

LESTER ALEJANDRO CRUZ PIÑUELAS

Memoria de Residencia Profesional

2016



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ

Institución:

Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico

Informe de Residencia Profesional

Estudio de Esquemas de Integración de Sistemas de
Calentamiento Solar para Procesos Industriales

Presentado por:

Lester Alejandro Cruz Piñuelas

Ing. Julio Cesar Llaven Gordillo
Asesor interno

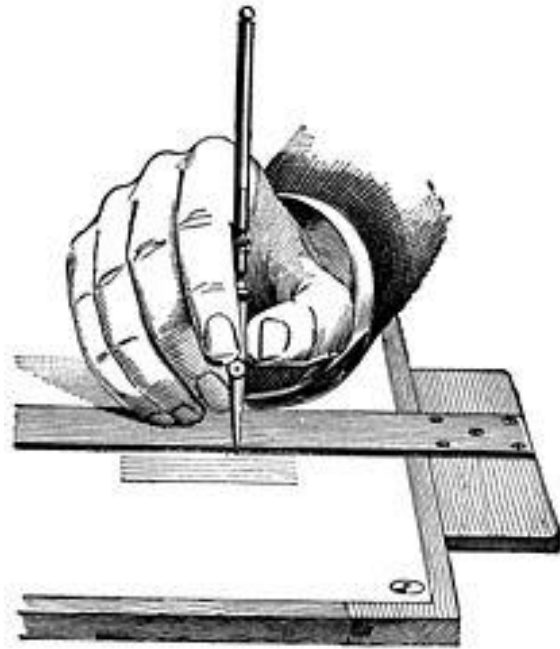
Dr. José Jassón Flores Prieto
Asesor externo

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas a 20 de Diciembre de 2016

ÍNDICE

	Pag.
Capítulo I.- Introducción.	1
1.1 Revisión bibliográfica y justificación.	2
1.1.1 Estudios de sistemas de calentamiento solar.	2
1.1.2 Estudios de simulación con TRNSYS.	3
1.1.3 Alcances de simulación con diferente software.	5
1.1.4 Aplicaciones en Industria.	5
1.2 Objetivos.	7
1.2.1 Objetivo general.	7
1.2.2 Objetivos específicos.	7
1.2.3 Alcances.	7
Capítulo II.- Fundamentos teóricos.	8
2.1 Modelado de sistemas.	9
2.1.1 La constante solar.	9
2.1.2 Radiación solar.	9
2.1.3 Tecnologías de captación solar.	10
2.2 Caso de estudio.	10
2.3 Modelo matemático.	11
2.3.1 Colector solar.	12
2.3.2 Intercambiador de calor.	14
2.3.3 Termotanque estratificado.	18
2.3.4 Calentador eléctrico auxiliar.	20
2.3.5 Relación área de colección-volumen de almacenamiento.	22
Capítulo III.- Metodología y estrategia general de solución.	24
3.1 Generalidades del software TRNSYS.	25
3.1.1 TRNSYS.	25
3.1.2 Simulación térmica en estado transitorio y permanente.	26
3.2 Componentes del programa y sus especificaciones.	26
3.3 Metodología y estrategia general de solución.	28
3.4 Preparación del programa de simulación.	32
Capítulo IV.- Resultados	33
4.1 Verificación de la estrategia en TRNSYS	34
4.2 Propuesta de perfiles de carga.	36

4.3 Resultados de fracción solar y eficiencia vs perfiles de carga.	37
4.4 Discusión de fracción solar, Eficiencia y Energía útil.	39
Capítulo V.- Conclusiones y recomendaciones.	41
5.1 Conclusiones.	42
5.2 Recomendaciones para trabajos futuros.	43
5.3 Competencias aplicadas y desarrolladas.	43
Referencias bibliográficas y virtuales.	44



Capítulo I.- Introducción.

En este primer capítulo se establece el contexto sobre el problema a estudiar, así también la revisión bibliográfica, la justificación, el objetivo y el alcance. La revisión bibliográfica se enfoca en temas relacionados con el trabajo a desarrollar, estos son: Estudio de sistemas de calentamiento solar, Estudios de simulación con software especializado y Aplicaciones en la industria.

1.1 Revisión bibliográfica y justificación.

En este apartado se muestra un estudio de las distintas investigaciones realizadas en el campo de la energía solar térmica y la manera en que se aplican a la industria, aquí se contempla información que es de utilidad y aporta conocimiento al proyecto que se realizará.

1.1.1 Estudios de sistemas de calentamiento solar.

Dagdougui H. et al (2011) estudiaron las pérdidas de calor y el rendimiento térmico de un colector solar de placa plana con diferentes cubierta, buscado diseños más rentables. En el estudio evaluaron las propiedades ópticas de las distintas cubiertas, ya que la eficiencia depende en gran medida del tipo de material utilizado. La evaluación de los coeficientes de pérdidas térmicas mediante convección y radiación fue la tarea fundamental para evaluar el rendimiento. La pérdida de calor por la parte superior resultó menor con cubiertas adicionales, y la combinación de plexiglás y vidrio produjo un mejor rendimiento. Con lo anterior, se observó que la cubierta influye en gran medida en el rendimiento térmico del colector.

Ramos C. et al (2013) desarrollaron y mejoraron colectores solares cilindro-parabólicos mediante el diseño y la construcción de prototipos, con lo aprendido en cada prototipo se mejoró aún más la propuesta. Las mejoras realizadas se efectuaron en tres generaciones de prototipos, restaurando y aplicando nuevos conocimientos a cada uno de ellos, cambiando la estructura e implementando seguidores solares. Las pruebas presentan resultados favorables de los prototipos a lo largo de tres generaciones demostrando así que el uso de concentradores cilindro-parabólico es viable para la generación de calor en los distintos procesos industriales.

Farfán-Caballero J.G. (2016) incorporó un colector cilindro-parabólico (CCP) después de un sistema de precalentamiento solar con calentador eléctrico con el

objetivo de evaporar. . El autor realizó simulaciones con TRNSYS para observar el comportamiento del sistema durante un año en Chihuahua y Ciudad de México. Los resultados se presentaron en gráficas y nomogramas dejando en claro que el implemento de un CCP aumenta considerablemente la temperatura final del sistema para la producción de vapor, con lo que se observó la factibilidad de sistemas combinados en la industria mexicana.

1.1.2 Estudios de simulación con TRNSYS.

Kalogirou S. (2002) comparó cinco tipos de colectores solares para uso doméstico y procesos industriales en la República de Chipre, analizando el precio anual energético y la vida útil de los equipos. Los sistemas se simularon con TRNSYS con condiciones meteorológicas de Nicosia, Chipre. En el estudio se definieron los flujos de entrada, tiempo de trabajo y volumen del tanque, la salida presentó los ciclos de vida útil, energía ganada en un año, temperaturas alcanzadas y los costos. En los resultados se observó que aumentando el área del colector se incrementa la cantidad de colección de calor, pero también su costo, también que se requieren calentadores auxiliares para cubrir la demanda si requiere de temperaturas muy altas. El sistema más óptimo fue aquel que a pesar del paso del tiempo continúa siendo eficiente.

Frein A. et al (2014) simularon e implementaron un sistema óptimo de una planta solar térmica con un área de colectores de 1000 m², un tanque de 30 m³ y un intercambiador de calor de 500 kW. En la implementación se plantearon distintas alternativas en cuanto al diseño y configuración de la planta solar, a cada una de las configuraciones se le realizó balances de energía empleando el software TRNSYS. . La configuración de Tichelmann combinada con una variación en los diámetros de tubería entre cada fila de colectores resulto adecuada. La configuración óptima redujo 161 toneladas de CO₂, ahorrando 82 m³ de gas, al año. En el estudio se observó que el arreglo de Tichelmann evitó riesgos de estancamientos en algunas filas del campo solar y decrementos en la eficiencia

global. La selección correcta del arreglo del sistema ahorra costos en la inversión y presenta un alto rendimiento.

Pérez-Grajales E.V. (2015) realizó un estudio sobre tres configuraciones distintas de sistemas de calentamiento solar para evaluar la importancia del uso y ubicación de los intercambiadores de calor. El autor desarrolló una plataforma de simulación en TRNSYS, también realizó el cálculo de proporciones entre las relaciones de área y volumen de los elementos del sistema para la elaboración de nomogramas. Los modelos comprendían a) 2 intercambiadores de calor, b) 1 intercambiador de calor después del almacén térmico y c) 1 intercambiador antes del almacén térmico. Los resultados mostraron que la potencia generada por el modelo con intercambiador de calor antes del almacén térmico fue más eficiente que los otros dos casos.

Vissek E. et al (2013) Mejoraron la eficiencia energética de un sistema de refrigeración solar combinando técnicas de almacenamiento de energía solar y refrigerador de absorción con herramientas conocidas. Las técnicas PID y Fuzzy-PID de control de la evaluación se han hecho a través de TRNSYS y Matlab de simulación. Los resultados se presentan para la temperatura de ajuste deseada de 24 ° C durante 1 zona enfriada del edificio (la columna de 6 plantas de apartamento más pequeño). Con lo anterior, demostraron que TRNSYS es una excelente herramienta para simulación de procesos de calor.

Biencinto M. et al (2016) evaluaron un nuevo modelo de simulación para la generación directa de vapor en colectores solares cilindro-parabólicos, el modelo se desarrolló en TRNSYS. La precisión del modelo en términos de temperatura de salida se estima entonces mediante el cálculo del error absoluto medio durante todo el período de tiempo considerado. Los resultados de la simulación en términos de temperatura de salida resultaron en estrecho acuerdo con los datos experimentales medidos en el bucle durante la mayor parte del día. El nuevo modelo resultó adecuado con una precisión razonable, bajo tiempo de cálculo y con

requerimientos de reducidos recursos en comparación con los modelos totalmente dinámicos existentes.

Ramírez-Martínez S.J. (2016) simuló en TRNSYS un sistema de precalentamiento de agua para la producción de vapor en un proceso industrial en tres ciudades de México con el fin de demostrar su viabilidad. A partir de la demanda diaria se calcularon las áreas de colección, el volumen de tanque de almacenamiento y los flujos máxicos para las diferentes bombas del sistema. Los resultados se presentaron en nomogramas de manera que para cada área de colección, volumen de tanque de almacenamiento y razones de uso se demuestre la energía ganada por el sistema y la fracción solar. En el estudio se observó que en que en México se logra tener una buena fracción solar y es factible implementar sistemas de este tipo.

1.1.3 Alcances de simulación con diferente software.

Álvarez E. y Ponce F. (2010) expusieron el manual del usuario, para desarrollar trabajos con el software TERMOCAL. Este programa permite realizar las operaciones fundamentales del cálculo de la demanda térmica solar de un local y las características de los elementos del sistema y almacenes de energía de dichos sistemas. El programa se ejecuta sobre cualquier sistema operativo, no requiere ningún paquete informático para su funcionamiento, se ejecuta en cualquier tipo de computadora y presenta un ambiente de trabajo ilustrativo y funcional. En el estudio se concluyó que es un programa bastante sencillo de utilizar.

1.1.4 Aplicaciones en industria.

Kalogirou S. (2002) investigó utilizando TRNSYS la viabilidad de los sistemas de calor de procesos industriales en la industria de Chipre. En las simulaciones comparó cinco tipos de colectores entre los que destacan los de placa plana y los cilindro-parabólicos móviles. El rendimiento energético y el precio de calor resultante se analizaron en ciclos de vida. Los colectores considerados en este trabajo resultaron adecuados para proporcionar calor a procesos industriales, resultando

más adecuados los de placa plana para bajas temperaturas (60°C) y los colectores de concentración para mayores. También se observa que en cualquier región con condiciones climatológicas similares a las de Chipre, se puede implementar sistemas de calentamiento solar para procesos industriales.

Escobedo-Bretado J. A. et al (2008) realizaron el análisis térmico de un sistema de calentamiento de agua para un comedor tipo industrial en el complejo industrial Chihuahua. Usando TRNSYS analizaron el funcionamiento continuo durante un año variando el número de colectores solares (4, 6 y 8) y el consumo de agua caliente (1000, 2000 y 3000 L/día @45°C). En todos los casos el suministro de calor auxiliar se simula como infinito para garantizar que el agua se suministre a la temperatura especificada. Observaron que un sistema de seis colectores para una demanda de 2000 L es el más óptimo, con el aporte mínimo de energía del calentador auxiliar y presentó un ahorro de combustible del 68.3%.

1.2 Objetivos.

1.2.1 Objetivo general.

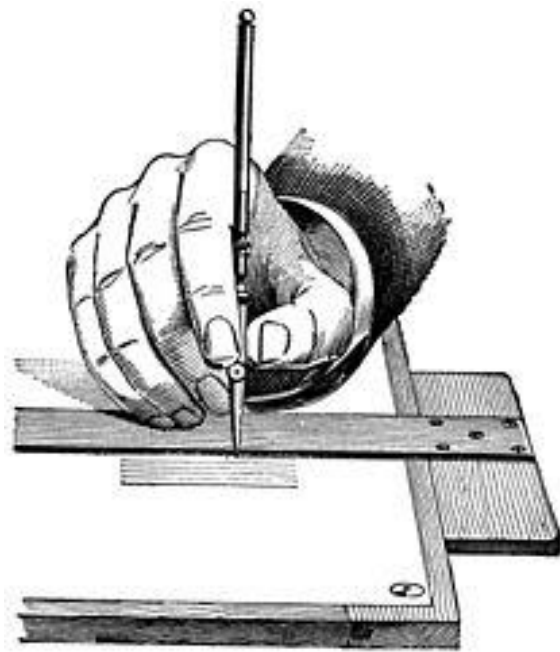
Realizar un estudio de esquema de integración de un sistema solar de calentamiento de agua para producción de vapor, considerando diferentes requerimientos de calentamiento y considerando condiciones de operación de un sistema representativo de los utilizados actualmente en la industria mexicana.

1.2.2 Objetivos específicos.

- Identificar las capacidades y condiciones de operación de un sistema representativo utilizado en la actualidad dentro de la industria Mexicana.
- Adecuar las estrategias de simulación en el software TRNSYS.
- Verificar las estrategias de simulación.
- Analizar la el desempeño térmico de un sistema de captación solar variando los requerimientos de carga térmica.

1.2.3 Alcances.

En esta propuesta se contempla un análisis comparativo del desempeño térmico de un sistema de calentamiento solar, para distintas configuraciones de perfiles de carga de acuerdo a los requerimientos de calentamiento, basándose en simulación mediante software especializado TRNSYS. Para el diseño se contempla considerar los requerimientos y condiciones climáticas con alto nivel de requerimiento de calor para proceso.



Capítulo II.- Fundamentos teóricos.

En este capítulo se explica conceptos básicos para el entendimiento del estudio de sistemas de calentamiento solar, se presenta el caso de estudio contemplando cada elemento que lo integra y se presenta el modelo matemático que rige la transferencia de calor en los componentes del mismo.

2.1 Modelado de sistemas.

Calor de proceso es habitualmente el término que se emplea para referirnos al suministro de energía en forma de calor a un proceso. La metodología de este proceso consiste en calentar un fluido mediante energía solar a través de un instrumento de aprovechamiento solar (colector), el fluido debería aumentar su temperatura después de pasar por el colector por medio de un sistema de tuberías e integrarse de forma directa o indirecta al proceso aportando calor.

El estudio de los sistemas de colección solar para calor de procesos requiere el conocimiento de los fundamentos básicos, entre estos destacan: la constante solar, el fenómeno de radiación solar, el uso y aplicación de tecnologías de captación solar y por último pero no menos importante, el buen uso de la energía solar.

2.1.1 La Constante Solar.

La constante solar (G_{sc}) es la energía desde el sol por unidad de tiempo recibida en una unidad de área de superficie perpendicular a la dirección de propagación de la radiación a la distancia promedio tierra-sol fuera de la atmósfera. La radiación solar tiene un valor de 1367 W/m^2 o bien, $433 \text{ Btu/ft}^2\text{h}$.

2.1.2 Radiación solar.

La radiación es energía que se transfiere por ondas electromagnéticas y se produce directamente desde la fuente hacia fuera en todas las direcciones. Estas ondas no necesitan un medio material para propagarse, pueden atravesar el espacio interplanetario y llegar a la Tierra desde el Sol. Todas las ondas electromagnéticas se desplazan en el vacío a una velocidad de 299.792 km/s .

La longitud de onda y la frecuencia de las ondas electromagnéticas, se encuentran en el intervalo espectral del ultravioleta, visible e infrarrojo principalmente y su distribución espectral se rige mediante la ley de Planck de acuerdo a la temperatura del sol.

2.1.3 Tecnologías de captación solar.

Los sistemas de captación solar se caracterizan principalmente porque son sistemas versátiles que aprovechan parte de la energía emitida por el sol y lo transfieren a un fluido en forma de calor, sus principales elementos son:

- **Colector solar** que puede variar dependiendo de la aplicación o las temperaturas de demanda que se quiera alcanzar.
- **Intercambiador de calor** el cual es un componente que permite la transferencia de calor de un fluido a otro.
- **Termo-tanque** el cual almacena agua caliente en su parte superior debido a la densidad menor que esta posee en comparación del agua a temperatura ambiente.
- **Calentador auxiliar** es el dispositivo que eleva la temperatura del fluido de trabajo para mantener en todo momento las condiciones preestablecidas.

2.2 Caso de estudio.

En este trabajo se realizó el estudio de perfiles de carga de un sistema de calentamiento solar para precalentamiento, considerando que varían los factores Fracción solar, Calor útil y Eficiencia del mismo, el sistema propuesto se evaluó en la ciudad de Chihuahua, Chihuahua. Esta ciudad fue escogida por su particular clima seco, en el cual se contemplan condiciones climáticas con alto nivel de requerimiento de calor para proceso. De esta manera comprobar la viabilidad del sistema en condiciones más óptimas.

El sistema fue analizado con distintos perfiles de carga para distintos periodos del día, contemplando las horas de luz solar y horas de noche. Los perfiles de carga propuestos se evaluaron en un año atípico para satisfacer una demanda diaria de 25,000 litros de agua tratada a 90°C.

Los perfiles de carga propuestos contemplan realizar un estudio de las horas de uso, esta configuración de perfil de carga es: Distribuida desde el centro del medio día y aumentando el número de horas en ambos lados, en la Sección 4.1 de este reporte se muestra de manera detallada cada perfil de carga utilizado.

La figura 2.2.1 muestra el sistema de calentamiento solar empleado.

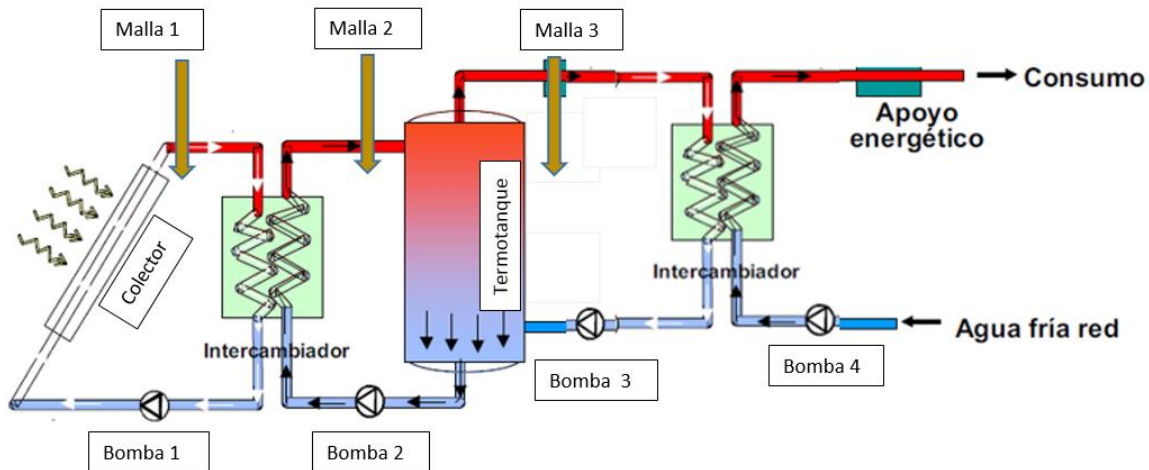


Figura 2.2.1 Diagrama de caso de referencia.

2.3 Modelo Matemático.

El modelo matemático del sistema de calentamiento solar se conformara por una serie de sub modelos obtenidos de los balances de energía de cada elemento que integra al sistema. El modelo de cada elemento se resuelve mediante ecuaciones características que los representa. Para este caso, con el software TRNSYS se integra de manera matricial y de manera automática se obtienen los resultados de cada elemento, ya sea en términos de temperatura, flujos de calor o cargas térmicas. El software TRNSYS incorpora de manera secuencial los distintos elementos del sistema en cuanto se definen las características de cada componente, el acoplamiento se realiza considerando balances de energía en estado cusi-permanente.

Los elementos a integrar en el sistema son colectores solares, intercambiadores de calor, termo-tanque de almacenamiento y calentadores eléctricos auxiliares. A continuación se presenta los modelos de cada elemento.

2.3.1 Colector solar.

Es un dispositivo diseñado para recoger la energía radiada por el sol y convertirla en energía térmica, dirigir el calor y cederlo a un fluido de trabajo que pueda contener calor. En este proceso, parte de la energía se pierde y se disipa al medio ambiente.

Par el análisis del comportamiento del colector se considera la primera ley de la termodinámica en estado permanente, con la cual se obtiene la Ecuación 2.1.

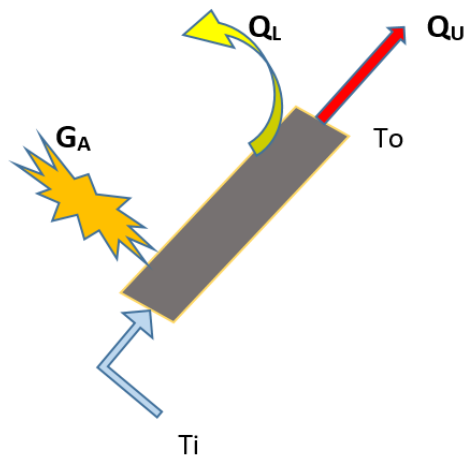


Figura 2.3.1 Balance de energía en el colector.

$$G_A = Q_U + Q_L \quad \left(\frac{KJ}{hr} \right) \quad (2.1)$$

- G_A es la radiación del sol.
- Q_U es la energía útil que se obtiene del colector.
- Q_L es la cantidad de energía que se pierde hacia los alrededores.

Si despejamos Q_L de la Ecuación 2.1 se obtiene la siguiente ecuación:

$$Q_L = G_A - Q_U \quad (2.2)$$

La ley de enfriamiento de Newton afirma que, Q_L es igual al producto del factor de remoción, el coeficiente global de pérdidas de calor y la diferencia de temperatura media en el colector (T_{MED}) y la temperatura del exterior que es la temperatura ambiente (T_A). Obteniendo lo siguiente:

$$Q_L = F_R U_L (T_{MED} - T_A) \quad (2.3)$$

- T_{MED} es la diferencia de temperatura media del colector (K).
- T_A es la temperatura ambiente.

T_{MED} se define por la diferencia entre la temperatura a la entrada y a la salida del colector dividida entre dos.

$$T_{MED} = (T_{Sal} - T_{Ent})/2 \quad (2.4)$$

Si se sustituye la Ecuación 2.3 en la Ecuación 2.2 se obtiene lo siguiente:

$$F_R U_L (T_{MED} - T_A) = Q_{in} - Q_U \quad (2.5)$$

donde $F_R U_L$ es el coeficiente de pérdidas térmicas.

Si lo despejamos se obtiene:

$$F_R U_L = \frac{Q_{in} - Q_U}{(T_{MED} - T_A)} \quad \left(\frac{kJ}{hr \cdot K} \right) \quad (2.6)$$

Existen tres coeficientes característicos en un colector que pueden ser útiles para determinar su comportamiento, a_0 , a_1 y a_2 . Aquí, a_1 es igual a $F_R U_L$, que medido por cada metro cuadrado de colección es igual al coeficiente de pérdida de eficiencia.

$$F_R U_L \approx a_1 \quad (2.7)$$

Conociendo a_1 es posible determinar la eficiencia del colector y por ello se puede determinar la cantidad de Q_U que se presenta a la salida del colector, misma que será dada en kJ/hr.

Estos coeficientes se obtienen despejando la Ecuación 2.1 en función de Q_u obteniendo:

$$Q_U = G_A - Q_L \quad (2.8)$$

Evaluando a Q_u para un $\lim_{t \rightarrow \infty} Q_U$ encontramos el estado permanente de la función por lo que Q_u es igual a 0, quedando de la siguiente forma:

$$G_{\tau\alpha} - (U_L(T_P - T_\alpha) + Q_U) = 0 \quad (2.9)$$

Si esta última Ecuación 2.9 se divide entre G obtenemos lo siguiente:

$$\eta = \frac{Q_U}{G} = \frac{G_{\tau\alpha} - (U_L(T_P - T_\alpha) + Q_U)}{G} \quad (2.10)$$

De esta manera, se tiene que la eficiencia en el colector es:

$$\eta = F_R\tau\alpha - \frac{F_R U_L (T_i - T_\alpha)}{G} + \frac{F_R U_L (T_i - T_\alpha)^2}{G} \quad (2.11)$$

donde $F_R\tau\alpha$ es el coeficiente de ganancias a_0 , $\frac{F_R U_L (T_i - T_\alpha)}{G}$ es el coeficiente de pérdidas a_1 y $\frac{F_R U_L (T_i - T_\alpha)^2}{G}$ es el factor de corrección a_2 . Estos coeficientes son de acuerdo al modelo reportado en Duffie & Beckman 1981, en donde estos coeficientes permiten evaluar la eficiencia de un colector de placa plana, sus pérdidas y el factor de corrección y de esta manera encontrar todas las incógnitas a la Ecuación 2.1.

2.3.2 Intercambiador de calor.

Un intercambiador de calor es un dispositivo diseñado para transferir calor de un fluido a otro, sea que estos estén separados por una barrera sólida o que se encuentren en contacto. El proceso en el intercambio de calor entre los fluidos se lleva a cabo a distintas temperaturas y separados por una pared sólida.

Como se ilustra en la figura 2.3.2, se presenta un contraflujo cuando los dos fluidos fluyen en la misma dirección pero en sentido opuesto. Cada uno de los fluidos entra al intercambiador por diferentes extremos ya que el fluido con menor temperatura sale en contraflujo del intercambiador de calor en el extremo donde entra el fluido con mayor temperatura, la temperatura del fluido más frío se aproximará a la temperatura del fluido de entrada.

Este tipo de intercambiador resulta ser más eficiente que los intercambiadores de flujo paralelo. En contraste con el intercambiador de calor de flujo paralelo, el intercambiador de contraflujo puede presentar la temperatura más alta en el fluido frío y la más baja temperatura en el fluido caliente una vez realizada la transferencia de calor en el intercambiador.

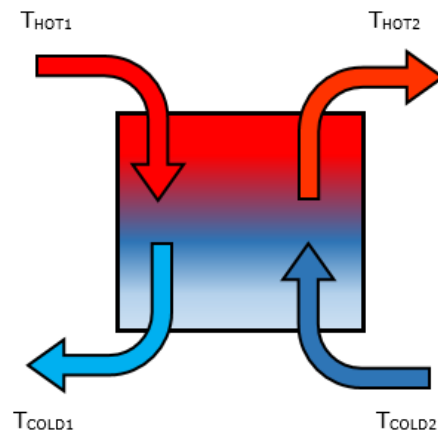


Figura 2.3.2 Entradas y salidas de temperatura de un intercambiador de calor.

El análisis a intercambiadores de calor se efectúa para determinar el coeficiente global de transferencia de calor U , el cual está dado por la Ecuación 2.12:

$$R_{Tot} = \frac{1}{UA} \quad (2.12)$$

El coeficiente se determina al tener en cuenta las resistencias de conducción y convección en los fluidos de trabajo separados por las paredes planas y cilíndricas compuestas.

Aplicando balances globales de energía a los fluidos de entrada y salida del intercambiador podemos obtener las relaciones que nos permitan diseñar o seleccionar un intercambiador de calor.

Se obtienen las ecuaciones 2.13 y 2.14 para un fluido caliente y uno frío respectivamente como se ilustra en la Figura 2.3.3.

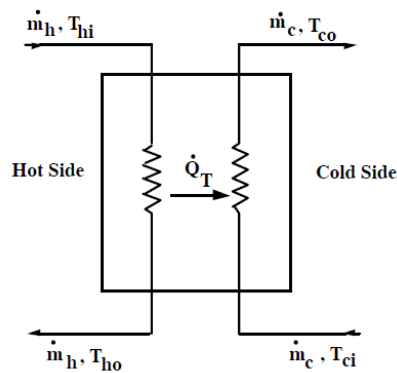


Figura 2.3.3 Esquema de funcionamiento de un intercambiador de calor.

$$q = \dot{m}_h C_{ph} (T_{hi} - T_{ho}) \quad (2.13)$$

$$q = \dot{m}_c C_{pc} (T_{ho} - T_{ci}) \quad (2.14)$$

- \dot{m} es el flujo másico.
- C_p es el calor específico constante para el fluido de trabajo.
- T es la temperatura media del fluido en las posiciones que señalan.
- h es para el flujo caliente.
- c es para el flujo frío.
- i y o se refieren a las condiciones de entrada y salida respectivamente.

Sin embargo, como las temperaturas medias (ΔT_m) varían respecto de la posición en el intercambiador de calor, se trabaja con la siguiente ecuación:

$$q = UA\Delta T_m \quad (2.15)$$

donde ΔT_m es la diferencia de temperaturas media para una media apropiada

La eficiencia en un intercambiador de calor está relacionada con la máxima transferencia de calor posible, $q_{m\acute{a}x}$ para el intercambiador.

En un intercambiador a contraflujo, si uno de los fluidos experimenta la diferencia máxima de temperatura, $T_{hi} - T_{ci}$ se estaría hablando de la eficiencia máxima. Al suponer la siguiente situación se definen las transferencias máximas de calor como:

$$C_c < C_h , \quad q_{m\acute{a}x} = C_c(T_{hi} - T_{ci}) \quad (2.16)$$

De la misma manera, si el fluido caliente experimenta el cambio máximo de temperatura y se enfría a la misma temperatura de entrada del fluido fría, la Ecuación pasa a ser:

$$C_h < C_c , \quad q_{m\acute{a}x} = C_h(T_{hi} - T_{ci}) \quad (2.17)$$

Tomando en cuenta las consideraciones anteriores, la expresión general de la transferencia máxima de calor posible es:

$$q_{m\acute{a}x} = C_{min} (T_{hi} - T_{ci}) \quad (2.18)$$

donde C_{min} es igual a C_h o C_c dependiendo de cuál sea la menor.

Podemos definir entonces a la eficiencia ϵ como la razón de transferencia de calor para un intercambiador de calor y la transferencia de calor máxima posible.

$$\epsilon = \frac{q}{q_{m\acute{a}x}} \quad (2.19)$$

De las ecuaciones 2.13, 2.14 y 2.18 se obtiene que:

$$\epsilon = \frac{C_c(T_{co} - T_{ci})}{C_{min}(T_{hi} - T_{ci})} \quad (2.20)$$

Para poder determinar la transferencia de calor real necesitamos conocer la eficiencia y las temperaturas de entrada. Si estas se conocen, se puede usar la expresión:

$$q = \varepsilon * C_{min}(T_{hi} - T_{ci}) \quad (2.21)$$

La relación de eficiencia definida para un intercambiador de calor a contra flujo está dada por la ecuación:

$$\varepsilon = \frac{1 - \exp\left[-\frac{UA}{C_{min}}\left(1 - \frac{C_{min}}{C_{máx}}\right)\right]}{1 - \frac{C_{min}}{C_{máx}} * \exp\left[-\frac{UA}{C_{min}}\left(1 - \frac{C_{min}}{C_{máx}}\right)\right]} \quad (2.22)$$

Para la determinación de las temperaturas de trabajo es necesario realizar una lectura de las temperaturas de los fluidos de entrada, en el modelo actual estas temperaturas son obtenidas de la salida del colector y la entrada por la bomba, para cada parámetro de tiempo se debe realizar una integración constante para conocer las temperaturas de salida.

Los flujos de calor para cada punto son dados por las ecuaciones 2.12 y 2.13 y son totalmente dependientes del conocimiento de las temperaturas de salida del fluido.

2.3.3 Termotanque estratificado.

Este elemento es el encargado de almacenar la energía del fluido de trabajo, el rendimiento térmico de un tanque de almacenamiento sujeto a estratificación térmica puede ser modelado por el supuesto de que el tanque se compone de N ($N \leq 100$) segmentos de volumen igual completamente mezclados. El grado de estratificación se determina por el valor de N . Si N es igual a 1, el tanque se modela como un tanque totalmente mezclado y no hay efectos de estratificación.

Un termotanque característico está diseñado con dos entradas y dos salidas de la misma manera que un intercambiador de calor a contra flujo.

Su procedimiento de trabajo también es muy similar debido a que la temperatura de salida en la parte superior es más caliente que la temperatura de salida en la parte fría. La Figura 2.3.4 describe el comportamiento del mismo.

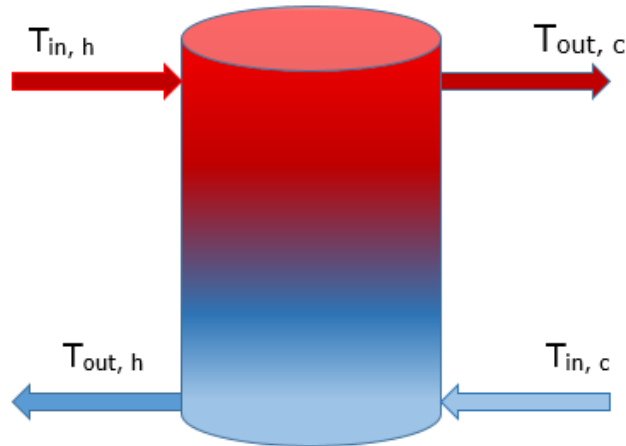


Figura 2.3.4 Entradas y salidas de temperatura en Termotanque estratificado.

El intercambio de calor en el termotanque se representa por la Ecuación 2.23.

$$\dot{Q}_h = \dot{Q}_c \quad (2.23)$$

- \dot{Q}_h es el calor total del lado caliente.
- \dot{Q}_c representa el calor total en la parte fría.

Para determinar estos miembros, se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$\dot{Q}_h = \dot{m}C_p(T_{in} - T_{out,h}) \quad (2.24)$$

$$\dot{Q}_c = \dot{m}C_p(T_{in,c} - T_{out,c}) \quad (2.25)$$

Debido a que el termotanque es un elemento al cual se le define una temperatura predeterminada T_s esta temperatura define la carga de calor total presente en todo el dispositivo, mediante la ecuación:

$$\dot{Q}_s = (\dot{m}C_p)s\Delta T_s \quad (2.26)$$

El termotanque estratificado requiere un análisis por cada capa del termotanque, el balance a realizar debe contemplar ciertos elementos como se muestra en la

Figura 2.3.5, en la cual, se ilustra la necesidad de tomar en cuenta la cantidad de calor de pérdidas al medio ambiente (Q_{per}) dentro del balance para cada capa de estratificación.

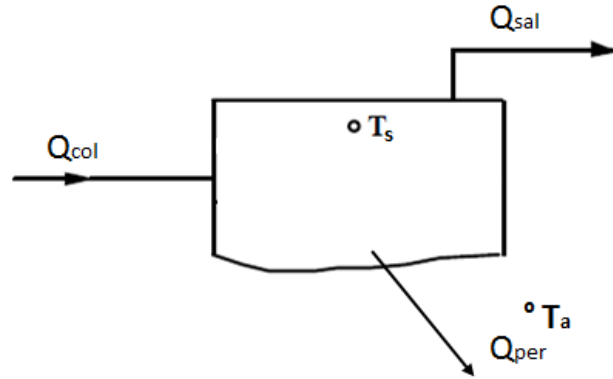


Figura 2.3.5 Balance de energía para un nodo de termotanque estratificado.

Tomando en cuenta las pérdidas al medio ambiente se obtiene que:

$$Q_{per} = (UA)_s(T_s - T'_a) \quad (2.27)$$

- UA_s es el coeficiente global de transferencia de calor dado por la Ecuación 2.12.
- T_s es la temperatura de trabajo deseada del termotanque.
- T'_a es la temperatura ambiente.

El balance de energía en ese nodo se representa mediante la siguiente ecuación:

$$(\dot{m}C_p)_s \frac{dT_s}{dt} = Q_{col} - Q_{sal} - Q_{per} \quad (2.28)$$

$(\dot{m}C_p)_s \frac{dT_s}{dt}$ está dado por la temperatura establecida en el control del termotanque y representa el calor almacenado por un periodo de tiempo dt .

2.3.4 Calentador eléctrico auxiliar.

El calentador auxiliar es un dispositivo empleado para aumentar la temperatura del fluido de trabajo si este lo requiere. Utiliza un controlador interno, externo o

incluso ambos, el cual establece la cantidad de potencia (Watts) necesaria para llevar la temperatura hasta el rango deseado.

En la figura 2.3.6 se ilustra el esquema de funcionamiento típico de un calentador eléctrico auxiliar.

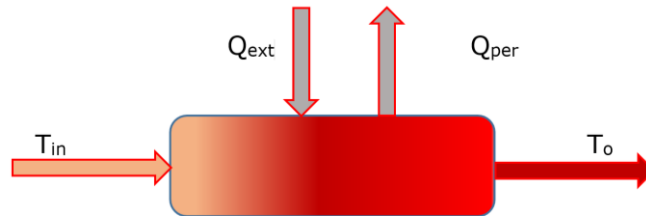


Figura 2.3.6 Entradas y salidas de temperatura y calor en un calentador eléctrico.

El balance termodinámico del calentador está definido por la siguiente Ecuación:

$$Q_{est} = Q_{fluido} - Q_{per} \quad (2.29)$$

y Q_{ext} está dado por:

$$Q_{ext} = \frac{\dot{m}C_{pf}(T_{des}-T_{in})+UA(T_{MED}-T_a)}{n_{calen}} \quad (2.30)$$

- $\dot{m}C_{pf}$ son el flujo másico y el calor específico del fluido de trabajo.
- T_{des} es la temperatura de salida deseada.
- T_{in} es la temperatura de entrada.
- UA es el coeficiente de transferencia de calor.
- n_{calen} la eficiencia del calentador.

T_{MED} está dado por la siguiente ecuación:

$$T_{MED} = \frac{T_{des}+T_{in}}{2} \quad (2.31)$$

El calor de pérdidas (Q_{per}) mencionado en la Ecuación 2.28 se define por:

$$Q_{per} = UA(T_{MED} - T_a) + (1 - n_{calen})\dot{Q}_{max} \quad (2.32)$$

donde \dot{Q}_{max} es la máxima cantidad de calor que puede aportar el calentador auxiliar.

El calor de un fluido dentro del calentador auxiliar está dado por la Ecuación 2.33:

$$Q_{fluid} = m_o C_{pf} (T_o - T_i) \quad (2.33)$$

T_o está dada por la ecuación siguiente:

$$T_o = \frac{\dot{Q}_{max} n_{htr} + \dot{m} C_{pf} T_{in} + UA T_{env} - \frac{UA T_{in}}{2}}{\dot{m} C_{pf} + \frac{UA}{2}} \quad (2.34)$$

Al ser T_o la variable de control, la eficiencia del calentador y la cantidad máxima de calor que puede aportar el calentador son completamente dependientes de esta variable de salida.

2.3.5 Relación área de colección-volumen de almacenamiento.

Para la elaboración de nomogramas es necesario conocer las relaciones de área y volumen de los elementos del sistema de colección para ello se harán los cálculos de estas proporciones. Es necesario conocer el índice de demanda de fluido dada en l/día o bien en m^3 /día.

Se debe establecer una razón de uso (RU) de los litros del fluido de trabajo que pasaran por cada m^2 de área de colección, esta relación está dada en l/día- m^2 y se muestra en la siguiente ecuación:

$$RU = \frac{Demanda}{A_c} \quad (2.35)$$

donde A_c es el área de colección del sistema propuesto.

Con la ecuación anterior se pueden hacer los cambios necesarios para adaptar el área de colección de acuerdo a un a una razón de uso establecida.

Otra relación que se necesita conocer es la razón volumétrica (RV) en términos de los litros de almacenamiento (volumen del tanque) por área de colección (l/m^2). La siguiente ecuación lo demuestra:

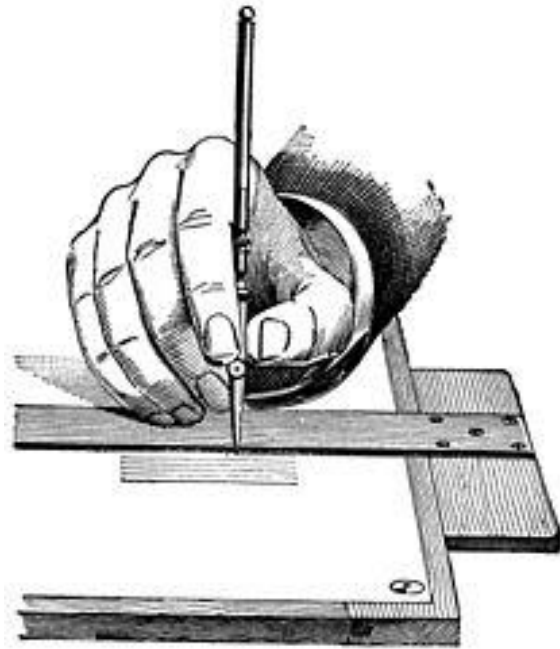
$$RV = \frac{VT}{A_c} \quad (2.36)$$

La última relación importante para el manejo de sistemas de calentamiento solar es la razón de flujo (RF) a continuación se muestra la ecuación correspondiente:

$$RF = \frac{\dot{m}}{A_c} \quad (2.37)$$

donde \dot{m} flujo másico del sistema en las mallas 1 y 2.

Con el conocimiento de estos parámetros se obtiene un esquema de rendimiento para un sistema de calentamiento solar bien definido.



Capítulo III.- Metodología y estrategia general de solución.

Este capítulo presenta las bases del funcionamiento del software TRNSYS, se muestran los componentes del sistema utilizado y sus especificaciones. Por último se explica la metodología y la estrategia de solución para la realización del estudio.

3.1 Generalidades del software TRNSYS.

En este capítulo se describen las funciones del programa TRNSYS, los componentes utilizados, sus características y la estrategia general empleada.

3.1.1 TRNSYS

TRNSYS es un programa de simulación de sistemas transitorios con una estructura modular que utiliza el método de funciones de transferencia para resolver el sistema de ecuaciones diferenciales que describen el problema físico. El nombre viene de “TRansient eNergy SYstem Simulation tool”. Está disponible desde 1975, surge como un proyecto conjunto entre la el Laboratorio de Energía Solar de la Universidad de Wisconsin-Madison y el Laboratorio de Aplicaciones en Energía Solar de la Universidad de Colorado.

La naturaleza modular de TRNSYS brinda al programa una gran flexibilidad y facilita la incorporación de modelos matemáticos no incluidos en la librería estándar. El programa se utiliza para análisis detallados de sistemas que presentan un comportamiento dependiente del tiempo.

En TRNSYS, cada componente del programa se describe por medio de una subrutina escrita en FORTRAN llamada comúnmente Type. La técnica modular del programa permite analizar un sistema completo como la suma de componentes individuales. El ejecutable de TRNSYS resuelve los componentes del sistema de ecuaciones e itera en cada instante de tiempo, hasta que el sistema converge. Los componentes de TRNSYS incluyen sistemas termoenergéticos como equipos de acondicionamiento, edificios detallados, sistemas solares térmicos, entre otros. Por lo tanto, el uso de TRNSYS facilita la solución de sistemas energéticos complejos, debido a su estructura modular.

3.1.2 Simulación térmica en estado transitorio y permanente.

Se define como una simulación transitoria si el tiempo es una variable en el modelo de alguno de los componentes del sistema. En general una simulación transitoria es requerida si una de las tres situaciones ocurren:

1. Un componente del sistema tiene una salida variable, la cual está en función del tiempo.
2. La descripción matemática de un componente del sistema involucra una o más ecuaciones diferenciales dependientes del tiempo, esto quiere decir que su derivada es diferente de cero.
3. Una cantidad física calculada por la simulación debe ser integrada en el tiempo por el componente integrador.

TRNSYS espera que las derivadas de las variables dependientes en cualquier instante sean evaluadas por el componente del modelo. Usando los valores proporcionados de las derivadas. Así también el programa automáticamente realiza la integración para evaluar las variables independientes.

La simulación de sistemas no transitorios son llamadas simulaciones en estado permanente. Un sistema en estado permanente es uno en el cual ninguna de las variables del sistema cambia con el tiempo. TRNSYS puede ser usado para simulaciones en ambos casos.

3.2 Componentes del programa y sus especificaciones.

El software TRNSYS cuenta con una subrutina para resolver ecuaciones algebraicas y diferenciales que incorpora una librería con los sistemas más comunes termoenergéticos y de diseñado, especialmente para simulaciones transitorias.

Cada uno de los componentes que con los que cuenta el software se describe mediante una subrutina que en la nomenclatura que utiliza TRNSYS recibe el nombre de TYPE. Esta técnica permite analizar un sistema entero como la suma de componentes o sistemas individuales y la interconexión entre éstos.

El programa a simular consta de lo siguiente:

- 1 Colector solar de placa plana.
- 2 Intercambiadores de calor.
- 1 Termotanque estratificado.
- 1 Calentador eléctrico auxiliar.
- 4 Bombas hidráulicas.

Las especificaciones de cada elemento se presentan en la siguiente tabla, estas especificaciones se dan para que el conjunto cumpla con una demanda diaria de 25000 litros de agua tratada a 90°C que se incorporará a algún proceso.

Tabla 3.2.1 Especificaciones de los elementos del sistema.

Especificaciones de los elementos	
Colector Solar	
Tipo	Placa Plana
Área de Colección	200 m ²
Fluido de transferencia por el colector	Agua/Glicol Cp= 3.7 kJ/(m ² *K)
Eficiencia de Intercepción	0.811
Ángulo Azimutal	Frente al Ecuador
Ángulo de inclinación	40°
Intercambiadores de Calor (HX)	
Cantidad	2
Coeficiente de transferencia de calor	24000 W/K
Fluido de trabajo en HX1	Agua/Glicol Cp= 3.7 kJ/(m ² *K)
Fluido de trabajo en HX2	Agua Cp= 4.19 kJ/(m ² *K)
Bombas Hidráulicas	
Cantidad	4
Eficiencia total en las bombas	0.6

Eficiencia del motor de las bombas	0.9
Potencia Nominal en las Bombas 1 y 2	6 (kW)
Potencia Nominal en las Bombas 3 y 4	5 (kW)
Capacidad de las bombas 3 y 4	6000 (kg/hr)
Capacidad de las bombas 1 y 3	Flujo variable según el perfil de carga
Fluido de trabajo en la bomba 1	Agua/Glicol $C_p = 3.7 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
Fluido de trabajo en las bombas 2 y 3	Agua
Fluido de trabajo en la bomba 4	Agua tratada
Termotanque Estratificado	
Tipo	Cilindro vertical 2 entradas y 2 salidas
Capacidad	4 m ³
Fluido de trabajo	Agua
Coefficiente de perdida térmica	0.833 kJ/(hr*m ² *K)
Análisis Nodal	5 secciones
Calentador Auxiliar	
Tipo	Eléctrico convencional

3.3 Metodología y estrategia general de solución.

Se tomara un sistema previamente diseñado para el calentamiento de agua con el fin de satisfacer la demanda de uso de 25,000 litros de agua tratada a 90°C, la representación del sistema vincula cada elemento de tal manera que estos se relacionen mutuamente en cada parte del proceso.

A este proceso se han incorporado un sistema de control por diferencia de temperaturas el cual regula el funcionamiento de las bombas, es decir, cuando el proceso se encuentra en su desempeño más óptimo tiene la capacidad de impedir o dar paso al funcionamiento de las bombas.

El control del sistema se aplica censando las temperaturas de salida del colector y el tanque de almacenamiento. Los perfiles de carga se varían de acuerdo al tiempo de uso y el horario de partida.

La Figura 3.3.1 muestra el sistema planteado:

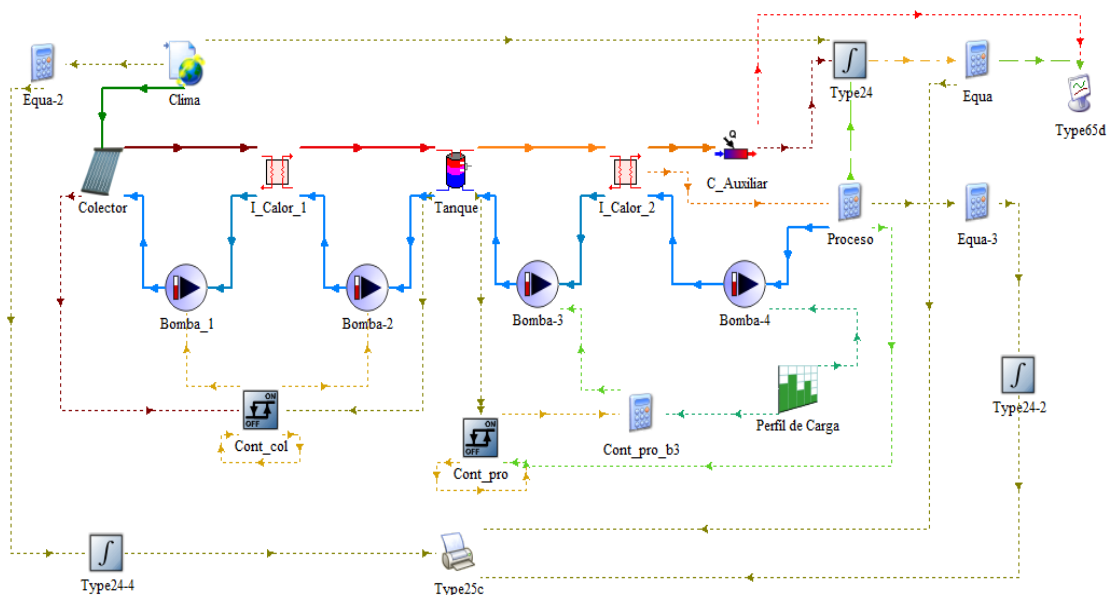


Figura 3.3.1 Sistema de precalentamiento de agua en software TRNSYS

El propósito es optimizar este sistema variando los perfiles de carga de acuerdo a horas de uso y horarios de arranque. El sistema permite hacer variaciones en el perfil de carga, el cual afecta directamente en el funcionamiento de las bombas 3 y 4, de esta manera se pueden hacer simulaciones anuales con cualquier perfil de carga.

Los criterios a evaluar en este proyecto son: Fracción Solar, Eficiencia y Energía Útil del sistema, estos valores se compararan de acuerdo a las horas de uso y de arranque del sistema. Las horas de uso variaran desde 1 a 24 horas y la hora de arranque es: a partir de mediodía aumentando de manera piramidal el uso del sistema.

Cada uno de los criterios evaluados se grafican por separado. En la Sección 4.3 se presenta un análisis comparativo de la Fracción Solar entre cada perfil de carga

para identificar aquel que haga más óptimo el sistema. A continuación se muestra un esquema de la metodología general utilizada.

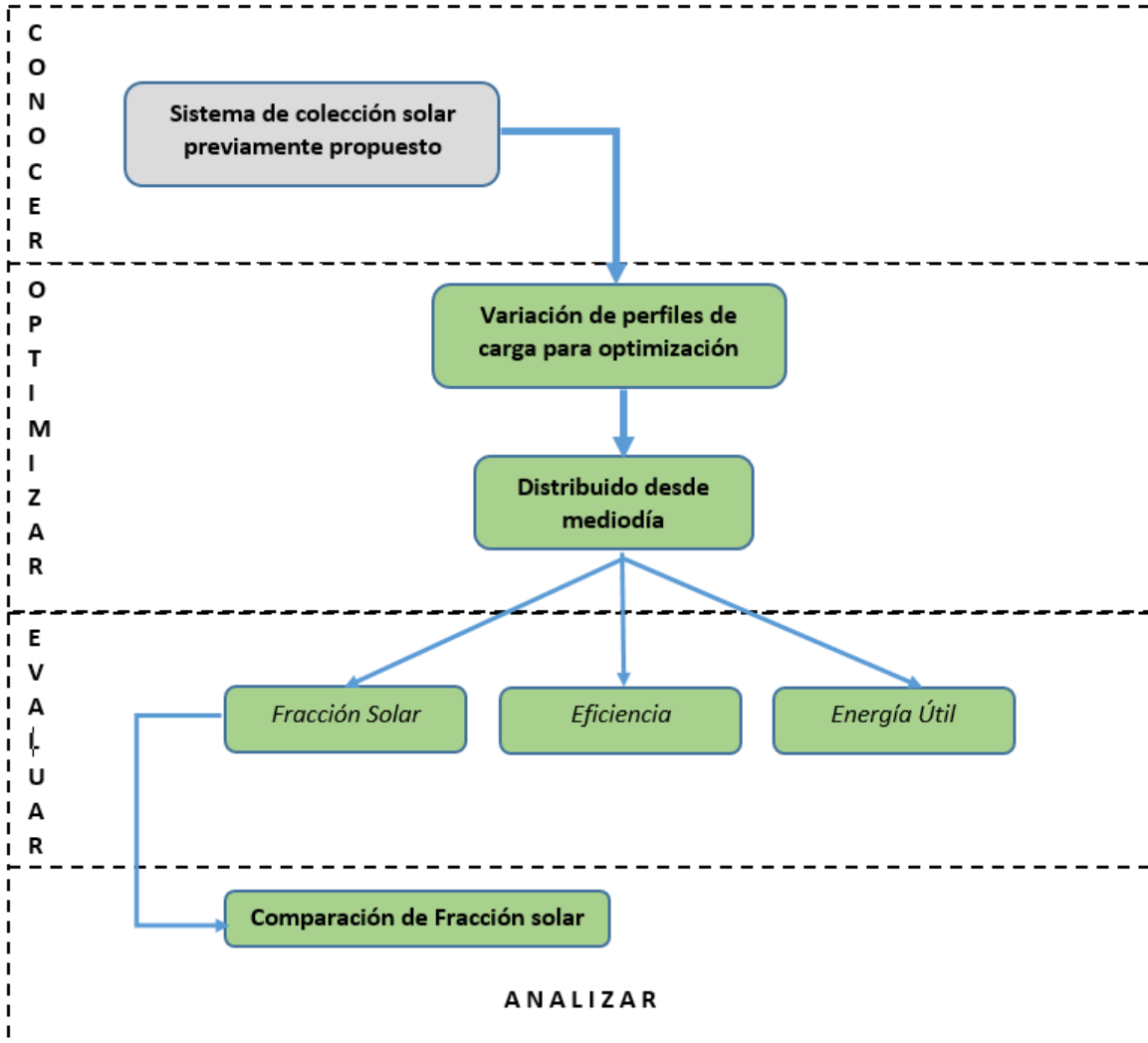


Figura 3.3.2.- Esquema de la metodología a seguir.

En la siguiente tabla se muestra la simbología y nomenclaturas de los elementos empleados en el sistema elaborado en TRNSYS.

Tabla 3.3.1 Componentes empleados en el sistema propuesto.

Elemento	Type	Descripción	Simbología en TRNSYS
Base de Datos del Clima	Type 15-2	TMY-2	
Colector Solar	Type 71	Colector de Placa Plana	
Intercambiador de Calor	Type 5b	Intercambiador a Contraflujo	
Termotanque	Type 60	Estratificado, Vertical y con Perdidas Uniformes	
Calentador Auxiliar	Type 6	Eléctrico, T _s 90°C	
Bomba Hidráulica	Type 110	Velocidad Variable	
Perfil de Carga	Type 14	Carga de Demanda de Agua Variable	
Controlador On-Off	Type 2	Genera una señal de encendido o apagado	
Controlador de Set-Points	Process	Censa y determina Set-points de elementos	
Integrador	Type 24	Integra datos anualmente	
Graficador	Type 65c	Representa gráficamente los resultados analizados	
Impresora	Type 25c	Presenta los resultados en documentos de texto	

3.4 Preparación del programa de simulación.

El programa de simulación que se utiliza para el estudio de este proyecto no contempla la optimización del sistema de calentamiento por otros medios más que la variación de los perfiles de carga. Es por esta razón que a continuación se definen parámetros estándar que de acuerdo con la revisión bibliográfica resultan ser más óptimos para sistemas de media temperatura como el que estamos analizando.

Los parámetros a definir son los siguientes:

- Razón de Uso.
- Razón Volumétrica.
- Razón de Flujo.

La demanda de uso diaria es de 25,000 litros de agua tratada a 90°C. De acuerdo a la investigación previamente realizada se estima que una razón de uso óptima para sistemas de media temperatura es 125 kg/hr-m² entonces, de la ecuación 2.35 se tiene que al despejar el área de colección esta sería:

$$A_C = \frac{Demanda}{RU} = \frac{25,000}{125} = 200 \text{ m}^2 \quad (3.1)$$

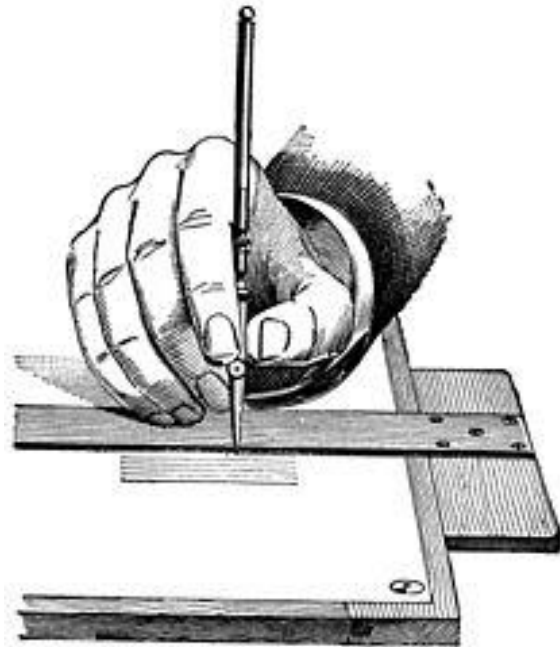
Ahora, de la ecuación 3.1 conocemos el área de colección y con este dato se puede calcular el volumen del tanque de almacenamiento despejando esa incógnita de la ecuación 2.36 ya que la razón volumétrica es conocida, de 20 litros/m²-año.

$$VT = RV * A_C = 20 * 200 = 4,000 \text{ litros} \quad (3.2)$$

Por último se realiza el cálculo flujo másico, la razón de flujo que como ya se mencionó, este dato también se tomó de la investigación realizada el cual es 15 kg/hr. Entonces, el flujo másico en las bombas 1 y 2 será de:

$$\dot{m} = RF * A_C = 15 * 200 = 3,000 \text{ kg/hr} * \text{m}^2 \quad (3.3)$$

Estos datos permanecerán constantes para todo el proceso de simulación del estudio en cuestión.



Capítulo IV.- Resultados.

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de la simulación del sistema de calentamiento de agua para producción de vapor mediante el programa TRNSYS y su discusión. Las simulaciones fueron realizadas para años completos en estado dinámico y transitorio, se realizó la variación de perfiles de carga para cada caso. Al final se presenta un comparativo entre cada caso de estudio y se definió el parámetro Fracción Solar como criterio de selección del sistema más adecuado.

4.1 Verificación de la estrategia en TRNSYS.

El programa planteado para la simulación de los perfiles de carga a lo largo de distintas secciones del día fue probado para comprobar su veracidad, se realizó un nomograma y se comparó con uno de referencia para verificar que los datos coincidieran y validar de esta manera que el programa diseñado funciona correctamente.

En la Figura 4.1.1 se presenta el nomograma elaborado para la ciudad de Graz, Austria el cual se comparó con el de referencia. Al reproducir los datos del caso de referencia se observa una ligera incertidumbre en los datos que promedia en un 4.5%.

El sistema fue una propuesta de Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE. Se utilizaron datos de acuerdo a lo reportado por la Agencia Internacional de Energía (IEA).

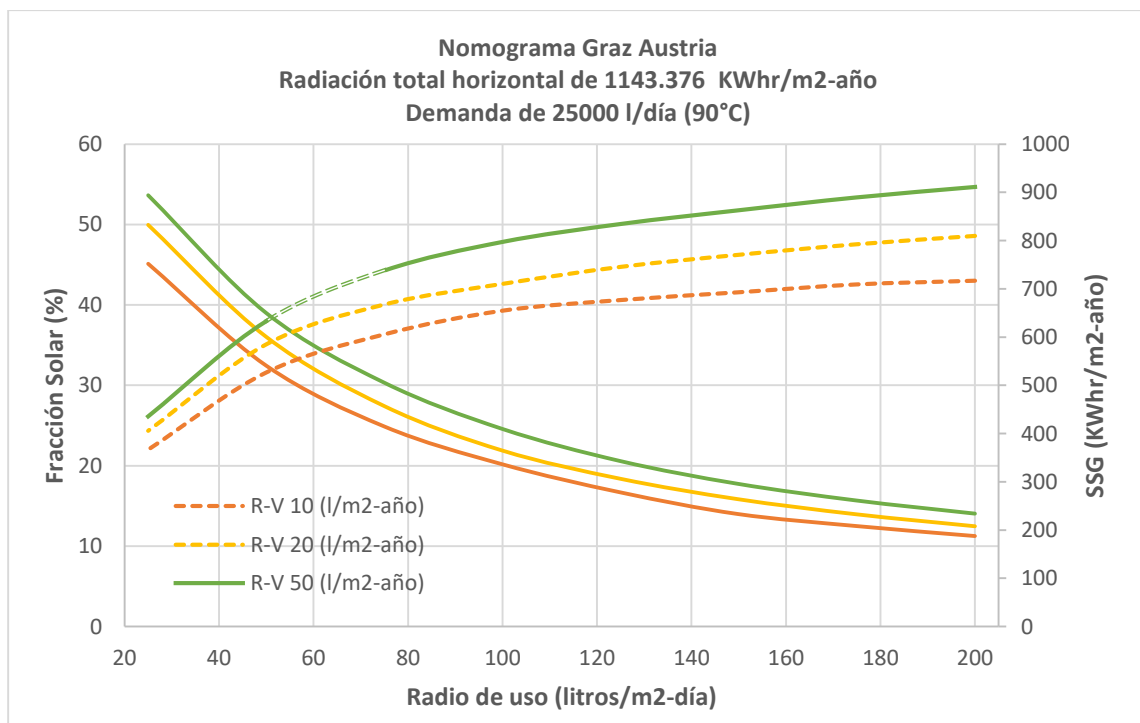


Figura 4.1.1 Nomograma de sistemas de colección para diferentes razones volumétricas.

En este nomograma se presentan los datos evaluados de Fracción Solar y Energía útil (SSG) para tres razones volumétricas y distintos Radios de uso. Cada color representa una Razón Volumétrica, del lado izquierdo se aprecian los resultados para las fracciones solares siguiendo las líneas continuas y del lado derecho se muestran los resultados para los distintos valores de SSG siguiendo las líneas punteadas.

En la Tabla 4.1.1 se muestra un comparativo de la Fracción solar, donde se resalta que la diferencia máxima fue de solo 5.05% y que en promedio fue de 4.5%. Una vez verificado que el sistema de calentamiento presenta resultados aprobatorios se designa este programa como base para las simulaciones posteriores.

Tabla 4.1.1 Comparación de resultados de fracción solar.

333 m ²	Sistema de referencia		Sistema elaborado		Porcentajes de error	
	Razón volumétrica (l/m ² -año)	Fracción solar %	Energía útil (kWhr/año-m ²)	Fracción solar %	Energía útil (kWhr/año-m ²)	Fracción solar %
10	23.72	583	24.86	606.042	4.58	3.802
20	26.23	645	27.39	667.565	4.23	3.38
50	28.76	716	30.299	738.462	5.05	3.041

La Tabla 4.1.1 hace referencia a un área de colección específica pero el comportamiento es similar en los demás casos de áreas distintas que presenta el nomograma.

4.2 Propuesta de perfiles de carga.

A continuación se presentan los perfiles de carga empleados para la simulación con el programa establecido, cabe recordar que el flujo de las bombas 3 y 4 es variable dependiendo el perfil de carga que se esté evaluando, esto para garantizar que se cubre la demanda diaria de 25,000 litros/día.

Se pretende cubrir la demanda diaria haciendo variar el perfil de carga desde 1 a 24 horas partiendo desde el centro del medio día e ir aumentando secuencialmente cada hora el tiempo de uso del sistema.

La siguiente figura representa la distribución del perfil de carga, aunque solo se muestra la distribución de la carga para un periodo no mayor a 6 horas en la simulación se consiguió evaluar las 24 horas del día.

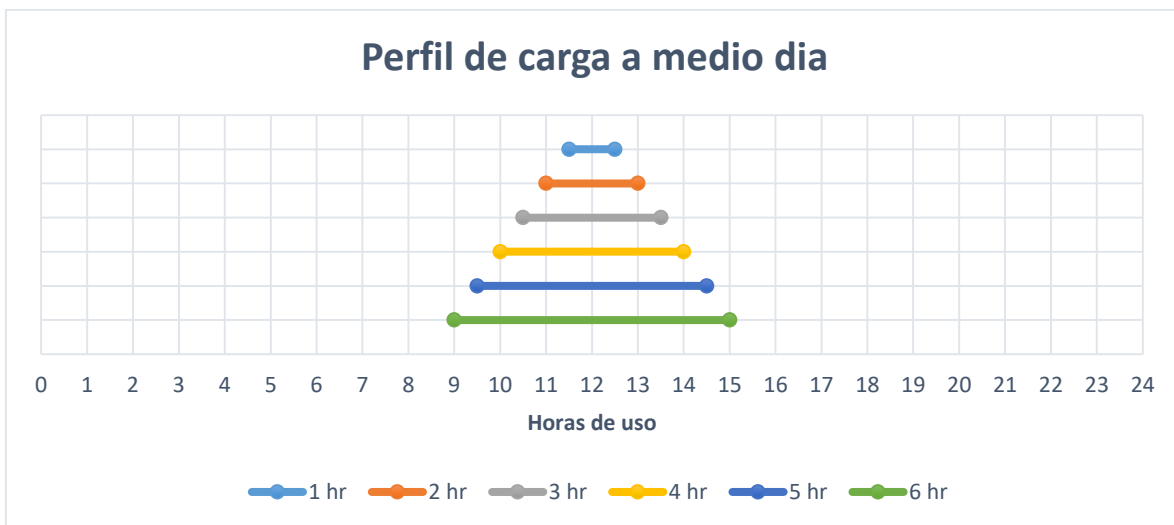


Figura 4.2.1 Sección de la distribución de carga a mediodía.

La elección de tomar la distribución horaria desde el centro del mediodía es para aprovechar al máximo las horas de luz solar. A continuación se presenta una tabla con los flujos volumétricos que manejan las bombas 3 y 4 respecto al tiempo de uso del sistema para cubrir la demanda diaria.

Tabla 4.2.1 Flujos máxicos de las bombas según su tiempo de uso.

Tiempo de uso (horas)	Flujo máxico en las bombas 3 y 4 (kg/hr)
1	25,000
2	12,500
3	8,333.333
4	6,250
5	5,000
6	4,166.67
7	3,751.43
8	3,125
9	2,777.7778
10	2,500
15	1,666.6667
20	1,250
21	1,190.4762
22	1,136.3637
23	1,086.9566
24	1,041.6667

4.3 Resultados Fracción solar, Eficiencia y Energía útil.

Se evaluó cada perfil de carga en horarios de uso distribuidos a lo largo de las 24 horas del día por un año completo. En este apartado se muestran las gráficas de Fracción Solar, Eficiencia y Energía Útil del sistema para la ciudad de Chihuahua, Chihuahua. A cada gráfica se le agrega una línea de tendencia y la ecuación que describe el comportamiento de la misma.

A continuación se muestra la gráfica de Fracción Solar seguida de la Eficiencia y por ultimo Energía Útil. La figura 4.3.1 muestra el comportamiento de la Fracción Solar a medida que avanzan las horas de uso del sistema con horario de arranque a partir de mediodía y distribuido piramidalmente.

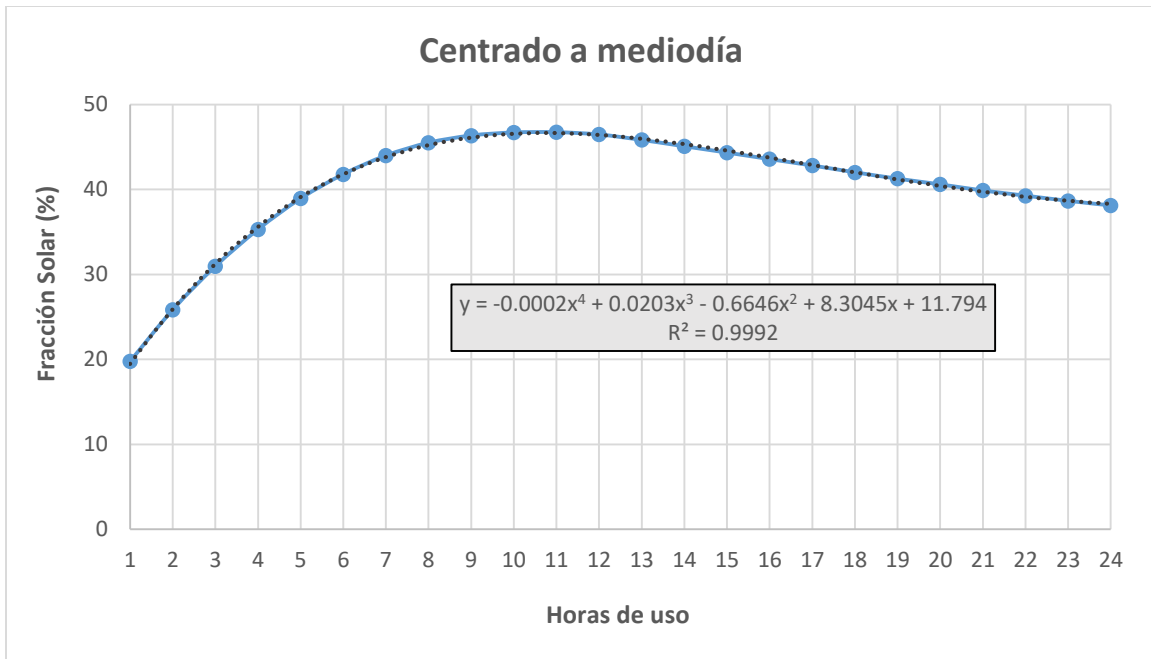


Figura 4.3.1 Gráfica de Fracción Solar a mediodía.

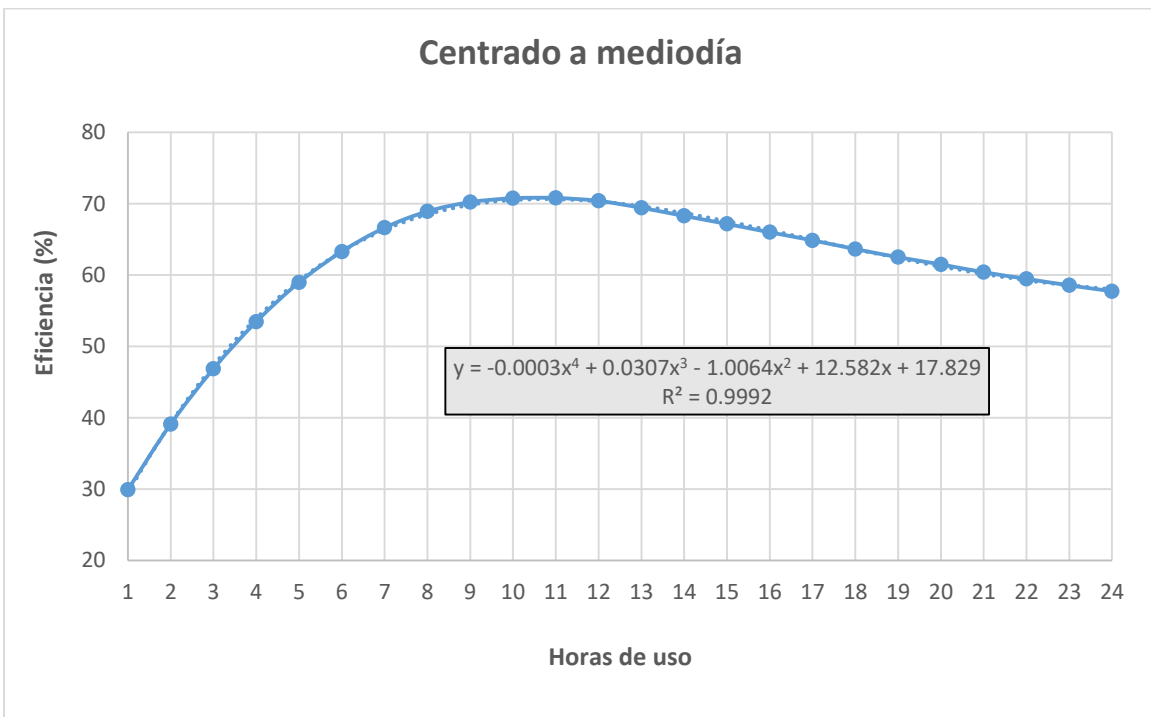


Figura 4.3.2 Gráfica de Eficiencia a mediodía.

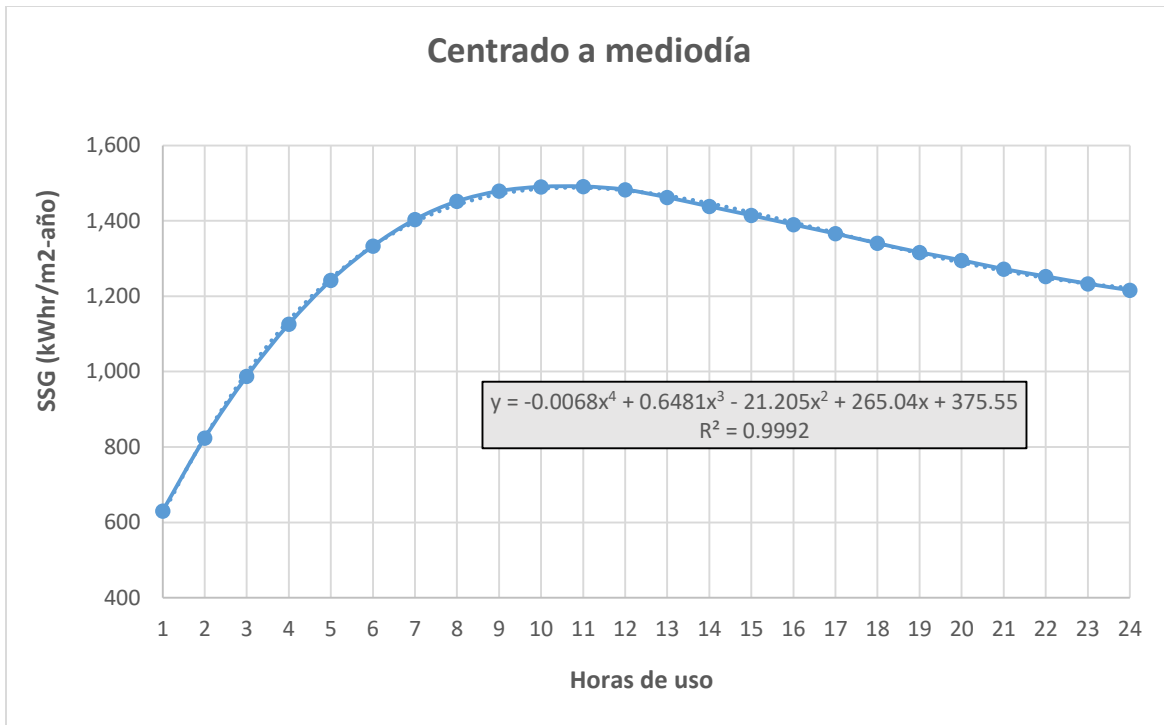


Figura 4.3.3 Gráfica de Energía Útil a mediodía.

En estas gráficas se puede apreciar las curvas de tendencia que presentan cada criterio evaluado, todos presentan el mismo comportamiento con una curva ascendente hasta aproximadamente las 11 horas de uso pero después decrece a una razón menos pronunciada. Se hará un mayor énfasis en el análisis de la curva de Fracción Solar en secciones posteriores.

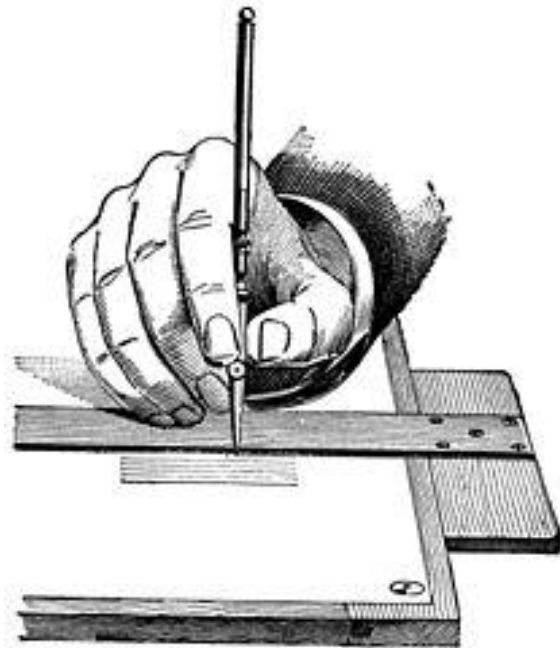
4.4 Discusión de fracción solar.

La Fracción Solar de un sistema particular depende de muchos factores, como la carga, las dimensiones de los captadores y acumuladores, el funcionamiento y el clima. En este estudio, el factor a evaluar es la carga o perfil de carga del sistema, ya que los demás parámetros son constantes y se aplica siempre en el mismo lugar (Chihuahua), la misma área de colección (200 m²) y misma acumulación (4 m³).

El criterio de evaluar los perfiles de carga tiene consigo analizar la manera en que cambia la Fracción Solar. Ya que es una de las principales criterios de determinación de sistemas solares de captación más óptimos.

La fracción máxima alcanzada por el sistema según los datos de la gráfica se encuentran cuando se cubre un total de 11 horas de uso continuo con luz solar, después de eso la fracción solar decae.

La manera de valorar el sistema más óptimo es en base a su Fracción Solar máxima alcanzada. Cada perfil de carga se evaluó para un año completo en condiciones climatológicas de la ciudad de Chihuahua, Chihuahua. Para una radiación total horizontal anual de 2,105.950 kWhr/m²-año.



Capítulo V.- Conclusiones y recomendaciones.

Por último en este trabajo se formulan las conclusiones del estudio realizado y se aportan algunas recomendaciones las cuales se sugieren para estudios futuros.

5.1 Conclusiones.

- Se realizó un estudio de un sistema solar de calentamiento de agua para el precalentamiento de agua para producción de vapor, utilizando el software TRNSYS que permitió variar los perfiles de carga encontrándose que la fracción solar y la eficiencia varían considerablemente al variar el perfil de carga diario 57.68% y 57.73% respectivamente.
- Los resultados demuestran que la Fracción Solar máxima alcanzada por el sistema es de 46.75% siendo alcanzada con un perfil de carga de flujo continuo en 11 horas (6:30 am-5:30 pm).
- Al igual que la gráfica de Fracción solar, las gráficas de Eficiencia y Energía Útil (SSG) muestran la misma tendencia teniendo como punto crítico máximo 70.81% y 1491 kWh/m²-año respectivamente.
- El recurso solar con el que cuenta en Chihuahua es apto, ya que se logran fracciones solares y eficiencias de desempeño térmico considerables, es de observar que supera a los de otros países que ya implementan energía solar térmica para calor de procesos.

5.2 Recomendaciones para trabajos futuros.

- Realizar estudios experimentales de este sistema solar de calentamiento de agua para comparar los datos obtenidos con las simulaciones realizadas en este trabajo.
- Realizar el estudio con diferentes horarios para los perfiles de carga de flujo continuo o realizar el estudio con perfiles de carga de flujo tipo sierra.
- Aplicar el estudio realizado solo para las horas de luz solar de un día típico.

5.3 Competencias aplicadas y desarrolladas.

- Se aplicaron los conocimientos básicos de Termodinámica y Transferencia de Calor y Masa para el entendimiento del sistema de calentamiento y algunas ecuaciones de Mecánica de Fluidos para el cálculo de flujo másico en las bombas del sistema.
- Se aplicaron conocimientos en base al manejo de programas computarizados.
- Se realizaron análisis rigurosos para la interpretación de datos obtenidos y la creación de gráficas.
- Se desarrollaron conocimientos sobre el uso e implemento de sistemas de colección solar.
- Durante la estancia en el CENIDET y en conjunto con mis compañeros de trabajo armamos un colector solar de tubos de vacío de tamaño industrial.

Referencias bibliográficas y virtuales.

1. Dadgougui, H., Ouammi, A., Robba, M., Sacik, R., (2015) Thermal analysis and performance optimization of a solar water heater flat plate collector; Application to Tetouan (morocco). *Renewable and sustainable energy reviews* (15), 630-638.
2. Ramos, C., et al. (2013) Advances on the Development of the Parabolic Trough Technology in México, Cuernavaca, Morelos, México.
3. Kalogirou, S. (2002). The potential of solar industrial process heat applications. Recuperado el 13 de Septiembre de 2015, de www.sciencedirect.com
4. Frein, A., M. Calderoni, and M. Motta. (2014) "Solar Thermal Plant Integration into an Industrial Process." *Energy Procedia* 48: 1152–63. <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2014.02.130>.
5. Emilia Visek, Livio Mazzerella, Mario Motta (2013) Performance analysis of solar cooling system using self-tuning fuzzy-PID control with TRNSYS. <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84922308902&partnerID=40&md5=801391c77ffba8a2d8b131bf4a36f130>
6. Biencinto, M., Gonzales, L., Valenzuela, L., (2016) A quasi-dynamic simulation model for direct steam generation in parabolic troughs using TRNSYS. *Applied energy* (161), 133-142.
7. Enrique Álvarez Torres y Félix Ponce Ceballo (2010) *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, Vol. 19, No. 3.
8. Santiago de Jesús Ramírez Martínez (2016) *Energía solar térmica para el precalentamiento en la producción de vapor. Informe de Residencia Profesional.*

9. José Guillermo Farfán Caballero (2016) Estudio de la combinación de captadores cilindro parabólicos con colectores planos para calentamiento solar aplicable a la industria. Informe de Residencia Profesional.
10. Eric Vladimir Pérez Grajales (2015) Simulación de sistemas de aprovechamiento de la energía solar. Informe de Residencia Profesional.
11. Soteris Kalogirou (2002) The potential of solar industrial process heat applications.
12. Cora Placco, Luis Saravia y Carlos Cadena (2010) Colectores solares para agua caliente. Volumen 1.
13. Vázquez Sánchez Luís Javier (2012) Estudio Térmico de un Edificio Vidriado Ubicado en la Ciudad de México y Evaluación de su Habitabilidad para el confort.
14. O. A. Jaramillo (2007) Intercambiadores de Calor. Centro de Investigación en Energía. Universidad Autónoma de México.