*Altura*r41*haire); % resistencia térmica de conveccion por el aire [K/W]
Rtotal1= (Rkaceroint1 + Rkais1 + Rkaceroext1 +Rhaire1); % resistencia térmica total del termotanque [K/W]
Perd1 = ((Tac-Tamb)/Rtotal1) % Perdidas de calor en el termotanque por conveccion [W]

%-----Espesor del aislante de 10 cm-----
%-----%

esp_ais2 = 0.10; % espesor aislante [m]
r42 = diametroT/2; % radio del termotanque [m]
r32 = r42-esp_acero; % radio del termotanque sin el espesor de la placa de acero exterior [m]
r22 = r42-esp_acero-esp_ais2; % radio del termotanque sin el espesor de la placa de acero exterior y aislante [m]
r12 = r42-esp_acero-esp_ais2-esp_acero; % radio del termotanque sin los espesores de las placas de acero y aislante [m]

%Cálculo de pérdidas de calor en el termotanque por convección
Rkaceroint2 = (log(r22/r12))/(2*pi*Altura*kacero); % resistencia térmica de la placa de acero interior [K/W]
Rkais2 = (log(r32/r22))/(2*pi*Altura*kais); % resistencia térmica del aislamiento [K/W]
Rkaceroext2 = (log(r42/r32))/(2*pi*Altura*kacero); % resistencia térmica de la placa de acero exterior [K/W]
Rhaire2 = 1/(2*pi*Altura*r42*haire); % resistencia térmica de conveccion por el aire [K/W]
Rtotal2= (Rkaceroint2 + Rkais2 + Rkaceroext2 +Rhaire2); % resistencia térmica total del termotanque [K/W]
Perd2 = ((Tac-Tamb)/Rtotal2); % Perdidas de calor en el termotanque por conveccion [W]

%-----Espesor del aislante de 12 cm-----
%-----%

esp_ais3 = 0.12; % espesor aislante [m]
r43 = diametroT/2; % radio del termotanque [m]
r33 = r43-esp_acero; % radio del termotanque sin el espesor de la placa de acero exterior [m]
r23 = r43-esp_acero-esp_ais3; % radio del termotanque sin el espesor de la placa de acero exterior y aislante [m]
r13 = r43-esp_acero-esp_ais3-esp_acero; % radio del termotanque sin los espesores de las

```

placas de acero y aislante [m]

%Cálculo de pérdidas de calor en el termotanque por convección

Rkaceroint3 = (log(r23/r13))/(2*pi*Altura*kacero); % resistencia térmica de la placa de acero interior [K/W]

Rkais3 = (log(r33/r23))/(2*pi*Altura*kais); % resistencia térmica del aislamiento [K/W]

Rkaceroext3 = (log(r43/r33))/(2*pi*Altura*kacero); % resistencia térmica de la placa de acero exterior [K/W]

Rhaire3 = 1/(2*pi*Altura*r43*haire); % resistencia térmica de conveccion por el aire [K/W]

Rtotal3= (Rkaceroint3 + Rkais3 + Rkaceroext3 +Rhaire3); % resistencia térmica total del termotanque [K/W]

Perd3 = ((Tac-Tamb)/Rtotal3); % Perdidas de calor en el termotanque por convencion [W]

%-----Espesor del aislante de 14 cm-----
-----%

esp_ais4 = 0.14; % espesor aislante [m]

r44 = diametroT/2; % radio del termotanque [m]

r34 = r44-esp_acero; % radio del termotanque sin el espesor de la placa de acero exterior [m]

r24 = r44-esp_acero-esp_ais4; % radio del termotanque sin el espesor de la placa de acero exterior y aislante [m]

r14 = r44-esp_acero-esp_ais4-esp_acero; % radio del termotanque sin los espesores de las placas de acero y aislante [m]

%Cálculo de pérdidas de calor en el termotanque por convección

Rkaceroint4 = (log(r24/r14))/(2*pi*Altura*kacero); % resistencia térmica de la placa de acero interior [K/W]

Rkais4 = (log(r34/r24))/(2*pi*Altura*kais); % resistencia térmica del aislamiento [K/W]

Rkaceroext4 = (log(r44/r34))/(2*pi*Altura*kacero); % resistencia térmica de la placa de acero exterior [K/W]

Rhaire4 = 1/(2*pi*Altura*r44*haire); % resistencia térmica de conveccion por el aire [K/W]

Rtotal4= (Rkaceroint4 + Rkais4 + Rkaceroext4 +Rhaire4); % resistencia térmica total del termotanque [K/W]

Perd4 = ((Tac-Tamb)/Rtotal4); % Perdidas de calor en el termotanque por convencion [W]

%----- MODELO EN ESPACIO DE ESTADOS-----%

A1 = [-Perd1/(me*Cpe)];

A2 = [-Perd2/(me*Cpe)];

A3 = [-Perd3/(me*Cpe)];

A4 = [-Perd4/(me*Cpe)];

B1 = [1/(me*Cpe)];

B2 = [1/(me*Cpe)];

B3 = [1/(me*Cpe)];

B4 = [1/(me*Cpe)];

C = [1];

D = [0];

SS1 = ss(A1, B1, C, D);

SS2 = ss(A2, B2, C, D);

SS3 = ss(A3, B3, C, D);

SS4 = ss(A4, B4, C, D);

GP11 = tf(SS1);

GP22 = tf(SS2);

GP33 = tf(SS3);

GP44 = tf(SS4);

```

Gp1 = GP11(1,1);
Gp2 = GP22(1,1);
Gp3 = GP33(1,1);
Gp4 = GP44(1,1);

% CONTROL EN LAZO ABIERTO (TERMOSTATO)
% Potencia de calentamiento del agua
% DeltaT = 26 [°C]

step(QcondAS*Gp1,3450);
title('Calentamiento inicial del sistema')
xlabel('Tiempo')
ylabel('Variación de Temperatura (°C)')

hold on
step(QcondAS*Gp2,3430);
step(QcondAS*Gp3,3420);
step(QcondAS*Gp4,3400);

```

ANEXO VII.

Código de programación en MATLAB del análisis de sensibilidad de la bomba de calor con asistencia solar con aislante tipo corcho variando el tamaño del espesor del aislante

```

% GRÁFICAS ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD %
clear all
clc
% Sistema de Bomba de calor con Asistencia Solar_Parámetro de variación espesor del corcho
%
% cálculos provistos por la asistencia solar en el evaporador
DNI = 5400; % Irradiación solar directa normal por año en la Serranía ecuatoriana en promedio [w*h/m2*dia]
ATT = 5; % Area de transferencia de calor en el colector solar [m2]
Hsol = 6; % Horas de sol en promedio [h]
Qrad = (DNI*ATT)/Hsol; % Flujo de calor por radiación

% Condiciones termodinámicas del sistema
hcond_in = 287.4; %Entalpia a la entrada del condensador [kJ/kg]
hcond_out = 139.2; %Entalpia a la salida del condensador [kJ/kg]
hevap_in = 139.2; %Entalpia a la entrada del evaporador [kJ/kg]
hevap_out = 256.2; %Entalpia a la salida del evaporador [kJ/kg]
hcomp_in = 256.2; %Entalpia a la entrada del compresor [kJ/kg]
hcomp_out = 287.4; %Entalpia a la salida del compresor [kJ/kg]
mfr = 0.035; %Flujo masico del refrigerante [kg/s]
% Cálculo de la carga del Condensador, Evaporador y Compresor
Qcond = mfr*(hcond_in-hcond_out)*1000; %Flujo de calor en el condensador y Potencia de calentamiento [W]
Qevap = mfr*(hevap_out-hevap_in)*1000; %Flujo de calor en el evaporador [W]
Qcomp = mfr*(hcomp_out-hcomp_in)*1000; %Potencia Compresor[W]

% Cálculo de los componente considerando asistencia solar
QevapAS = Qevap+Qrad %Flujo de calor en el evaporador con asistencia solar [W]

```

```

QcondAS = QevapAS+Qcomp %Potencia calorífica en el condensador con asistencia solar [W]

%-----Espesor del aislante de 8 cm-----
%-----%
Tamb = 19; % Temperatura del ambiente[°C]
Taf = 14; % Temperatura agua fria [°C]
Tac = 45; % Temperatura agua caliente [°C]
me = 300; % masa de agua contenida en el termotanque[kg]
Cpe = 4180; % Calor específico del agua [J/kg*K]
kacero = 14.9; % conductividad termica pared de acero AISI 304 del termotanque[W/mK]
esp_acero = 0.0035; % espesor placa de acero [m]
kais = 0.039; % conductividad termica del aislante del termotanque[W/mK]
esp_ais1 = 0.08; % espesor aislante [m]
Altura = 2; % altura del termotanque [m]
diametroT = 0.5; % altura del termotanque [m]
haire = 7.3019; % coeficiente de convección natural del aire [W/m2K]
r41 = diametroT/2; % radio del termotanque [m]
r31 = r41-esp_acero; % radio del termotanque sin el espesor de la placa de acero exterior
[m]
r21 = r41-esp_acero-esp_ais1; % radio del termotanque sin el espesor de la placa de acero
exterior y aislante [m]
r11 = r41-esp_acero-esp_ais1-esp_acero; % radio del termotanque sin los espesores de las
placas de acero y aislante [m]

%Cálculo de pérdidas de calor en el termotanque por convección
Rkaceroint1 = (log(r21/r11))/(2*pi*Altura*kacero); % resistencia térmica de la placa de
acero interior [K/W]
Rkais1 = (log(r31/r21))/(2*pi*Altura*kais); % resistencia térmica del aislamiento [K/W]
Rkaceroext1 = (log(r41/r31))/(2*pi*Altura*kacero); % resistencia térmica de la placa de
acero exterior [K/W]
Rhaire1 = 1/(2*pi*Altura*r41*haire); % resistencia térmica de conveccion por el aire [K/W]
Rtotal1= (Rkaceroint1 + Rkais1 + Rkaceroext1 +Rhaire1); % resistencia térmica total del
termotanque [K/W]
Perd1 = ((Tac-Tamb)/Rtotal1) % Perdidas de calor en el termotanque por conveccion [W]

%-----Espesor del aislante de 10 cm-----
%-----%

esp_ais2 = 0.10; % espesor aislante [m]
r42 = diametroT/2; % radio del termotanque [m]
r32 = r42-esp_acero; % radio del termotanque sin el espesor de la placa de acero exterior
[m]
r22 = r42-esp_acero-esp_ais2; % radio del termotanque sin el espesor de la placa de acero
exterior y aislante [m]
r12 = r42-esp_acero-esp_ais2-esp_acero; % radio del termotanque sin los espesores de las
placas de acero y aislante [m]

%Cálculo de pérdidas de calor en el termotanque por convección
Rkaceroint2 = (log(r22/r12))/(2*pi*Altura*kacero); % resistencia térmica de la placa de
acero interior [K/W]
Rkais2 = (log(r32/r22))/(2*pi*Altura*kais); % resistencia térmica del aislamiento [K/W]
Rkaceroext2 = (log(r42/r32))/(2*pi*Altura*kacero); % resistencia térmica de la placa de
acero exterior [K/W]
Rhaire2 = 1/(2*pi*Altura*r42*haire); % resistencia térmica de conveccion por el aire [K/W]
Rtotal2= (Rkaceroint2 + Rkais2 + Rkaceroext2 +Rhaire2); % resistencia térmica total del

```

```

termotanque [K/W]
Perd2 = ((Tac-Tamb)/Rtotal2); % Perdidas de calor en el termotanque por convencion [W]

%-----Espesor del aislante de 12 cm-----%
-----%

esp_ais3 = 0.12; % espesor aislante [m]
r43 = diametroT/2; % radio del termotanque [m]
r33 = r43-esp_acero; % radio del termotanque sin el espesor de la placa de acero exterior [m]
r23 = r43-esp_acero-esp_ais3; % radio del termotanque sin el espesor de la placa de acero exterior y aislante [m]
r13 = r43-esp_acero-esp_ais3-esp_acero; % radio del termotanque sin los espesores de las placas de acero y aislante [m]

%Cálculo de pérdidas de calor en el termotanque por convección
Rkaceroint3 = (log(r23/r13))/(2*pi*Altura*kacero); % resistencia térmica de la placa de acero interior [K/W]
Rkais3 = (log(r33/r23))/(2*pi*Altura*kais); % resistencia térmica del aislamiento [K/W]
Rkaceroext3 = (log(r43/r33))/(2*pi*Altura*kacero); % resistencia térmica de la placa de acero exterior [K/W]
Rhaire3 = 1/(2*pi*Altura*r43*haire); % resistencia térmica de conveccion por el aire [K/W]
Rtotal3= (Rkaceroint3 + Rkais3 + Rkaceroext3 +Rhaire3); % resistencia térmica total del termotanque [K/W]
Perd3 = ((Tac-Tamb)/Rtotal3); % Perdidas de calor en el termotanque por convencion [W]

%-----Espesor del aislante de 14 cm-----%
-----%

esp_ais4 = 0.14; % espesor aislante [m]
r44 = diametroT/2; % radio del termotanque [m]
r34 = r44-esp_acero; % radio del termotanque sin el espesor de la placa de acero exterior [m]
r24 = r44-esp_acero-esp_ais4; % radio del termotanque sin el espesor de la placa de acero exterior y aislante [m]
r14 = r44-esp_acero-esp_ais4-esp_acero; % radio del termotanque sin los espesores de las placas de acero y aislante [m]

%Cálculo de pérdidas de calor en el termotanque por convección
Rkaceroint4 = (log(r24/r14))/(2*pi*Altura*kacero); % resistencia térmica de la placa de acero interior [K/W]
Rkais4 = (log(r34/r24))/(2*pi*Altura*kais); % resistencia térmica del aislamiento [K/W]
Rkaceroext4 = (log(r44/r34))/(2*pi*Altura*kacero); % resistencia térmica de la placa de acero exterior [K/W]
Rhaire4 = 1/(2*pi*Altura*r44*haire); % resistencia térmica de conveccion por el aire [K/W]
Rtotal4= (Rkaceroint4 + Rkais4 + Rkaceroext4 +Rhaire4); % resistencia térmica total del termotanque [K/W]
Perd4 = ((Tac-Tamb)/Rtotal4); % Perdidas de calor en el termotanque por convencion [W]

%----- MODELO EN ESPACIO DE ESTADOS-----%
A1 = [-Perd1/(me*Cpe)];
A2 = [-Perd2/(me*Cpe)];
A3 = [-Perd3/(me*Cpe)];
A4 = [-Perd4/(me*Cpe)];
B1 = [1/(me*Cpe)];
B2 = [1/(me*Cpe)];

```

```

B3 = [1/(me*Cpe)];
B4 = [1/(me*Cpe)];

C = [1];
D = [0];
SS1 = ss(A1, B1, C, D);
SS2 = ss(A2, B2, C, D);
SS3 = ss(A3, B3, C, D);
SS4 = ss(A4, B4, C, D);

GP11 = tf(SS1);
GP22 = tf(SS2);
GP33 = tf(SS3);
GP44 = tf(SS4);

Gp1 = GP11(1,1);
Gp2 = GP22(1,1);
Gp3 = GP33(1,1);
Gp4 = GP44(1,1);

% CONTROL EN LAZO ABIERTO (TERMOSTATO)
% Potencia de calentamiento del agua
% DeltaT = 26 [°C]

step(QcondAS*Gp1,3510);
title('Calentamiento inicial del Sistema')
xlabel('Tiempo')
ylabel('Variación de Temperatura (°C)')

hold on
step(QcondAS*Gp2,3480);
step(QcondAS*Gp3,3450);
step(QcondAS*Gp4,3430);

```

ANEXO VIII.

Código de programación en MATLAB de la bomba de calor con los parámetros optimizados

```

%-----MODELACION DE BOMBA DE CALOR ASISTENCIA SOLAR-----
---%
%
%Parámetro a variar: Tipo de aislante Poliuretano expandido
%longitud de espesor: 14cm
clear all;
%Parámetros iniciales de funcionamiento de la bomba de calor
Tamb = 19; % Temperatura del ambiente[°C]
Taf = 14; % Temperatura agua fria [°C]
Tac = 45; % Temperatura agua caliente [°C]
consignadeltaT = Tac-Tamb; % Delta temperatura Termotanque/ambiente oC
me = 300; % masa de agua contenida en el termotanque[kg]
Cpe = 4180; % Calor específico del agua [J/kg*K]
kacero = 14.9; % conductividad termica pared de acero AISI 304 del termotanque[W/mK]
esp_acero = 0.0035; % espesor placa de acero [m]
kais = 0.023; % conductividad termica del aislante del termotanque[W/mK]

```

```

esp_ais = 0.14; % espesor aislante [m]
Altura = 2; % altura del termotanque [m]
diametroT = 0.5; % altura del termotanque [m]
haire = 7.3019; % coeficiente de convección natural del aire [W/m2K]
r4 = diametroT/2; % radio del termotanque [m]
r3 = r4-esp_acero; % radio del termotanque sin el espesor de la placa de acero exterior [m]
r2 = r4-esp_acero-esp_ais; % radio del termotanque sin el espesor de la placa de acero exterior y aislante [m]
r1 = r4-esp_acero-esp_ais-esp_acero; % radio del termotanque sin los espesores de las placas de acero y aislante [m]

%Cálculo de pérdidas de calor en el termotanque por convección
Rkaceroint = (log(r2/r1))/(2*pi*Altura*kacero); % resistencia térmica de la placa de acero interior [K/W]
Rkais = (log(r3/r2))/(2*pi*Altura*kais); % resistencia térmica del aislamiento [K/W]
Rkaceroext = (log(r4/r3))/(2*pi*Altura*kacero); % resistencia térmica de la placa de acero exterior [K/W]
Rhaire = 1/(2*pi*Altura*r4*haire); % resistencia térmica de conveccion por el aire [K/W]
Rtotal= (Rkaceroint + Rkais + Rkaceroext +Rhaire); % resistencia térmica total del termotanque [K/W]
Perd = ((Tac-Tamb)/Rtotal) % Perdidas de calor en el termotanque por conveccion [W]

%Cálculos provistos por la asistencia solar en el evaporador
DNI = 5400; % Irradiacion solar directa normal por año en la Serranía ecuatoriana en promedio [W*h/m2*dia]
ATT = 5; % Area de transferencia de calor en el colector solar [m2]
Hsol = 6; % Horas de sol en promedio [h]
Qrad = (DNI*ATT)/Hsol; % Flujo de calor por radiación

%Condiciones termodinámicas del sistema
hcond_in = 287.4; %Entalpia a la entrada del condensador [kJ/kg]
hcond_out = 139.2; %Entalpia a la salida del condensador [kJ/kg]
hevap_in = 139.2; %Entalpia a la entrada del evaporador [kJ/kg]
hevap_out = 256.2; %Entalpia a la salida del evaporador [kJ/kg]
hcomp_in = 256.2; %Entalpia a la entrada del compresor [kJ/kg]
hcomp_out = 287.4; %Entalpia a la salida del compresor [kJ/kg]
mfr = 0.035; %Flujo masico del refrigerante [kg/s]
%Cálculo de la carga del Condensador, Evaporador y Compresor
Qcond = mfr*(hcond_in-hcond_out)*1000; %Flujo de calor en el condensador y Potencia de calentamiento [W]
Qevap = mfr*(hevap_out-hevap_in)*1000; %Flujo de calor en el evaporador [W]
Qcomp = mfr*(hcomp_out-hcomp_in)*1000; %Potencia Compresor[W]

%Cálculo de los componente considerando asistencia solar
QevapAS = Qevap+Qrad %Flujo de calor en el evaporador con asistencia solar [W]
QcondAS = QevapAS+Qcomp %Potencia calorífica en el condensador con asistencia solar [W]

% MODELO EN ESPACIO DE ESTADOS
A=[-Perd/(me*Cpe)];
B=[1/(me*Cpe)];
C=[1];
D=[0];
SS=ss(A,B,C,D);
GP=tf(SS);

% COMPORTAMIENTO TERMODINÁMICO

```

```

% lazo abierto
Gp1 = GP(1,1);
%consignadeltat = Tac-Tamb = 26 % Delta temperatura Termotanque/ambiente [°C]
pause
step(QcondAS*Gp1,3400);
ylabel('Variación de Temperatura (°C)')
xlabel('Tiempo')
title('Calentamiento inicial del Sistema')
pause

% lazo cerrado
DeltaT = 3; %Delta de temperatura de control del sistema [°C]
[Gc, info] = pidtune(Gp1, 'PID', 0.02)
H = feedback(Gp1*Gc,1)
step(DeltaT*H)
ylabel('Variación de Temperatura (°C)')
xlabel('Tiempo')
title('Control analógico de temperatura del Sistema')

% Análisis energético
COPAS = QcondAS/Qcomp % Coeficiente de desempeño del sistema

% Análisis exergético
COPrev = 1/(1-((Tamb+273)/(Tac+273)))% Coeficiente de desempeño reversible del sistema
Efi_exer = (COPAS/COPrev)*100 %Eficiencia exergética del sistema

```