



Humanidades, Ciencia, Tecnología e Innovación en Puebla

ISSN 2644-0903 online

Vol. 3. No. 1, 2021

www.academiajournals.com

TRABAJO DE INVESTIGACIÓN AUSPICIADO POR EL
CONVENIO CONCYTEP-ACADEMIA JOURNALS



Gobierno de Puebla

Hacer historia. Hacer futuro.



Secretaría
de Educación
Gobierno de Puebla

CONCYTEP
Consejo de Ciencia
y Tecnología del Estado
de Puebla

ARMANDO LÓPEZ MILA

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO DE ALBERCA Y REGADERAS DEL CAMPUS CENTRAL DE LA UPAEP, A. C., PARA LA MEJORA DE EFICIENCIA ENERGÉTICA

UNIVERSIDAD POPULAR AUTÓNOMA DEL ESTADO DE PUEBLA

DIRECTOR: DR. FRANCISCO JAVIER SANCHEZ RUIZ
CODIRECTOR(A): DRA. GENOVEVA ROSANO ORTEGA
ASESOR: DR. CARLOS ARTURO VEGA LEBRÚN

Maestría en Ingeniería Ambiental y Desarrollos Sustentable



Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla

Centro Interdisciplinario de Posgrado

Investigación y Consultoría

Decanato Ciencias Biológicas

Maestría en Ingeniería Ambiental y Desarrollo Sustentable

Modelado y simulación del sistema de calentamiento de alberca y regaderas del campus central de la UPAEP, A. C., para la mejora de eficiencia energética

Tesis para obtener el Grado de Maestro en Ingeniería Ambiental
y Desarrollo Sustentable

Armando López Mila

Dr. Francisco Javier Sanchez Ruiz

Director

Dra. Genoveva Rosano Ortega

Codirector(a)

Dr. Carlos Arturo Vega Lebrún

Asesor

Puebla, México

2020

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO DE ALBERCA Y REGADERAS DEL CAMPUS CENTRAL DE LA UPAEP, A. C., PARA LA MEJORA DE EFICIENCIA ENERGÉTICA.

López-Mila, Armando¹; Sánchez-Ruiz, Francisco Javier²; Rosano-Ortega, Genoveva³

¹UPAEP (Ingeniería Ambiental)
armando.sistem1@gmail.com

²UPAEP (Ingeniería Ambiental) ³UPAEP (Ingeniería Ambiental)

Resumen. En la actualidad es necesario desarrollar las habilidades para evaluar sistemas de calentamiento térmico aplicado a procesos donde sea posible usar energía solar, el propósito de este trabajo fue formular métodos para modelar y simular estos sistemas, para encontrar resultados que faciliten el diseño/modificación de sistemas térmicos, como en el caso de la UPAEP que está ubicado en Puebla, Barrio de Santiago, en el campus central, el cual utiliza energía termo solar complementada con fuentes fósiles para el calentamiento de la alberca y regaderas, de acuerdo con el resultado obtenido se logra incrementar el aprovechamiento energético a través de la modelación matemática y la simulación computacional, donde de manera teórica se realiza la simulación, logrando mejorar la eficiencia de los sistemas de calentamiento de agua de las regaderas del 55% al 62% y en la alberca del 19% al 22%, lo que permitiría cumplir con los requerimientos mínimos necesarios para el aprovechamiento energético de ambos sistemas, con una inversión monetaria recuperable en un máximo de 2 años, demostrando que la modelación matemática y la simulación computacional son herramientas oportunas para evaluar sistemas térmicos. Las variables que definen al sistema son, tamaño, tipo de equipos de almacenamiento térmico, el área de trabajo de los equipos, el diferencial de temperaturas, presión y flujo. Donde se observó que los parámetros más importantes dentro del proceso son el flujo y diferencial de temperaturas, así como la ubicación geográfica que define la inclinación más oportuna para la óptima operación de los equipos, finalmente este estudio puede replicarse en el análisis de otros sistemas, haciéndolos más eficientes procurando el menor uso de combustibles fósiles, minimizando el envío de gases de efecto invernadero a la atmósfera y por ultimo reduciendo los costos derivados del uso de combustibles fósiles.

Palabras clave: Energía solar, calentadores, térmico.

Abstract. At present it is necessary to develop the skills to evaluate thermal heating systems applied to processes where it is possible to use solar energy, the purpose of this work was to formulate methods to model and simulate these systems, to find results that facilitate the design / modification of thermal systems, like happens in the UPAEP, which is located in Puebla, Barrio de Santiago, on the central campus, which uses solar thermal energy complemented with fossil sources to heat the pool and showers, according to the result obtained, succeeds to increase energy use through

mathematical modeling and computational simulation, where in a theoretical way the simulation is carried out, improving the efficiency of the water heating systems of the showers from 55% to 62% and in the pool of the 19% to 22%, which would allow achieve the minimum requirements necessary for energy use in both systems, with a monetary investment recoverable in a maximum of 2 years, demonstrating that mathematical modeling and computational simulation are appropriate tools to evaluate thermal systems. The variables that define the system are size, type of thermal storage equipment, the equipment's work area, temperature, pressure and flow. Where it was observed that the most important parameters for the process are the flow and temperature differential, as well as the geographical location that defines the most opportune inclination for the optimal operation of the equipment, finally this study can be replicated in the analysis of other systems, making them more efficient by ensuring the least use of fossil fuels, minimizing the emission of greenhouse gases into the atmosphere and finally reducing the costs derived from the use of fossil fuels.



**UNIVERSIDAD POPULAR AUTÓNOMA DEL ESTADO DE PUEBLA
DIRECCIÓN DE SERVICIOS ESCOLARES
CONSTANCIA DE ACREDITACIÓN DE EXAMEN PROFESIONAL**

El que suscribe, Mtro. Francisco José Maldonado Altieri, Director de Servicios Escolares de la Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla, hacer CONSTAR que:

En la ciudad de Puebla, Pue., el día catorce de diciembre del año dos mil veinte se reunieron en el Aula de Exámenes Profesionales los sinodales designados como miembros del jurado para proceder a realizar el Examen Profesional que para obtener el **GRADO de MAESTRIA en INGENIERIA AMBIENTAL Y DESARROLLO SUSTENTABLE** sustentó el señor **ARMANDO LOPEZ MILA**.

El sustentante fue interrogado por los sinodales y después de deliberar emiten el siguiente dictamen:

APROBADO POR UNANIMIDAD

Acto seguido, el Presidente del jurado dio a conocer el veredicto al sustentante, con lo cual se dio por terminado el Examen Profesional.

Dado en la Heroica Ciudad de Puebla, Pue., a cinco de enero del año dos mil veintiuno.

EL DIRECTOR DE SERVICIOS ESCOLARES

MTRO. FRANCISCO JOSÉ MALDONADO ALTIERI



Se puede verificar la autenticidad de este documento leyendo este código.

Puebla, Pue., a 23 de Noviembre de 2020

Dra. Genoveva Rosano Ortega

Directora del Programa de Ingeniería Ambiental y Desarrollo Sustentable

Asunto: Revisión de plagio para proyecto de grado

Estimada Doctora Genoveva Rosano Ortega

Antes que nada, reciba un cordial saludo y nuestro apoyo y compromiso de colaboración con los requerimientos del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología para las actividades de aseguramiento de la calidad de consolidación del posgrado.

Derivado del proceso de revisión de la herramienta de antiplagio **Safe Assign** se detectaron los siguientes hallazgos:

Coincidencia Promedio: 3%

Coincidencia Máxima: 3 %

Por lo anterior se vislumbra un riesgo **BAJO** en el análisis del documento para la obtención del grado del **alumno Armando López Mila**, en donde se ha revisado el detalle y las citas al interior del documento. Las coincidencias se deben principalmente a la referenciación de normas.

Se anexa reporte del informe de la herramienta.

ATENTAMENTE



Dr. Francisco Javier Sanchez Ruiz
Director de Tesis

Originality Report de SafeAssign

Resumen del informe

Riesgo bajo

Estos documentos contienen una gran cantidad de material citado o parafraseado, y pueden constituir un plagio. Es recomendable realizar una revisión para determinar si el contenido que coincide se ha atribuido correctamente.

Similitud de texto general

3 %

Coincidencia promedio

3 %

Coincidencia máxima

Tesis Armando.pdf

Originality Reports (1)

ÍNDICE:

- Capítulo I. Introducción.....	3
o I.1 Antecedentes de la investigación.....	3
o I.1.1 Planteamiento del problema.....	4
o I.1.2 Objetivo general y específicos.....	5
o I.1.3 Justificación e hipótesis.....	5
o I.1.4 Características del lugar donde se realizó el estudio.....	7
- Capítulo II Marco teórico.....	11
o II.1 Energía solar.....	11
o II.2 Energía solar térmica aplicaciones de baja media y alta temperatura.....	20
o II.3 Sistemas de calentamiento solar.....	23
o II.4 Variables de proceso en el sistema térmico de estudio.....	25
o II.5 Equilibrio térmico y Transferencia de calor.....	30
o II.6 consideraciones del sistema para el modelado matemático.....	31
o II.7 Modelado matemático del sistema.....	38
- Capítulo III Metodología.....	40
o III.1 Modelado del sistema térmico a través de ecuaciones diferenciales.....	40
o III.2 Mat Lab y Comsol aplicados al sistema.....	45
o III.3 Modelado y simulación una comparativa de los datos de campo.....	49
o III.4 Estudio de campo y simulaciones en Matlab y Comsol.....	61
o III.5 Análisis de campo.....	71
- Capítulo IV Resultados.....	74
o IV.1 Discusión de los resultados.....	74
o IV.2 Análisis financiero.....	76
- Conclusiones y recomendaciones.....	81
- Anexos	
- Referencias	

Índice de tablas

Tabla 1. Valores recomendables de n aproximados por fecha. Fuente: (Duffie, & Beckman, 2013).....	18
Tabla. 2 Procesos industriales con su correspondiente rango de temperatura y medio. Fuente: elaboración propia basada en (Sharma, et al, 2017, & Kalogirou, 2003).....	22
Tabla 3. Calor específico de materiales del proyecto.....	26
Tabla 4. Temperaturas.....	27
Tabla 5. Coeficientes de conductividad térmica.....	27
Tabla 6. Densidad y Viscosidad dinámica.....	28
Tabla 7. Viscosidad del agua y aire a 1 Atm. de presión. Fuente (Bird, et al, 1992).....	28
Tabla 8 Ecuaciones para modelado. Fuente: Elaboración propia 2020.....	51
Tabla 9 Caudal máximo fuente datos técnicos de campo, 2020.....	52
Tabla 10. Eficiencia del sistema de regaderas.....	57
Tabla 11. Eficiencia del sistema de calentamiento de alberca.....	60
Tabla 12. Mediciones promedio mes de julio Fuente elaboración propia.....	63
Tabla 13. Temperaturas en tapetes de membrana de alto flujo en operación. Fuente propia 2020.....	68
Tabla 14. Programa de visitas de campo. Fuente elaboración propia 2020.....	70
Tabla 15. Costos de equipos principales.....	76
Tabla. 16 costos de calentamiento de agua en UPAEP.....	78
Tabla 17. Análisis financiero de la propuesta. Fuente elaboración propia.....	80

Índice de figuras

Figura 1. Irradiación en México. Fuente: www.Solargis.info 2018.....	4
Figura 2. Objetivos de Desarrollo Sostenible. Fuente: Naciones Unidas 2015 agenda 2030.....	7
Figura 3. Instalaciones de los sistemas en la UPAEP. Fuente propia 2020.....	8
Figura 4. Ubicación geográfica de estudio. Fuente: www.power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/ , 2020.....	9
Figura 5. Irradiación diaria promedio anual del 2016 al 2018 Fuente: (www.power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/ , 2020).....	10
Figura 6: Relaciones entre el sol y la tierra. Fuente: (Duffie, & Beckman, 2013).....	13
Figura 7. Ecuación del tiempo. Fuente: (Duffie, & Beckman, 2013).....	15
Figura 8. Representación de la declinación. Fuente: (Hamza, 2009).....	16
Figura 9 Angulo de incidencia y declinación. Fuente: Elaboración propia en base a (Duffie, & Beckman, 2013).....	17
Figura 10. Angulo de incidencia, Fuente: Elaboración propia en base a (Duffie, & Beckman, 2013).....	17
Figura 11. Movimiento solar respecto a un punto sobre la superficie terrestre. Fuente: Elaboración propia en base a (Duffie, & Beckman, 2013).....	19
Figura 12. Valores de ω respecto a la hora del día Fuente: elaboración propia basada en (Duffie, & Beckman, 2013).....	19
Figura 13. Valores de la declinación a través del año. Fuente: modificado de (Duffie, & Beckman, 2013).....	20
Figura 14. Rangos de temperatura y procesos. Fuente: modificado de (Klein, et al, 2018).....	21
Figura 15. Componentes de un tubo de vacío y aprovechamiento energético. Fuente: (Hamza, et al, 2009).....	24
Figura 16. Variables de un sistema. Fuente: modificada de (Baniassadi, et al, 2018).....	25
Figura 17. Sección transversal de tubo de vacío. Fuente elaboración propia 2020.....	34
Figura 18. Flujo vectorial de calor. Fuente: Elaboración propia basada en Bird, et al 1992.....	42
Figura 19. Presentación de Matlab.....	45
Figura 20. Diagrama de Seno Fuente elaboración propia, 2020.....	46
Figura 21. Grafico 3D en Matlab Fuente elaboración propia.....	47
Figura 22. Logo de Comsol.....	22
Figura 23 Aplicación térmica de Comsol. Fuente elaboración propia 2020.....	49
Figura 24. Integrado de la ecuación 35 en Simulink. Fuente elaboración propia, 2020.....	50
Figura 25. Sistema de calentamiento actual.....	50
Figura 26. Eficiencia del sistema térmico en regaderas. Fuente elaboración propia, 2020.....	56
Figura 27 Eficiencia del sistema de calentamiento de alberca. Fuente elaboración propia, 2020.....	59
Figura 28. Mediciones de campo en equipos de calentamiento solar. Fuente propia 2020.....	61

Figura 29 Diagrama de equilibrio energético del sistema de calentamiento de la alberca.....	62
Figura 30. Simulación del sistema de regaderas. Fuente de elaboración propia 2020.....	63
Figura 31. Simulación del sistema de regaderas. Fuente de elaboración propia 2020.....	64
Figura 32. Balance energético en operación máxima. Fuente propia 2020.....	66
Figura 33. Grafica de simulación Matlab Simulink sistema de regaderas. Fuente elaboración propia 2020....	66
Figura 34. Diagrama de equilibrio energético del sistema de calentamiento de la alberca.....	68
Figura 35. Resultado en Simulink Matlab. Fuente elaboración propia 2020.....	69
Figura 36. Simulación en Matlab Simulink. Fuente: Elaboración propia 2020.....	70
Figura 37. Grafica de simulación Matlab Simulink sistema de alberca. Fuente elaboración propia 2020.....	70
Figura 38. Arreglo de instalación de calentador de agua AFJ-2800-D. Fuente: hoja de datos técnicos Masstercal (agosto2009).....	77
Figura 39. Arreglo de instalación de calentador de agua LC-450-C. Fuente: hoja de datos técnicos Masstercal (agosto2009).....	79
Figura 40. Comparación de cambio de estado de un fluido con paletas disipadoras y sin paletas, de diferentes espesores de acero y de grafito. Fuente Liu. M., et al (2012).....	82
Figura 41. Diagrama unifilar actual del sistema de calentamiento térmico. Fuente elaboración propia. 2020..	83
Figura 42. Tanque de almacenamiento térmico 6000 litros. Fuente elaboración propia 2020.....	84
Figura 43. Plano isométrico de sistema de calentamiento solar de Alberca. Fuente elaboración propia 2020..	84
Figura 44. Plano isométrico de sistema de calentamiento de regaderas. Fuente elaboración propia 2020.....	85
Figura 45. Isométrico del sistema de bombeo de Alberca. Fuente elaboración propia 2020.....	85
Figura 46. Plano isométrico de sistema de calentamiento de tanque térmico. Fuente elaboración propia 2020.....	86
Figura 47. Unifilar de Propuesta de calentamiento térmico de regaderas y alberca de la UPAEP. Fuente elaboración propia 2020.....	87
Figura 48. Propuesta solar térmica para alberca. Fuente elaboración propia 2020.....	88
Figura 49. Propuesta de calentamiento solar de regaderas. Fuente elaboración propia.....	89
Figura 50. Integrado de propuestas de calentamiento térmico. Fuente elaboración propia 2020.....	90

Agradecimientos.

Iniciando primeramente por agradecer a Dios creador, luego a mis Padres, seguido de las circunstancias que han hecho que llegara el momento en el cual se decidiera incorporarme a la UPAEP, ayudado de la asesoría de la Dra. Genoveva R. O. que me incentivo a seguir adelante, seguido del apoyo de mi Director de tesis el Dr. Francisco S. R. así como de CONACYT (beca CVU: 903628) que ha brindado el apoyo para siquiera plantear el hecho de realizar una Maestría validada PNPC, en una institución de tanto renombre nacional e internacional. También a mis compañeros y amigos que me han aconsejado como el Maestro Javier Gibran Cerón Ávila, compañero de estudios. De igual manera a mi primo el Dr. Guillermo López Varela que me ha inspirado y así podría seguir con más personas importantes, pero para no extenderme tanto finalizo comentando que es importante despertar el interés en la parte ambiental, ya que es un concepto que debe dejar de tomarse a la ligera, y cada vez más se ven involucrados en el deterioro de nuestro ecosistema, espero mi trabajo contribuya de alguna manera en la preservación ambiental.

“Esta investigación fue realizada gracias al apoyo del Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Puebla”.

Nomenclatura.

De inicio se necesita conocer los siguientes términos para lograr familiarizarse con el tema, ya que es importante tener en cuenta las variables que afectan un sistema solar térmico

- Radiación de haz: G es la radiación directa del sol sin tener contacto con la atmosfera.
- Radiación difusa: G_D es la radiación solar que llega después de chocar con la atmosfera.
- Radiación total: G_T es la suma de las dos anteriores, también llamada radiación global.
- Irradianza: B W/m^2 velocidad del flujo con que la energía incide sobre un área o superficie.
- Irradiación: B_d J/m^2 la energía incidida por área encontrada por la integración de la irradianza con un tiempo específico usualmente una hora “I” un día “H”
- Exitancia radiante: M W/m^3 es la velocidad en la cual una energía deja una superficie por unidad de área debido a la combinación de reflexión emisión y transmisión.
- Tiempo solar: ω tiempo basado en el movimiento aparente del sol a través del cielo con el sol a medio día no coincide con el tiempo local.
- Dirección de haz de Radiación: θ se les llama así a las direcciones geométricas entre un plano en cualquier orientación de la tierra y la dirección del haz de radiación solar.
- Longitud: L es la línea imaginaria que surge desde los polos de manera vertical y divide a la tierra inicia en el meridiano de Greenwich y va de $-180^\circ \leq 0 \leq 180^\circ$.
- Latitud: ϕ locación de Norte a sur del Ecuador con valores de $-90^\circ \leq 0 \leq 90^\circ$. En el norte toma valores positivos.
- Declinación: δ posición angular del sol al medio día con respecto al plano del ecuador al norte es positivo y va de $-23.45^\circ \leq \delta \leq 23.45^\circ$
- Pendiente: β es el Angulo entre la superficie y la horizontal de $0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$
- Angulo de incidencia θ es el Angulo del haz de radiación que existe entre la normal a la superficie.
- Desplazamiento angular: ω es el Angulo de desplazamiento que va de este a oeste y se mueve en valores de 15° por hora medido del medio día en adelante de manera positiva y del medio día para atrás en forma negativa.
- Angulo azimutal solar: γ es aquel que se proyecta sobre la superficie debido a la rotación de la tierra va de sur-este con valores negativos y de noroeste en valores positivos.

- Calor específico: C_p J/Kg K cantidad de energía necesaria para elevar 1° C un volumen en específico de un material.
- Tiempo: t unidad de medida en segundos es una magnitud física que permite saber la duración o separación de acontecimientos.
- Temperatura: T en K o $^\circ$ C es la magnitud escalar relacionada con la energía interna de un sistema termodinámico.
- Conductividad térmica de los materiales: k en W/m K, propiedad física de los materiales que mide la capacidad de conducir el calor.
- Masa: m , en kilogramos es una magnitud física y propiedad fundamental de la materia, que expresa la inercia o resistencia al cambio de movimiento de un cuerpo.
- Emisividad: ϵ , no dimensional, es la proporción de radiación térmica emitida por una superficie u objeto debido a su temperatura.
- Constante de Stefan-Boltzmann σ . $W/m^2 K^4$ donde la intensidad (física) total irradiada sobre todas las longitudes de onda se incrementa a medida que aumenta la temperatura.
- Viscosidad dinámica: μ , en $Kg/m s$ es la relación existente entre el esfuerzo cortante y el gradiente de velocidad. Conocida como viscosidad absoluta
- Viscosidad cinemática: ν , en m^2/s es la relación entre la viscosidad dinámica con la densidad del líquido.
- Entalpia: H , es una magnitud termodinámica de flujo de energía térmica en los procesos químicos efectuados a presión constante cuando el único trabajo es de presión-volumen, interpretado como la cantidad de energía que un fluido intercambia con su entorno.

CAPITULO I. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se abarca los desarrollos tecnológicos que se han dado respecto a las tecnologías solares térmicas, así como la factibilidad de su aplicación en México debido a su ubicación geográfica, así como la concordancia con los acuerdos internacionales con los objetivos de desarrollo sustentable, y por ultimo una breve descripción del sistema térmico instalado.

I.1 Antecedentes de la investigación.

La energía solar térmica se está usando de manera más frecuente debido a que ha demostrado buenos resultados para el uso doméstico e industrial, cada vez más se ha incrementado la investigación para conocer mejor estos sistemas, por lo que actualmente existen tecnologías que se han evaluado para la mejora de la eficiencia de sistemas de generación de energía a través de una fuente renovable (solar) (Ponce, 2016 & Summers, et al, 2013), por lo cual la medición de las variables principales del sistema de calentamiento se implementan para un modelado matemático computacional y análisis energéticos.

Sin embargo, fue en el siglo XX cuando se empezó a tomar más en cuenta el uso de los sistemas solares, debido al crecimiento de la industria. Se reporta en la literatura un uso de energía térmica de un 60% en un intervalo de 30- 250°C donde es posible la aplicación de sistemas de calentamiento mediante fluidos principalmente vapor, aire y agua. En promedio el uso de energía térmica en el mundo es de 35% ya se han reportado en la literatura el uso de concentradores solares, además de su uso en sistemas presurizados de vapor a 7 bar (Sharma, et al, 2017). La efectividad se ha demostrado al reducir la mitad del consumo energético normal, demostrando su viabilidad, aunado de beneficios como la disminución de emisión de gases invernadero. Adicionalmente se han realizado estudios aplicando en sistemas cerrados de calentamiento térmico nano fluidos compuestos de óxido de titanio los cuales demostraron ser más eficaces en la transferencia calorífica en un 19%, lo cual puede ser aplicado en sistemas que así lo requieran. (Mahendra, et al, 2012)

La energía solar en México ha demostrado ser muy útil y una forma de valorar esta radiación es a través de estudios realizados por software de medición actual como el que maneja Solargis Figura 1 donde se observa la gran incidencia de radiación solar en el país por lo que en comparación con otros países en el mundo es contrastante, podría afirmarse que la energía solar en México se puede

aprovechar en casi todo el territorio nacional, considerando la zona donde se realizara la investigación situada en Puebla Barrio de Santiago, no es la excepción de acuerdo con los datos de la nasa (www.power.larc.nasa.gov), donde se puede usar su software para obtener los datos promedio diarios de irradiación de acuerdo con la ubicación en coordenadas de latitud y longitud, como se observa en la Figura 3-4, se demuestra que la irradiación mínima es de 6 kwh/m² y la máxima llega hasta 8 kwh/m² por lo cual estos datos son relevantes en cualquier proyecto. (www.power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/, consultado enero 2020).



Figura 1. Irradiación en México. Fuente: www.Solargis.info 2018

I.1.1 Planteamiento del problema.

En correspondencia a los valores institucionales de UPAEP se busca el aumento del uso de energías renovables que aporten sustentabilidad. En la actualidad los gases de efecto invernadero derivado de combustibles fósiles han ido aumentando exponencialmente como el crecimiento poblacional, como resultado los cambios climáticos cada vez son más evidentes, por lo que surgen sistemas que usan más energías limpias como la solar térmica que ha demostrado un fuerte avance en la disminución de emisión de gases de efecto invernadero. Existen en la actualidad sistemas de calentamiento de alberca y regaderas que utilizan combustibles fósiles para su operación, otras usan fuentes renovables otras son la combinación de ambas como es en el caso de estudio, por lo que

analizar este sistema será de gran aportación hacia otros casos similares, donde el uso de combustibles fósiles provoca el deterioro ambiental sumado de costos de operación muy altos.

En el presente trabajo se analizará mediante modelado matemático y simulación computacional el sistema térmico de calentamiento del agua usada para la alberca y regaderas de la UPAEP en su campus central. Todo esto para establecer el consumo energético total, analizando la parte que usa combustible fósil y la que usa energía solar.

Como resultado se plantea disminuir el uso de combustibles fósiles (gas natural), esperando un beneficio ambiental y sustentable.

I.1.2.1 Objetivo general:

Mejorar la eficiencia energética del sistema de calentamiento de agua de la alberca y regaderas del Campus central de la UPAEP, a través del modelado matemático y simulación computacional de las mediciones térmicas y variables del proceso.

I.1.2.2 Objetivos específicos:

- 1.- Evaluar la capacidad térmica general del sistema así como su operación, a través de mediciones de flujo, temperatura (cámara térmica) y presión, para conocer la eficiencia del sistema.
- 2.- Identificar cualitativamente las especificaciones de materiales usados para el sistema de calentamiento, a través de revisión en situ, para definir modelado matemático
- 3.- Modelar matemáticamente y simular computacionalmente el sistema de estudio para determinar las ganancias y pérdidas de energía, a través de simuladores como Comsol, y Matlab, usando datos reales del sistema de estudio.
- 4.- Proponer un diseño de mejora de la eficiencia energética a través del estudio del sistema utilizando las variables del sistema.

I.1.3.1 Justificación.

La Administración de Operaciones y de Apoyos Académicos de la UPAEP, planteó el estudio del sistema de calentamiento de la alberca y regaderas del campus central debido al uso de un sistema

auxiliar de calentamiento (caldera) provocando costos altos de mantenimiento así como la emisión de gases de efecto invernadero.

En concordancia con los valores institucionales de UPAEP el uso de energía renovable para el calentamiento de agua en las instalaciones debe aumentar por lo que ha dado lugar a la búsqueda de sistemas que aprovechen fuentes de energía limpias como el sol, el cual es uno de los más abundantes (Hidalgo, et al, 2019a). Adicional a que la ubicación geográfica de Puebla es propicia para el aprovechamiento del mismo.

Este proyecto pretende propiciar el desarrollo del análisis de sistemas de calentamiento térmico, que se están usando con mayor frecuencia, sin embargo debido a la falta de especialización en el tema, el crecimiento en el aprovechamiento de la energía solar térmica no se ha visto reflejado en la industria en México como en otros países. (Recalde, et al, 2015).

En la actualidad se debe considerar el desarrollo de un país considerando la parte Social Ambiental y Económica en equilibrio perpetuo donde deben coexistir por tanto es importante mencionar que dentro de los 17 objetivos de desarrollo sostenible (ODS) enmarcados por las naciones unidas firmado en el 2015 en la agenda 2030, en la cual se tomó la decisión que en concordancia con el medio ambiente, reafirmaron el compromiso con dejar un mejor lugar para vivir a las generaciones futuras, con lo que este trabajo aplica principalmente a el objetivo 7 que habla de la energía accesible y no contaminante, el objetivo 9 industria innovación e infraestructura, que implica el crecimiento basado en la innovación considerando aspectos ambientales y sociales, el objetivo 11 Lograr que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles, por último el objetivo 13 Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos, se pueden ver los demás compromisos en la Figura. 2, por tanto este trabajo está dentro del contexto actual donde se requieren expertos en diferentes áreas para lograr cumplir con estas metas. (Conte, 2018)



Figura 2. Objetivos de Desarrollo Sostenible. Fuente: Naciones Unidas 2015 agenda 2030.

I.1.3.2 Hipótesis

La modelación matemática y simulación computacional permitirá analizar el sistema térmico instalado en la UPAEP y proponer modificaciones para lograr una mayor eficiencia.

1.1.4 Características del lugar donde se realizó el estudio.

La Universidad Popular Autónoma de Puebla (UPAEP) se ubica en el barrio de Santiago, donde se ubica el principal punto de interés en el campus central, en las instalaciones del sistema de calentamiento de regaderas y alberca a un lado de la zona deportiva Figura 3, donde particularmente este trabajo se enfocara en el estudio de la eficiencia energética proporcionada por equipos solares instalados. Los cuales tienen como objeto principal el entrenar a alumnos cumpliendo con los estándares necesarios para el buen desarrollo académico y profesional ofreciendo la capacidad tanto de los maestros como de las instalaciones y es debido a esto que ofrecen servicios de calidad con el objetivo de formar personas disciplinadas y competitivas, que puedan competir de manera local e internacional.



Figura 3. Instalaciones de los sistemas en la UPAEP. Fuente propia 2020.

Actualmente en el proceso de calentamiento de agua en la alberca, la cual mide 50 metros de largo por 25 metros de ancho con una capacidad de 3850 m^3 , usa mangueras de membrana de alto flujo combinado con el servicio auxiliar de la caldera, los flujos del agua convergen en la alberca de forma independiente sin la existencia de mezclado previo. La cual debe alcanzar la temperatura de 25°C . Este sistema se instaló por la empresa Alfa 3 que entregó estas a UPAEP en el año 2006, este sistema está conformado por 170 piezas interconectadas a una tubería principal de 4" diámetro y con salida de 3", el sistema es accionado por una fotocelda que hace funcionar el sistema al detectar la luz solar. (En anexos se puede observar en la Figura 39 del isométrico actual del sistema).

Por otra parte en las regaderas que son 44 en total, usan tubos de borosilicato, combinado con el servicio auxiliar de caldera (reserva y principal), los dos sistemas convergen en un tanque de almacenamiento de 6000 litros, de forma independiente sin la existencia de mezclado previo. El tanque debe alcanzar la temperatura de 60°C en temporada de calor y de 75°C en temporada invernal, este sistema fue instalado en el año 2016, se estima un promedio de 600 usuarios diarios. (En la Figura 40 de anexos se puede observar el plano referente a este sistema).

Una de las características del sistema es que se diseñó para un tiempo de vida de 20 años considerando buena calidad del agua y mantenimientos adecuados sin embargo al ser equipos de recién introducción al mercado en su momento no se tuvo la información ni la especialidad en el manejo, mantenimiento e instalación. Aunado a esto las condiciones climáticas y de operación han provocado el desgaste de sistema instalado (principalmente en el sistema de calentamiento de alberca que es más antiguo) las condiciones observadas derivadas de la inspección visual previa es la siguiente: presenta deterioros en conexiones y algunas tuberías no se encuentran en condiciones adecuadas, otra situación es que existen partes que no se encuentran aisladas, lo que propicia pérdidas de temperatura, adicional la alberca se encuentra al intemperie por lo que el diferencial de temperaturas aire-agua en la superficie también provoca pérdidas de energía. Aunado a esto la cantidad de agua que se requiere calentar en la alberca es de 3850 m³ y en las regaderas con una población promedio de 600 personas con un consumo de 30 litros que es muy ideal, se demandan 18000 litros. Diarios. Derivado de esto el sistema será estudiado. En cuanto a la ubicación en las Figuras 4-5 se puede ver la ubicación y características promedio de irradiación. (www.power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/, 2020).

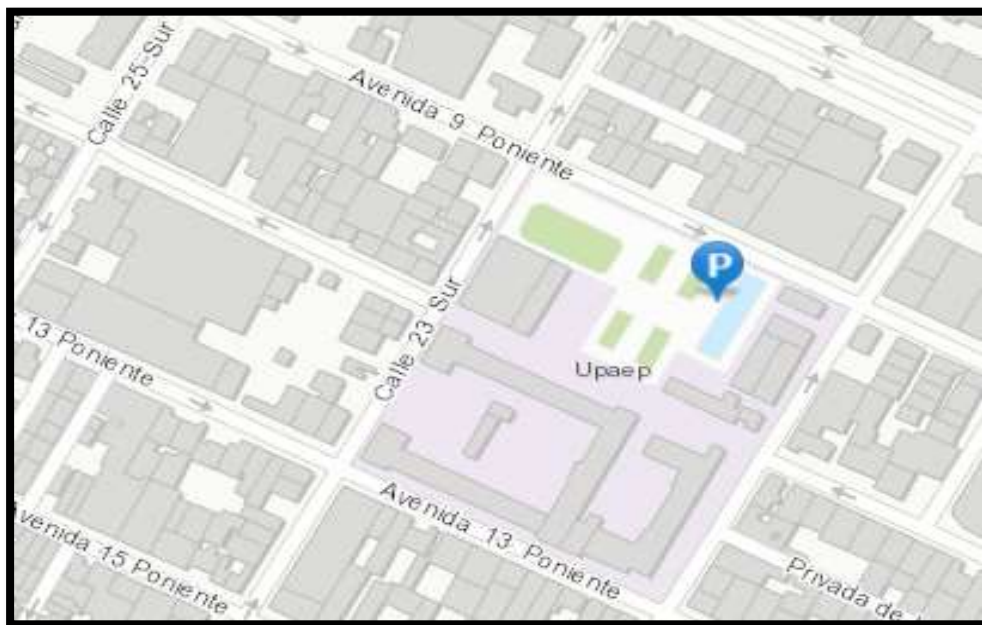


Figura 4. Ubicación geográfica de estudio. Fuente: www.power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/, 2020

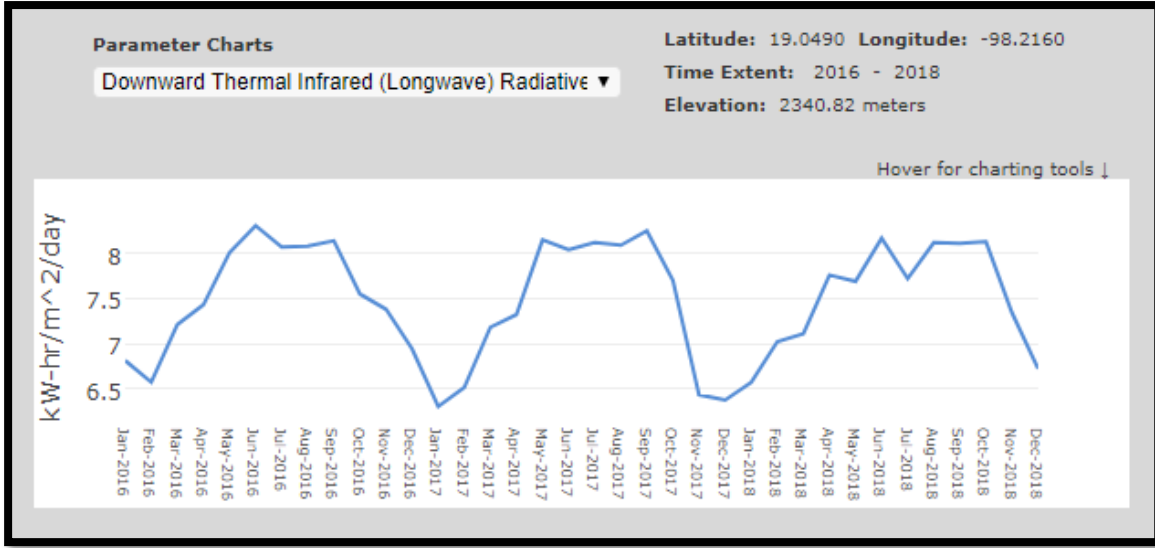


Figura 5. Irradiación diaria promedio anual del 2016 al 2018 Fuente: (www.power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/, 2020)

En resumen es muy factible el usar energías térmicas solares en la zona de estudio, lo que permitirá un amplio margen de aprovechamiento de este recurso, que puede disminuir la huella de carbono aunado a la muy probable disminución de costos.

CAPITULO II MARCO TEÓRICO

Este capítulo abarca las bases principales del comportamiento solar, y su interacción con el planeta tierra, que es parte de las bases para poder modelar y estudiar el comportamiento solar en la ubicación aplicada, así como también se menciona los procesos industriales que actualmente existen en México, donde se pueden aplicar sistemas térmicos solares. Adicional se mencionan las variables principales que afectan a este tipo de sistemas, así como el estudio de transferencia térmica para la conceptualización del modelado matemático del sistema.

II.1 Energía solar

El sol con un diámetro de 1.39×10^9 m y aproximadamente 1.5×10^{11} m de distancia de la tierra rota sobre su propio eje cada 4 semanas, es un reactor de fusión continua, el cual emite energía al planeta tierra en forma de luz y calor conformando una de las principales fuentes de energía. Además de ser promotor de la vida sin la cual sería imposible la existencia de los seres vivos, sin embargo, debido al equilibrio natural, la luz solar no llega de forma directa a la tierra ya que si así fuera los rayos ultravioleta mayormente absorbidos por la capa de ozono acabarían con la vida. (Gómez, 2018). Debido a eso, es importante propiciar que el equilibrio ecológico se mantenga de cara a las actividades antropogénicas y el uso indiscriminado de combustibles fósiles que han traído consecuencias que atentan contra la vida misma. Actualmente, se ha optado por fuentes alternativas de energía que propician la disminución de gases de efecto invernadero, la energía, solar, eólica, mareomotriz, undimotriz, geotérmica, entre otras. La energía solar ha destacado entre todas ya que de acuerdo a la literatura en Centroamérica y Sudamérica en promedio anual por metro cuadrado se recibe energía solar de 5 kw/h, equivalente a la energía química acumulada en 1 litro de petróleo. (Hidalgo, 2019a). El estudio del manejo eficiente de procesos aplicados donde se usan energías derivadas del sol, aportará de manera importante al desarrollo y utilización de esta fuente de energía.

La luz solar se puede aprovechar de manera directa o indirecta, debido a que viaja a una frecuencia electromagnética que al llegar a la tierra, parte de la energía es absorbida y/o reflejada, gran parte se divide en luz ultravioleta, luz infrarroja, rayos gama entre otras, cada una viaja a diferentes frecuencias y desde tiempos antiguos se ha buscado su aprovechamiento como en la iluminación natural y en zonas donde se necesita mayor temperatura.

La energía solar se aprovecha de tres maneras principales:

- a) Sistemas Pasivos: colecta y almacena la energía solar sin usar otra fuente de energética y usando pocos o ninguna parte móvil.
- b) Sistemas activos: son aquellos que colectan y almacena la energía del sol usando otra fuente de energética como la electricidad.
- c) Los Sistemas fotovoltaicos (*PS por sus siglas en inglés*).

Algunos ejemplos de sistemas pasivos son los usados en hogares para calentar el agua, conocidos como calentadores solares domésticos de baja y alta presión los cuales usan tuberías de vidrio de borosilicato. Se menciona que cada metro cuadrado de estos equipos equivale a 135 kg de gas LP anuales, lo que equivale a evitar emitir a la atmosfera 1.19 millones de toneladas de CO₂. (Kumar, 2017). Donde destacan los calentadores solares que usan tubos de vacío de borosilicato que de acuerdo con varias investigaciones son más eficientes, demostrando gran factibilidad, en la aplicación práctica. (Hamza, et al, 2009 & Sharma, et al, 2018).

Adicional existen sistemas pasivos y activos que aprovechan la energía solar mediante configuraciones diversas, que permiten el aprovechamiento de la energía calorífica del sol, son muy útiles en lugares donde no se tiene buen acceso a la red de energía eléctrico, de acuerdo con la literatura se han demostrado buenos resultados. (Ekechukwu, & Norton, 1999. & VijayaVenkataRaman, et al, 2012).

El sistema de calentamiento térmico instalado en UPAEP es activo debido al uso de equipo de bombeo para trasportar el agua caliente a través del sistema, propiciando la transferencia de calor. Durante el calentamiento del líquido (H₂O), debido al contacto de la superficie de calentamiento con la radiación del sol se obtendrá una temperatura la cual será una variable respecto al tiempo, por lo cual se debe considerar que la diferencia de temperaturas en la superficie de contacto será la característica principal del sistema, el cual estará en un constante esfuerzo por alcanzar el equilibrio térmico.

El comportamiento solar respecto a la Tierra tiene como primer dato técnico que el Sol tiene un diámetro de 1.39×10^9 m. Y se encuentra a una distancia aproximada de 1.5×10^{11} m de la tierra, con una variación de +/- 1.7% debido a la excentricidad de la rotación de la Tierra respecto al sol. En la Figura 6 se muestra de manera gráfica las relaciones que existen entre la Tierra y el Sol, el cual emite

una energía $1366 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ($19.2 \text{ kcal}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$) que al llegar a la atmosfera disminuye en un 75% lo que significa que a la superficie solo llegan $342 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ($4.8 \text{ kcal}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$) y si esta disminución no existiera la superficie de la tierra se evaporaría y la vida sería imposible. Siguiendo con las características del sol este rota sobre su eje cada 4 semanas y es un reactor de fusión continua que emite luz calor y radiación hacia la tierra. (Duffie, & Beckman, 2013).

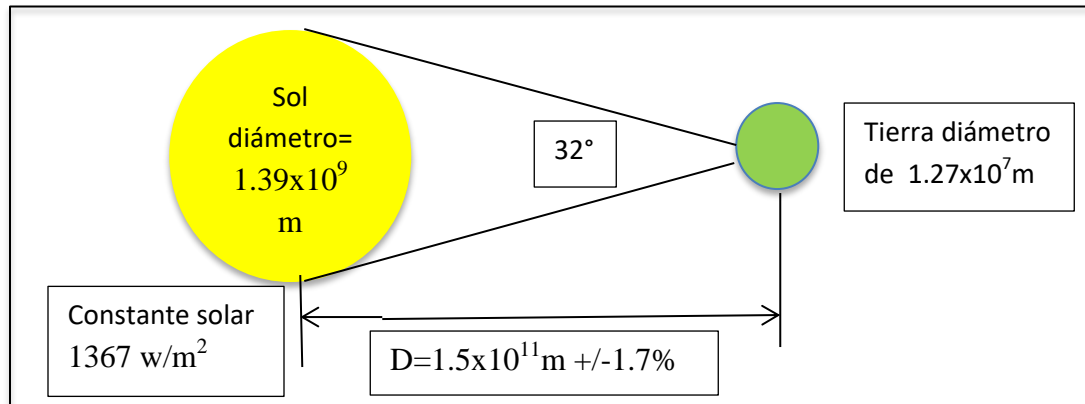


Figura 6: Relaciones entre el sol y la tierra. Fuente: (Duffie, & Beckman, 2013).

El fenómeno de radiación se ha estudiado en base al comportamiento ya sea por fotones u ondas electromagnéticas, donde la transferencia de calor en forma de radiación se da a través de la excitación de los electrones debido a la temperatura lo que provoca una emisión de ondas de naturaleza espectral que abarca la parte ultravioleta, del visible y todo el infrarrojo del espectro electromagnético($0,1$ a $100\mu\text{m}$), la radiación se comporta como un fenómeno volumétrico, que depende de un cuerpo que permita a través del contacto físico la transferencia de energía, donde la radiación que emerge de un volumen finito debido a que ha sido expuesta a esta energía, sabiendo que existen emisores y receptores como el ideal cuerpo negro que es capaz de emitir y recibir energía térmica no importando la dirección por lo que también es llamado cuerpo difuso, como comentario el color no está relacionado con el cuerpo negro ya que existen materiales que no importando el color su comportamiento es idéntico al de un cuerpo negro. (Castañeda, et al, 2012:101-102).

La **Emisividad** ϵ se entiende con la comparación de cuanto emite un cuerpo en comparación a un cuerpo negro, por lo que dependen de la longitud de onda, dirección y temperatura, la **Absortividad** A_λ es similar a la anterior y determina la cantidad de radiación absorbida por un cuerpo. Otra parte de estudio es la **reflectividad** ρ que es la parte de la radiación que es reflejada, y la **transmisividad** T que es la parte de la radiación que es transmitida al medio estas dos últimas son consideradas como

parte de las pérdidas de energía. Se dice que la suma de la absorptividad, reflectividad y transmisividad será la unidad. Una manera de estudiar el fenómeno radiativo es a través de la toma de temperaturas del elemento emisor receptor y la superficie de interacción donde se presenta el fenómeno así como la interacción con el medio ambiente que lo rodea, considerando que los factores climáticos se hacen llegar a un estado promedio que se puede manejar en el tiempo basado en las 4 estaciones del año que son representativas para el comportamiento de un sistema solar. (Castañeda, et al, 2012).

La radiación solar global en cielo abierto se basa en la interacción de la radiación directa espectral que incide sobre una superficie y la difusa espectral que es afectada por la mezcla de gases, vapor de agua, ozono, además de que son afectadas por le hora del día, lo que implica utilizar modelos matemáticos que describan el comportamiento climático del lugar de estudio, por lo que el cálculo más preciso de la radiación solar depende de la determinación de la radiación solar difusa. (Girado-Polo, C & Gónima-Gónima 2018:105).

En el contexto de incidencia solar en la ciudad de Puebla más concretamente en el Barrio de Santiago y por último en la ubicación de la alberca que se encuentra en la latitud de -19.048951 y longitud de -98.215962. Algunas consideraciones son determinar el tiempo solar el cual difiere del tiempo estándar de acuerdo a la siguiente Ecuación de (Duffie, & Beckman, 2013) se tiene que:

$$tiempo\ solar = Tsolar = tiempo\ estandar + (4)(100 + long) + E \quad (1)$$

Donde “E” es la Ecuación del tiempo que está definida con la siguiente Ecuación:

$$E = 229.2(0.000075) + 0.001868\cos B - 0.032077\sen B - 0.014615\cos 2B - 0.04089\sen 2B \quad (2)$$

Donde “B” se determina a través del día, del año en el cual se quiere determinar el tiempo solar mediante la siguiente relación:

$$B = (n - 1) \frac{360}{365} \quad (3)$$

Donde “n” es el día del año para entender esto se ejemplifica de la manera siguiente, para las 3:40 pm el día 12 de mayo del 2020 se determina el día solar como sigue, el primer mes son 31 días, luego 28

días de febrero, marzo 31 días, abril 30 días y 12 días de mayo lo cual da como resultado $n=132$, por lo que $B=129.205479$, sustituyendo en la Ecuación. 2 se obtiene $E=3.90343524$, por lo que si se sustituye en la Ecuación 1 se obtiene que el tiempo solar es: 3:41 pm este desfase fue calculado basado en la Ecuación del tiempo que se grafica como se muestra en la Figura 7. (Duffie, & Beckman, 2013).



Figura 7. Ecuación del tiempo. Fuente: (Duffie, & Beckman, 2013).

La dirección del haz de radiación que intercepta cualquier plano en la superficie de la tierra está relacionada con algunas variables principales como son la declinación, la hora angular y el ángulo de incidencia respecto al plano para esto se requiere determinar la declinación mediante la siguiente fórmula. (Cooper, 1969)

$$\delta = 23.45 \operatorname{sen}\left(360 \frac{284+n}{365}\right) \quad (\text{grados}) \quad (4)$$

Se puede estimar con esto la inclinación que hay a través del año como se observa en la gráfica de declinación donde se ve que valores se presentan por día del año, de manera más grafica se puede observar en la Figura 8 donde muestra la medición del Angulo de declinación, que es la variación en la inclinación de la tierra con respecto al sol a través del año generando las variaciones en las estaciones, que de esta forma intervienen en la eficacia del sistema solar. Donde debido a la ubicación privilegiada de México destaca por la poca variación en los cambios de estación debido a su cercanía con el ecuador.

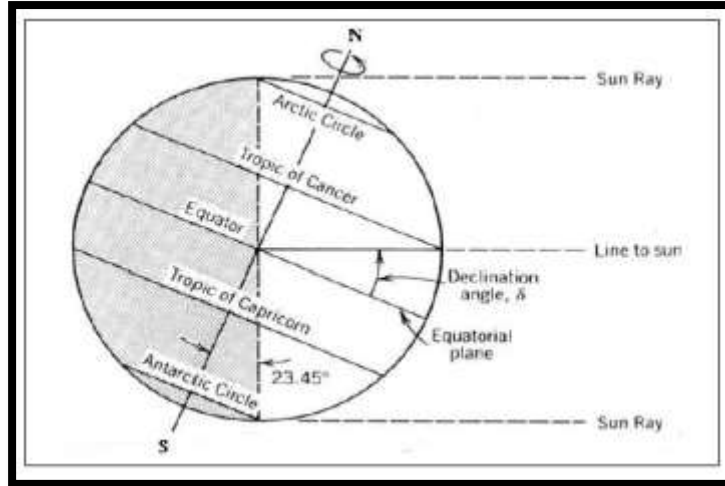


Figura 8. Representación de la declinación. Fuente: (Hamza, 2009)

Por lo tanto para determinar el Angulo de inclinación se tiene que usar esta relación:

$$\cos\theta = \cos\phi\cos\delta\cos\omega + \text{sen}\phi\text{sen}\delta \quad (5)$$

De igual manera para determinar el Angulo azimut se usara la siguiente relación:

$$\gamma = \text{sen}\omega \left| \cos^{-1} \left(\frac{\cos\theta\text{sen}\phi - \text{sen}\delta}{\text{sen}\theta\cos\phi} \right) \right| \quad (6)$$

Situándose en un punto cualquiera de la tierra se puede determinar estos dos ángulos con respecto a la normal al plano, Figura 9 de donde el sol se mueve de oeste a este, a cierto Angulo θ dependiendo del día del año del punto de medición se obtiene la gráfica de inclinación del sol respecto a la normal de la superficie como se observa en la Figura 9 donde se observa los principales ángulos que determinan el movimiento solar, que en el caso particular de la zona de estudio se graficó, Figura 10 donde se observa que el promedio es de 20° además que los meses de mayo y junio básicamente el sol está casi paralelo a la normal.

Por tanto el ángulo en promedio correcto de instalación para esta zona debe ser el de 20° con caída hacia el sur, esto contrasta con el diseño de los equipos actuales ya que se encuentran a 25° adicional que los tapetes de membrana de alto flujo no están instalados hacia el sur, y con ángulos diferentes como muestra en los planos Figura 43-44 isométrico generado en los anexos de esta investigación.

De esta manera es posible visualizar la trayectoria del sol y como incide en la superficie a la tierra, como se puede observar en la Figura 9 donde el zenit es la línea perpendicular a el plano, además de visualizar como incide el sol definiendo los ángulos de incidencia solar y declinación, por tanto en la Figura 11 se observa esta variación durante el año.

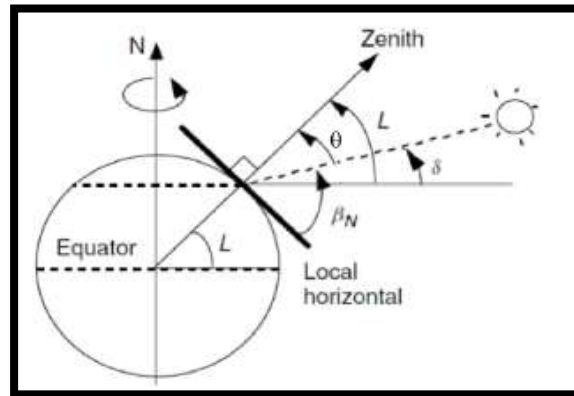


Figura 9 Ángulo de incidencia y declinación. Fuente: Elaboración propia en base a (Duffie, & Beckman, 2013).

De acuerdo con los estudios realizados previamente se ha demostrado que el ángulo de inclinación de los tubos de vacío demuestra mucha afinidad al ángulo de incidencia de la ubicación de estudio provocando un mejor desempeño, por tanto en base en la Figura 11 se encontró el promedio para el punto de estudio el cual corresponde al ángulo de 20° respecto a la horizontal orientando de sur a norte, el cual será el más adecuado y ayudara a aumentar el aprovechamiento de la radiación solar. (Recalde, et al, 2015).



Figura 10. Ángulo de incidencia, Fuente: Elaboración propia en base a (Duffie, & Beckman, 2013).

Regresando a la ubicación de estudio en coordenadas latitud $\phi = 19^\circ$ se procede a determinar el ángulo de inclinación respecto a las 10:30 am del día 15 de septiembre para esto se usara la Tabla 1 de valores de “n” que además resume algunos valores de declinación para facilitar el cálculo. (Duffie, & Beckman, 2013).

Tabla 1. Valores recomendables de n aproximados por fecha. Fuente: (Duffie, & Beckman, 2013).

Mes	Valor de n	Fecha	N	δ
Enero	i	17	17	-20.9
Febrero	31 + i	16	47	-13
Marzo	59 + i	16	75	-2.4
Abril	90 + i	15	105	9.4
Mayo	120 + i	15	135	18.8
Junio	151 + i	11	162	23.1
Julio	181 + i	17	198	21.2
Agosto	212 + i	16	228	13.5
Septiembre	243 + i	15	258	2.2
Octubre	273 + i	15	288	-9.6
Noviembre	304 + i	14	318	-18.9
Diciembre	334 + i	10	344	-23

Se tiene que de acuerdo a la Tabla 1 el 15 de septiembre tiene un valor de $n = 258$, y para determinar ω se va a usar de referencia la Figura 12 donde se observa que el valor resultante es de $\omega = -37.5^\circ$, aplicando la ecuación 5 se obtiene $\theta = 40^\circ$ y usando la ec. 6 se obtiene el valor de $\gamma = -42^\circ$, con esto se tienen las bases para determinar la trayectoria solar aparente en el punto de estudio. Para entender mejor esta parte se observa en la Figura 11 de manera tridimensional considerando el punto de estudio en el centro y las coordenadas así como norte, sur, este y oeste. Considerando el movimiento aparente del sol de izquierda a derecha así se determinan los ángulos que más pueden aportar para el mejoramiento de la eficiencia del sistema.

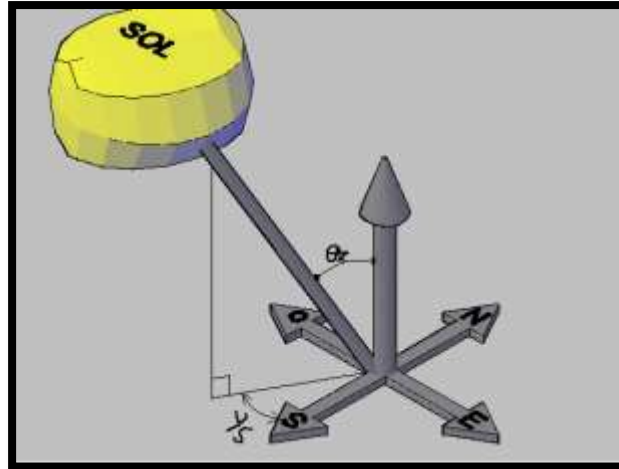


Figura 11. Movimiento solar respecto a un punto sobre la superficie terrestre. Fuente: Elaboración propia en base a (Duffie, & Beckman, 2013).

El Angulo solar “ ω “se determina a través de la siguiente ecuación:

$$\omega = 15(T_{solar} - 12) \text{ (Grados)} \quad (7)$$

El tiempo solar está definido por la Ecuación 1 propone que el tiempo estándar tiene una variación respecto a la localización del lugar de estudio, en la actualidad se manejan horarios respecto a cada ciudad, sin embargo la hora exacta se determina a través del sol a medio día, es decir perpendicular al plano sobre la superficie terrestre, por tanto esta ligera variación se debe considerar para estudios más cercanos a el comportamiento del sol respecto al punto de estudio. Si se considera que el sol viaja de este a oeste, cada hora será representada por una variación de 15° en el ángulo de incidencia como se observa en la Figura 12 viendo el sol de sur a norte de manera gráfica se encontrara el Angulo solar que varía 15° por hora solar. Por mencionar esta también que esta variación se traduce en minutos, lo que representa un muy ligero cambio si se promedian los valores.

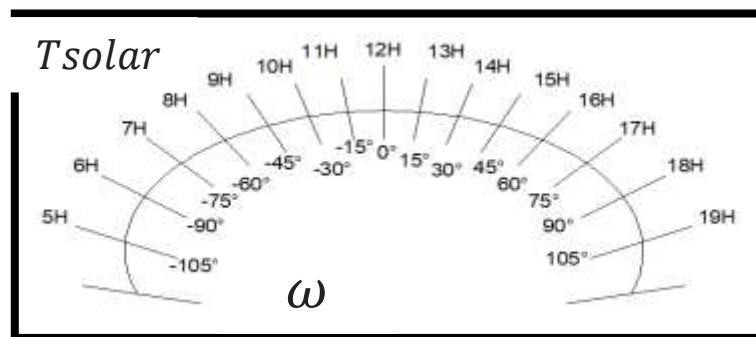


Figura 12. Valores de ω respecto a la hora del día Fuente: elaboración propia basada en (Duffie, & Beckman, 2013).

En la parte de horas efectivas de sol se refiere al tiempo que el sol sale y se oculta para la ubicación de estudio determinada a través de la ecuación 8 siguiente:

$$N = \frac{2}{15} \cos^{-1}(-\tan\phi \tan\delta) \quad (8)$$

Esta Ecuación se apoya en el valor de la declinación que como se observa en la Figura 13 que arroja la gráfica que se observa dando los valores de declinación a través del año y sustituyendo estos valores en la Ecuación 8 arroja el valor máximo y mínimo de exposición del sol en la latitud de 19° siendo el valor mínimo el de 10.87 horas y máximo de 13.14 horas.



Figura 13. Valores de la declinación a través del año. Fuente: modificado de (Duffie, & Beckman, 2013).

II.2 Energía solar térmica aplicaciones de baja media y alta temperatura

En la literatura existen diferentes aplicaciones para el uso de la energía solar, se reporta que la mayor parte de la energía empleada para los procesos industriales térmicos un alrededor del 60% se encuentran en el rango de 30-250°C por lo cual en la industria se pueden encontrar aplicaciones de baja, media y alta temperatura como se muestra en la Figura 14 para temperaturas arriba de 400°C aun no existen muchas aplicaciones y equipos que ayuden a lograr esas temperaturas, sin embargo se puede realizar una mezcla hibrida que ayude a levantar la temperatura lo cual es bastante bueno para el ahorro energético. (Sharma, et al, 2017, Klein, et al, 2018, Kalogirou, 2003, & Summers, & Lienhard, 2013).

Otra manera de comprender la importancia de adoptar tecnologías solares en México se puede apreciar en la cantidad de procesos de calentamiento térmico que se usan en la actualidad mostrados en la Figura 14 donde se observan los procesos y el medio de calentamiento así como su temperatura de operación, lo cual ayuda a tener una idea más cercana del equipo de calentamiento que se puede usar, sin embargo debido a las características de operación de cada proceso, se requiere realizar un análisis técnico y de factibilidad e innovación que se adapte a cada situación. Dentro de la literatura se menciona la existencia de plantas generadoras de energía de ciclo combinado que han demostrado tener un ahorro económico y ambiental, algunas de las cuales están ubicadas en Argelia, Marruecos e Irán, en estos estudios se usó el software de Matlab de Simulink como herramienta para encontrar el aporte energético del generador de vapor solar, adicional la disminución de consumo de energía del horno convencional de fuentes fósiles. (Ponce, & Valderrama, 2016).



Figura. 14. Rangos de temperatura y procesos. Fuente: modificado de (Klein, et al, 2018)

La Tabla 2 muestra tanto las temperaturas como el medio de calentamiento utilizado en cada proceso, muchos de los cuales son usados en México con frecuencia, lo que refuerza que las temperaturas en su mayoría están entre los 30 y 250 °C esto aporta una gran base para plantear el uso y aplicación de la energía solar en los procesos industriales.

Tabla. 2 Procesos industriales con su correspondiente rango de temperatura y medio. Fuente: elaboración propia basada en (Sharma, et al, 2017, & Kalogirou, 2003).

Industria	Proceso	Temperatura °C	Medio
Procesamiento de alimentos procesamiento de lácteos producción de bebidas	Cocción	70-120	vapor, agua
	Pasterización	60-150	vapor
	Esterilización	100-140	Vapor
	Templado	40-80	Vapor
	Secado deshidratado	40-100	Aire
	Lavado, limpieza	40-80	vapor, aire
	Tratamiento térmico	60-80	Agua
Conservas	Esterilización	110-120	Vapor
	Pasterización	60-80	Vapor
	Cocción	60-90	vapor, agua
	Blanqueado	60-90	
Textil	Blanqueado y teñido	60-90	agua
	Secado, desengrasado	100-130	Vapor
	Prensado	120-140	Vapor
	Fijación	160-180	Vapor
	Estampado	40-130	agua, vapor
Pulpa y papel	Blanqueado	120-150	Agua
	Desvinculado	60-90	Vapor
	Secado	90-200	aire, vapor
	Preparación de pulpa	120-170	agua presurizada
	Agua caliente para alimentación de calderas	60-90	Agua
Química y farmacéutica	Destilación	100-200	Agua
	Evaporación	110-170	Vapor

	Secado	120-170	aire, vapor
	Espesamiento	130-140	Vapor
Automotriz			
	Pretratamiento de pintura	40-50	Agua
	Horneado de pintura	175-225	Vapor
	Secado de pintura	150-175	Aire
Productos de cuero caucho, plástico fabricación de vidrio			
	Prebronceado	40-60	Agua
	Curtido al cromo	60-80	Agua
	Secado y acabado	70-100	Aire
	Secado (caucho)	50-130	Aire
	Precalentado	50-70	Agua
	Preparación	120-140	Vapor
	Destilación	140-150	Vapor
	Secado (plástico)	180-200	Aire
	Laminado	100-180	Aire
	Secado de fibra de vidrio	150-175	Aire
Fábrica de acero y otras de fundición			
	Tratamiento térmico, recocido, templado, Forjado, rolado.	700-1500	Aire
fabricado de cemento	calcinado de cal	600-1200	Aire

II.3 Sistemas de calentamiento solar

Dentro de la literatura el calentador solar más convencional es el plano (superficie plana) usado para temperaturas por debajo de los 100°C sin embargo se ha detectado que el calentador que usa tubos de vacío de cristal de borosilicato son muy efectivos y presentan una mínima pérdida energética. Debido a su buen funcionamiento se ocupa de forma residencial en comercios, industria, hospitales, edificios, con aplicaciones para calentamiento de agua, generación eléctrica, secado de humedad, cocinar entre otros. Los principales componentes de un tubo de vacío, son el tubo de vidrio de borosilicato que es muy resistente a impactos, la capa absorbente que es la parte activa que se encarga de absorber la radiación y transformarla en calor transmitiendo esta energía al agua,

compuesta de una capa de nitruro de aluminio de larga duración que tiene una efectividad del 92 %. La última parte es el vacío que se encuentra entre el vidrio transparente y la capa absorbente, esta permite un aislamiento óptimo que evita pérdidas por conducción y convección, como se observa en la Figura 15, el 80% de la luz solar es aprovechado. (Hamza, et al, 2009 & Sharma, et al, 2018).

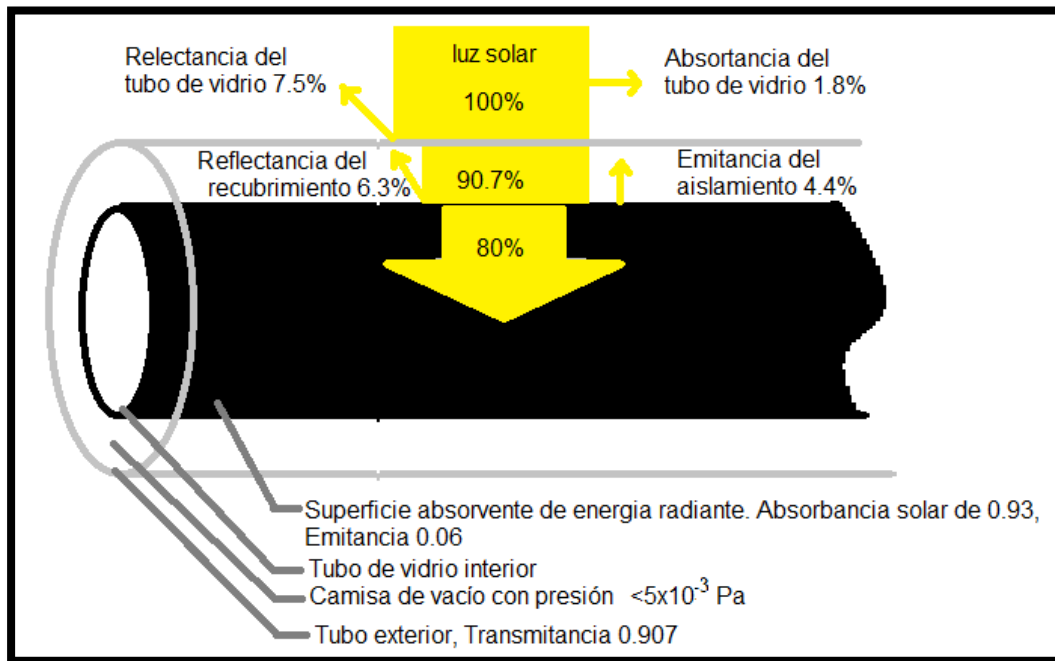


Figura 15. Componentes de un tubo de vacío y aprovechamiento energético. Fuente: (Hamza, et al, 2009)

En la actualidad existen equipos solares térmicos que han llegado hasta las temperaturas de 400 °C y en otras hasta 550°C con ayuda de materiales especiales como lo es la sal fundida. (Liu, et al, 2012). Pero como todo, cada necesidad es diferente por lo que no existe solución única para cada proceso, se debe evaluar los requerimientos del cliente, por así llamarlo, al mencionar que el equipo debe diseñarse de acuerdo a las necesidades del proyecto, para esto es que se requiere tener bases sólidas de modelación matemática y simulación computacional, como base para poder realizar una buena planeación y estructuración del proyecto, de igual manera se debe ajustar a la capacidad económica del cliente, ya que esto determinará si es viable o no, en el caso de la Universidad se requiere hacer un análisis económico actual, que demostrara la viabilidad de una modificación, que a pesar de no tener los equipos en perfectas condiciones se demuestra que el ahorro monetario debido al uso de equipos de calentamiento es viable y las emisiones derivadas de combustibles fósiles son menores a que si solo se usaran mecanismos de calentamiento como las calderas.

Un factor principal son los sistemas de almacenamiento energético los cuales de acuerdo a estudios representan un mayor porcentaje de pérdidas de energía por lo que se plantean estudios que permitan un mejor aislamiento de los equipos, además se menciona que los tanques verticales son más eficientes, además que todo equipo de almacenamiento se ve influenciado por factores como la estación del año, la velocidad de viento, hora del día derivado de la temperatura externa, estos factores son importantes para determinar el desempeño de los sistemas solares y por tanto su eficiencia. (Hamza, et al, 2009).

II.4 variables de proceso en el sistema térmico de estudio

Para entender mejor el concepto las variables se interpretan de dos maneras, las dependientes y las independientes, para el caso de estudio de acuerdo con la literatura se tienen las variables siguientes: las condiciones climáticas, capacidad de la alberca en litros, la cantidad de regaderas, consumo de agua, entre otras son independientes al proceso debido a que son características que no pueden ser controladas, por otro lado las dependientes serán la cantidad de energía requerida y flujo lo que influye en la cantidad de equipos necesarios para lograr elevar la temperatura del agua. Como se observa en la Figura 16 las variables con las que se iniciara el análisis dependerán de un lado de suministro y otro de demanda, que de cierta forma en la parte de demanda se establece la cantidad de energía que se necesitara para el sistema, y la respuesta como variable dependiente la pone el suministro, el cual debe acercarse a lo mínimo necesario para lograr alcanzar los valores establecidos en la demanda. (Baniassadi, et al, 2018).

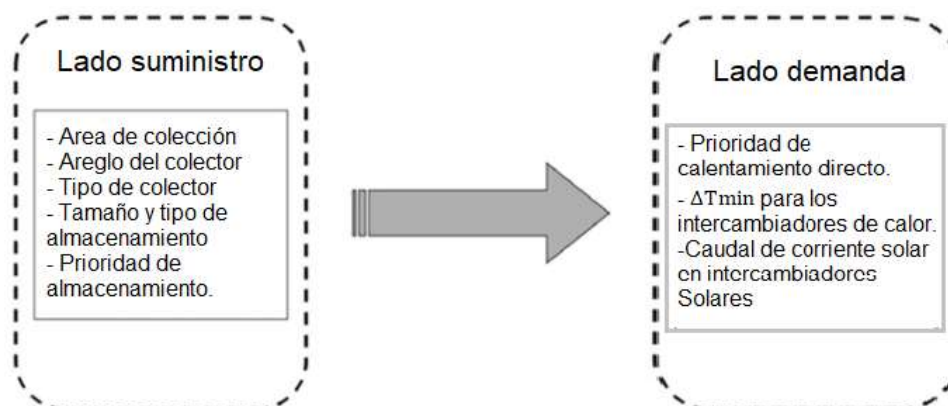


Figura 16. Variables de un sistema. Fuente: modificada de (Baniassadi, et al, 2018).

En el proyecto se usa el H₂O (agua) como principal fluido, el cual al ser newtoniano, se va a comportar de acuerdo a las leyes de Newton, para lo cual ya existen constantes como la capacidad calorífica, coeficiente de transmisión térmica, las temperaturas finales deseadas, y propiedades de flujo como el número de Reynolds, transferencia de calor, términos que se detallan a continuación.

Capacidad calorífica Cp de los materiales

La cantidad de energía que se necesita para elevar 1° centígrado un volumen en específico de un material es la capacidad calorífica en sistema internacional, y en sistema inglés es la cantidad de energía en julios para elevar un grado kelvin, por lo que dentro del sistema de estudio se maneja el agua H₂O y sabiendo que un gramo de agua tiene una capacidad calorífica de 4.18 J/g K. esta capacidad se ve afectada por los enlaces de hidrogeno que se contraponen a el movimiento cinético como se puede observar en la Tabla 3 donde se tiene los valores de los calores específicos de algunos materiales comunes. (Bird, et al, 1992:21). Cabe mencionar que Cp es el calor especifico a presión constante, ya que existe el calor especifico a volumen constante Cv el cual tiende a ser un poco más pequeño, pero de igual manera es importante en el proceso.

Tabla 3. Calor especifico de materiales del proyecto.

Material	Calor Específico Cp (J/g K)	Capacidad de calor (J/°C para 100 g)
Vidrio borosilicato	0.8	80.0
aire	1.01	101
agua	4.179	417.9
cobre	0.385	38.5
polipropileno	0.46	46.0

La temperatura.

La temperatura (T) debe considerarse en unidades termométricas y se puede medir en escala grados Celsius definida por Anders Celsius quien declaro que fuera 0 y 100 grados la temperatura de

congelación y ebullición del agua. Sin embargo, debido a que se debe definir con que unidades se trabajara en sistema inglés o internacional regularmente se usara también grados kelvin. En el caso de este estudio se encuentra que el valor deseable para la alberca es de 25°C. Por razones de factibilidad y correspondencia los grados Celsius y Kelvin se pueden emplear de manera indistinta ya que varían de manera uniforme en su escala, por cada grado Celsius se da un grado Kelvin. (Bird, et al, 1992).

Tabla 4. Temperaturas

Temperaturas de fusión y ebullición del agua a 1 atm de presión		
escala	fusión	ebullición
Kelvin	273.15 K	373.15 K
Celsius	0 °C	100 °C
Fahrenheit	32 °F	212 °F
Réaumur	0 °Re	80 °Re
Rankine	491.67 Ra	671.67 a

Transferencia de calor

La transferencia de calor de los equipos está determinada por el coeficiente de transferencia de calor “k” donde los materiales con los que el sistema está conformado y son el vidrio, plástico, agua y aire. Cuyos valores están dados en la Tabla 5 donde se consideran solo los materiales principales del sistema. (Bird, et al, 1992:8.3).

Tabla 5. Coeficientes de conductividad térmica

Material	Conductividad Térmica
	(W/(m·K))
Agua	0,58
Aire	0,024
Vidrio de borosilicato	1.2
plástico	0,18-0,28
cobre	385

Adicional se tiene que considerar el coeficiente de convección térmica en este caso del agua sin embargo para las consideraciones del sistema se debe definir la densidad.

Densidad

Es la cantidad escalar referida a la cantidad de masa en un determinado volumen de una sustancia por lo tanto descrita con la ecuación siguiente. (Crane, 1987:1.3).

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (9)$$

Viscosidad dinámica

La viscosidad dinámica se manifiesta en líquidos y gases y se relaciona entre el esfuerzo cortante y la gradiente de velocidad se representa con la letra griega μ también existe la viscosidad cinemática la cual se representa por la ν definida por la relación de la viscosidad dinámica sobre la densidad. (Crane, 1987:2).

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (10)$$

Tabla 6. Densidad y Viscosidad dinámica.

Densidad y viscosidad dinámica		
Materiales	$\rho = \text{Kg/m}^3$	$\mu = \text{Pa s}$
Agua	1000	0.001
Aire	1.28	0.0000174
Vidrio de borosilicato	2500	n/a
plástico	920	n/a
cobre	8966	n/a

Tabla 7. Viscosidad del agua y aire a 1 Atm. de presión. Fuente (Bird, et al, 1992)

Temperatura $T(^{\circ}\text{C})$	Agua (líq.) ^a		Aire ^b	
	Viscosidad μ (cp)	Viscosidad cinemática $\nu \times 10^2(\text{cm}^2 \text{seg}^{-1})$	Viscosidad μ (cp)	Viscosidad cineinática $\nu \times 10^2 (\text{cm}^2 \text{seg}^{-1})$
0	1,787	1,787	0,01716	13,27
20	1,0019	1,0037	0,01813	15,05
40	0,6530	0,6581	0,01908	16,92
60	0,4665	0,4744	0,01999	18,86
80	0,3548	0,3651	0,02087	20,88
100	0,2821	0,2944	0,02173	22,98

Las unidades para la viscosidad dinámica en el sistema internacional son $10^{-1} \text{ [Pa}\cdot\text{s]} = [10^{-1} \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}]$ y el valor de la viscosidad para el agua a 20° es de $0.001 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ estos conceptos ayudan a calcular el número de Reynolds. (Crane, 1987:5).

$$Re = \frac{DhV}{\nu} \quad (11)$$

Donde **Dh** es el diámetro hidráulico (Crane, 1987:5), en el caso de los tubos de vacío es de 44mm, **V** es la velocidad del fluido, y ν es la viscosidad dinámica. Por tanto para este estudio se tiene dos consideraciones, la primera es que el flujo sea laminar y la segunda que sea turbulento, más adelante se realizara el análisis pertinente de acuerdo a lo siguiente:

Si el número de Reynolds es menor a 2000, el flujo será laminar y, si es mayor de 4000, el flujo será turbulento. El mecanismo y muchas de las razones por las cuales un flujo es laminar o turbulento es todavía hoy objeto de especulación. (Crane, 1987:5).

- Para valores de $Re \leq 2000$ (para flujo interno en tuberías circulares) el flujo se mantiene estacionario y se comporta como si estuviera formado por láminas delgadas, que interactúan solo en función de los esfuerzos tangenciales existentes. Por eso a este flujo se le llama flujo laminar. El colorante introducido en el flujo se mueve siguiendo una delgada línea paralela a las paredes del tubo.
- Para valores de $2000 \leq Re \leq 4000$ (para flujo interno en tuberías circulares) la línea del colorante pierde estabilidad formando pequeñas ondulaciones variables en el tiempo, manteniéndose sin embargo delgada. Este régimen se denomina de transición.
- Para valores de $Re \geq 4000$, (para flujo interno en tuberías circulares) después de un pequeño tramo inicial con oscilaciones variables, el colorante tiende a difundirse en todo el flujo. Este régimen es llamado turbulento, es decir caracterizado por un movimiento desordenado, no estacionario y tridimensional.

II.5 equilibrio térmico y Transferencia de calor

Para comprender el equilibrio térmico se requiere el previo conocimiento de transferencia de calor a través de la materia, considerando dos sistemas con propiedades térmicas distintas que al ponerse en contacto no son capaces de mezclarse pero si de intercambiar calor, y considerando que se encuentran en un cuarto que no permite la interacción con el exterior permitiría que ambos sistemas lleguen a un equilibrio

La conductividad “k” análoga a la viscosidad inicia con Fourier y tiene que ver con la transmisión de calor, La ley de Fourier dice que el flujo de calor por unidad de área es proporcional a la disminución de la temperatura, con la distancia “Y” y a su vez multiplicada por la constante de proporcionalidad “k” conductividad calorífica del material. (Bird, et al, 1992:8.4).

$$\frac{Q}{A} = k \frac{\Delta T}{Y} \quad (12)$$

La forma diferencial en la cual se encontraron los límites en materia de tiempo y espacio están dados por la siguiente ecuación.

$$q_y = -k \frac{\partial T}{\partial y} \quad (13)$$

En un medio isotrópico donde la temperatura se transmite en tres dimensiones del espacio se obtienen las ecuaciones en estas tres direcciones coordenadas. (Bird, et al, 1992:8.5).

$$q_x = -k \frac{\partial T}{\partial x} \quad q_y = -k \frac{\partial T}{\partial y} \quad q_z = -k \frac{\partial T}{\partial z} \quad (14a/b/c)$$

Existen variaciones de temperatura y presión por lo que la conductividad calorífica “k” y eléctrica “k_e” de los materiales varía en relación a:

$$\frac{k}{k_e T} = L = \text{constante} \quad (15)$$

Donde L es el número de Lorenz que tiene un valor entre 22-29x10⁻⁹ voltios² (°k)⁻² hablando de metales puros a 0°C. Y varía de 10 a 20% por cada 1000°C, y para cuando están por debajo de los -

269.4°C como por ejemplo el mercurio se vuelven superconductores de electricidad más no de calor. . (Bird, et al, 1992:8.24).

La ley de enfriamiento de Newton dice que la pérdida de temperatura de un cuerpo es proporcional a la diferencia de temperaturas entre el cuerpo y sus alrededores, por tanto se considera la ecuación siguiente para la parte de transmisión de energía por convección.

$$q = h\nabla T \quad (16)$$

Por último la ecuación de Stefan Boltzmann donde se habla de la transferencia de calor por radiación que emite un cuerpo es directamente proporcional a la cuarta potencia de su temperatura por lo que se habla de la siguiente expresión.

$$q = \sigma \varepsilon T^4 \quad (17)$$

II.6 Consideraciones del sistema para el modelado matemático.

Para el sistema actual de UPAEP se requiere calcular la resistencia equivalente como se muestra en la Figura 16 donde se puede observar las capas del tubo de vacío, el fenómeno de calentamiento se da en el punto de la temperatura 3 donde los rayos solares calientan de manera directa debido a que la radiación pasa a través del vidrio translucido a el tubo interior que tiene una capa de material adsorbente de los rayos solares que permite convertir la radiación solar en calor y de esta forma transmitirlo al fluido por lo que en la Figura 16 la temperatura T3 es de alta importancia ya que esta determina el calor generado en el equipo. Allí es donde inicia la transferencia de temperatura. Y el vidrio y el vacío básicamente en la parte exterior cumplen la función de no dejar escapar el calor, comportándose como aislantes. Por lo que la suma de las constantes de transferencia térmica del vidrio y el aire, dan como resultado un k equivalente igual a 0.0236 W/(m·K), sin embargo teniendo la consideración de que en el punto T3 inicia básicamente el sistema de calentamiento hacia el centro de manera anular se puede aseverar que la constante de transmisión térmica por conducción será la de 1.2 W/(m·K), que pertenece al vidrio de borosilicato, por lo que posteriormente en la simulación se considerara este valor para comparar los resultados.

En la parte central del tubo de vacío se da el fenómeno de convección para lo cual se realizara el análisis con la consideración de flujo laminar y turbulento para lo cual se obtiene la Ecuación 18: donde el número de Reynolds en flujo laminar será de 1800 y en turbulento será de 4000 esto derivado de la Ecuación 11 y consideraciones ya mencionadas, de la Ecuación 11 de donde se despeja velocidad del fluido para encontrar la siguiente ecuación:

$$V = \frac{Rev}{Dh} \quad (18)$$

Sustituyendo los valores se obtiene:

$$V = \frac{(1800) * (0.000001 m^2/s)}{0.047m} = 0.03829 m/s \quad (19)$$

Esto para flujo laminar.

$$V = \frac{(4000) * (0.000001 m^2/s)}{0.047m} = 0.08510 m/s \quad (20)$$

Valores para flujo turbulento.

Para calcular el coeficiente de convección térmica considerando un flujo laminar o turbulento se usa la siguiente ecuación:

$$hc = \frac{Nuk}{Dh} \quad (21)$$

Donde **hc**: es el coeficiente de transmisión térmica por convección, **Nu**: es el número de Nusselt, el cual es un numero adimensional que mide el aumento de la transmisión de calor por la cual un fluido fluye. **K**: es la constante de transmisión térmica por conducción del agua, (0.56W/mK) y **Dh**: es el diámetro hidráulico por donde el fluido newtoniano estará pasando (0.047m). Por lo tanto será necesario encontrar el número de Nusselt el cual es adimensional y se relaciona directamente con la transferencia de calor por convección de una superficie a un fluido, en el caso de un fluido laminar se encuentra que existen dos valores dependiendo el comportamiento del proceso, si el flujo de calor es constante toma el valor de 4.364 y si la temperatura de la superficie es constante toma el valor de 3.66, de acuerdo con las mediciones en campo el valor de la temperatura es constante por lo que sustituyendo los valores numéricos en la ecuación 21 se tiene:

$$hc = \frac{(3.66) * (0.56 \text{ W/m}^2\text{K})}{0.047\text{m}} = 45.16 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (22)$$

En consecuencia usando el valor de 4.364

$$hc = \frac{(4.364) * (0.56 \text{ W/m}^2\text{K})}{0.047\text{m}} = 53.85 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (23)$$

Por lo cual el valor de hc del agua estará comprendido en el rango de 45.16-53.85 W/m²K, hasta aquí los resultados son teóricos, para flujo laminar.

En el caso de ser un fluido turbulento se tiene la siguiente ecuación:

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^n \quad (24)$$

Donde Pr es el número de Prandtl el cual es adimensional que está definido por la relación entre las velocidades de movimiento y difusión de calor mediante la Ecuación 25, el exponente n se define con el siguiente valor si el líquido se enfría será n=0.3 y cuando se calienta será n=0.4

$$Pr = \frac{Cp\mu}{k} \quad (25)$$

Donde Cp es el calor específico del agua, μ la viscosidad dinámica y k es el coeficiente de transferencia de calor por conducción del líquido por tanto para el caso de estudio tendrá el valor de

$$Pr = \frac{(4179 \text{ J/KgK})(0.001 \text{ Kg/ms})}{0.58 \text{ W/mK}} = 7 \quad (26)$$

Por lo consiguiente el valor de Nusselt sustituyendo en la Ecuación 20 será:

$$Nu = 0.023 * (4000)^{0.8} (7)^{0.4} = 38.143 \quad (27)$$

Para flujos turbulentos en consecuencia sustituyendo en la Ecuación 19 se obtiene:

$$hc = \frac{(38.143) * (0.56 \text{ W/m}^2\text{K})}{0.047\text{m}} = 470.7 \text{ W/m}^3\text{K} \quad (28)$$

Demostrando que existe mayor transmisión calorífica mientras más turbulento sea el fluido.

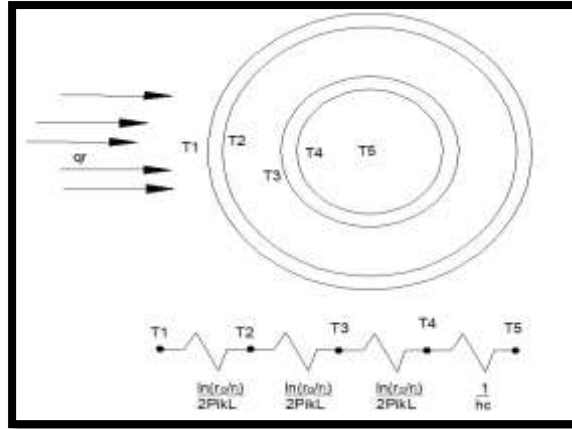


Figura 17. Sección transversal de tubo de vacío. Fuente elaboración propia 2020

En promedio en el punto de estudio existe un 7.25 kw h/m^2 y teniendo en cuenta que por un tubo de vacío se tiene la superficie efectiva de 0.254 m^2 por lo que se obtiene que el calor recibido será de

$$(7.25 \text{ kw h/m}^2) * (0.254 \text{ m}^2) = 1.8415 \text{ kwh}, \quad (29)$$

Esto sería la radiación teórica, posicionada en la superficie T3 de la Figura 17 y por tanto considerando la transferencia de calor por conducción a través de un espacio anular de un vidrio se tiene que el calor absorbido será igual a la constante de transferencia de calor térmica del vidrio por la diferencial de temperatura e indirectamente proporcional a el diferencial del radio anular. Dicha radiación considerada para un solo tubo.

$$q = kA \frac{\Delta T}{\Delta r} \quad (30)$$

Debido a que el calor será equivalente a cada capa del sistema, se puede enunciar que

$$q_{\text{rad}} = q_{\text{conducción}} = q_{\text{convección}} \quad (31)$$

Por tanto se considera la transferencia térmica por conducción donde lo valores de temperatura son desconocidos, usando la Ecuación 30 se tendría el desarrollo siguiente.,

$$q = 1.2 \times 10^{-3} \text{ kw/mK} \left(\frac{\Delta T}{.0016 \text{ m}} \right) = 7.25 \text{ kwh/m}^2 \quad (32)$$

por tanto si se despeja la incógnita que es el diferencial de temperatura

$$\Delta T = \frac{(7.25 \text{ kwh/m}^2) * (.0016 \text{ m})}{1.2 \times 10^{-3} \text{ kw/mK}} = 9.06 \text{ K} \quad (33)$$

De esta manera de acuerdo a las mediciones de campo donde la temperatura superficial del tubo de vacío llego hasta 120°C al medio día por tanto la diferencia de temperatura será de 111°C, de igual manera con la parte convectiva se tiene que

$$\Delta T = \frac{(7.25 \text{ kwh/m}^2)}{45.16 \times 10^{-3} \text{ kw/m}^2 \text{ K}} = 160 \text{ K} \quad (34)$$

Este resultado por sí mismo no es coherente y está dado en fluido laminar por tanto se va a revisar con condiciones de fluido turbulento.

$$\Delta T = \frac{(7.25 \text{ kwh/m}^2)}{470.7 \times 10^{-3} \text{ kw/m}^2 \text{ K}} = 15 \text{ K} \quad (35)$$

Lo que representa un dato más cercano por lo cual se procederá a verificar con los datos de campo, donde cada equipo cuenta con 25 tubos y el total de equipos es de 24 por lo que el total de tubos suma 600 tubos, con lo que se obtiene una radiación total teórica de

$$(7.25 \text{ kw h/m}^2) * (0.254 \text{ m}^2) * (600) = 1104.9 \text{ kwh} \quad (36)$$

Lo que es muy prometedor sin embargo a través del modelado matemático y simulación se verá qué porcentaje realmente se aprovecha.

El calor recibido de acuerdo a la Figura 16 se debe a la radiación por tanto si se considera la ecuación de Stefan Boltzmann se puede encontrar la temperatura T3 bajo la siguiente operación

$$T_3 = \sqrt[4]{\frac{q}{\sigma \varepsilon}} = \sqrt[4]{\frac{7250 \text{ w/m}^2}{(5.6704 \times 10^{-8} \text{ w/m}^2 \text{ K}^4) * .8}} = 565.52 \text{ K} \quad (37)$$

Esta cifra es grande considerando que el equivalente en grados Celsius es de 292, por tanto de acuerdo a las mediciones de campo la temperatura interna llegaba a los 120°C máximos al medio día, cielo abierto, analizando la parte entre T3 y T4 se tiene que establecer la siguiente expresión. (Bird, et al, 1992:6.26).

$$q_{cond} = \frac{\Delta T}{\frac{\ln(r_o/r_i)}{2\pi kL}} \quad (38)$$

Donde el diferencial de temperatura será tomado de la primera consideración de transmisión de energía de la Fórmula 38 donde se obtuvo un valor de 9.06 K y por tanto queda así:

$$q_{cond} = \frac{9.06 K}{\frac{\ln(0.047m/0.044m)}{2\pi \cdot 1.2 \cdot 1.7}} = 1745 w/m^2 K \quad (39)$$

Con este resultado se puede decir que es la energía aprovechada por el sistema, y colocándola en la ecuación de Stefan Boltzmann se obtiene que

$$T_3 = \sqrt[4]{q/\sigma\varepsilon} = \sqrt[4]{\frac{1745 w/m^2}{(5.6704 \times 10^{-8} w/m^2 K^4) \cdot 0.8}} = 396.11 K \quad (40)$$

Lo que da como resultado una temperatura de 123°C lo que al parecer se acerca mucho a la realidad.

De acuerdo con la literatura se han realizado mediciones a cielo abierto, observando el incremento de la energía interna del sistema, demostrando que la eficiencia está basada, en la capacidad del colector de convertir una fracción de la energía solar en energía útil para ser almacenada en el tanque de almacenamiento. (Hamza, 2009) La ecuación 41 indica el cálculo de eficiencia. (Sukhatme, 1980).

$$\eta_{colector} = \frac{Qv(colector)}{I_T A_a} \quad (41)$$

Donde Qv es el calor aprovechado por el colector el cual es el 80% de la irradiación mensual promedio, I_T es el área de integración de energía en el colector, A_a es el área. Esto se compara con autores que indican que el calor útil será igual a la energía solar absorbida menos las pérdidas totales de energía. Donde la eficiencia será directamente proporcional a la energía útil sobre el área del colector solar multiplicado por la radiación solar incidente como sigue en la Ecuación 42 siguiente. (Almache-Almeida, et al, 2018).

$$\eta = \frac{Q_{abs} - Q_p}{A_c * G} = \frac{Q_{util}}{A_c * G} \quad (42)$$

Para comprender ahora el comportamiento térmico en un tiempo diferente de 0 donde la temperatura ya ha cambiado y el fluido está moviéndose en una dirección a cierta velocidad por lo que se tiene que comprender que se realiza un flujo de un líquido (agua) cuyas características cumplen con el de un fluido newtoniano incomprensible el cual transmitirá temperatura, además de comportarse de acuerdo a la fórmula de Bernoulli también, se debe entender que el flujo podría presentarse en dos condiciones con flujo laminar y otro con flujo turbulento.

$$P_{in} + \frac{1}{2}\rho v_{in}^2 + \rho g Z_{in} = P_{out} + \frac{1}{2}\rho v_{out}^2 + \rho g Z_{out} \quad (43)$$

La primera consideración es que el flujo sea laminar por lo que se considera el valor de Reynolds con el valor de 1800, con un diámetro hidráulico de 0.047m y la viscosidad cinemática de 0.000001 m²/s consideraciones que se usan para el agua en la Ecuación 11 de numero de Reynolds donde se despeja a la velocidad.

$$Re = \frac{DhV}{\nu} \quad (11)$$

Por tanto

$$V = \frac{Re\nu}{Dh} \quad (44)$$

De esta forma la velocidad será:

$$V = \frac{1800 \cdot 0.000001 \text{ m}^2/\text{s}}{0.047 \text{ m}} = 0.03829 \text{ m/s.} \quad (45)$$

Para un Reynolds de 4000 donde el flujo seria turbulento la velocidad será:

$$V = \frac{4000 \cdot 0.000001 \text{ m}^2/\text{s}}{0.047 \text{ m}} = 0.085 \text{ m/s.} \quad (46)$$

Cálculo de energía térmica de un calentador solar de vacío. Para el equipo se tiene las siguientes variables en condiciones de flujo laminar con velocidad de 0.03829m/s, esta consideración se realizó previo a la visita de campo, y los datos generados ayudaran a comprender el análisis de un sistema de calentamiento térmico donde como observación principal se encontró que el flujo turbulento ayuda a una mejor transferencia térmica, claro que dependiendo del sistema en cuanto a la demanda energética se debe estudiar que es más factible, de acuerdo a los espacios con los que se cuente como infraestructura y también financiamiento, sin embargo si se manejara un equipo con una mayor capacidad para elevar la temperatura y hacerla fluir a través del sistema, esta es la pregunta que falta por resolver ¿será necesario diseñar un equipo de calentamiento solar para sistemas más robustos que funcionen de manera ideal para este tipo de condiciones?.

II.7 Modelado matemático del sistema

Para el modelado matemático es importante y se sugiere el uso de laboratorios sin embargo esto encarece la investigación, adicional que el producir algo a prueba y error puede resultar en costos adicionales por lo que es necesario utilizar la simulación computacional de manera prioritaria para poder atender proyectos cuya magnitud constructiva sea considerable en costos, actualmente un modelo representa una realidad de manera parcial, básicamente un esbozo del contexto real, por lo que en detalle en el caso de sistemas de calentamiento solar se debe observar que variables hacen que el sistema se comporte de acuerdo a lo que se requiere en la vida real. (Hidalgo, & Hernández, 2019b).

Para solucionar por medio de modelos de simulación computacional un sistema de calentamiento térmico se requiere formular ecuaciones matemáticas que se acerquen lo más posible a las condiciones del sistema, obteniendo una estimación del comportamiento que será similar al original, lo que ayuda a obtener datos que permitirán llegar a resultados más apropiados, lo que resulta en la reducción de costos de manufactura, para llegar a esto se debe considerar situaciones de cielo abierto, lo que no siempre sucede ya se ha considerado el modelar aproximando a las condiciones climáticas sin embargo es algo que no se ha podido encontrar debido a que las variaciones climáticas hasta ahora son impredecibles, sin embargo da una idea cercana a lo real, para esto se han venido estudiando fluidos que permitan elevar el calor como son los anticongelantes y materiales con cambio de fase, los cuales hacen más eficientes los procesos térmicos. (Liu, et al, 2012). Adicional gracias a los avances tecnológicos se puede conocer el valor promedio de irradiación en la zona de estudio, esto facilita un poco la aproximación a la situación real, de esta manera las variables existentes son el área de incidencia solar, temperaturas, flujo.

A manera de una breve reseña el modelado computacional es el uso de computadoras para simular y estudiar el comportamiento de sistemas complejos, mediante las matemáticas, la física y la informática. Un modelo computacional contiene numerosas variables que caracterizan el sistema bajo estudio. La simulación se realiza ajustando cada una de estas variables, solas o combinadas, y después se observa cómo los cambios afectan los resultados. Los resultados de las simulaciones de modelos ayudan a los investigadores a hacer predicciones acerca de cómo se comportara el sistema en una situación real en respuesta a condiciones cambiantes. El modelado puede agilizar la

investigación al permitir que los científicos realicen miles de experimentos simulados por computadora a fin de identificar los experimentos físicos reales que más probablemente ayudarán al investigador a encontrar la solución al problema bajo estudio.

Actualmente existen diferentes softwares que pueden ayudar a realizar simulaciones computacionales adicional representan herramientas que permiten ahorrar inversión por falta de planeación ya que se pueden usar para realizar verificaciones muy cercanas a la realidad, se debe considerar el utilizar este tipo de simuladores para realizar la planeación de proyectos térmicos solares, uno de los principales softwares usados es Matlab ya que ayuda a modelar fórmulas más complejas a través de Simulink, y de esta manera obtener datos que ayuden a entender el comportamiento variable de los sistemas térmicos de acuerdo a los requerimientos del sistema, además de existir otros como AutoCAD, Solid Works, Solid Edge, Comsol, Aspen, etc. Que pueden aportar información de manera distinta, en correspondencia con el estudio se usara la herramienta de Comsol y Matlab para encontrar el comportamiento del sistema, después de una breve descripción de los programas se procederá a iniciar el simulado de las ecuaciones correspondientes.

Como se observó en este capítulo la posición de la zona de análisis y la rotación aparente del sol a través de la bóveda celeste debe considerarse, así como las variables principales temperatura, flujo, volumen, viscosidad, densidad, entre otras son relevantes. De igual manera está muy relacionada con la transferencia de calor. También se puede ver que en el futuro las energías renovables tomaran más participación debido a que cada vez más el análisis de las mismas se da con mayor frecuencia además que se continúan buscando nuevas aplicaciones.

CAPÍTULO III METODOLOGÍA

Este capítulo habla del procedimiento realizado para el estudio del sistema solar térmico, así como el modelado matemático y la interacción con los softwares de Matlab y Comsol, adicional la relación que existe con los datos de campo y como esta relación ayuda a analizar un sistema térmico solar, para finalmente aplicarlos en condiciones reales.

A continuación se enumeran los pasos que de manera práctica se realizaron para este estudio.

I. Primeramente se realizó el análisis del estado del arte referente al estudio de sistemas térmicos solares y su desempeño aplicado a la zona de estudio, aplicando a estudio previos realizados que se ajusten a las variables del sistema, cálculos teóricos para obtener un modelo matemático adecuado al sistema.

II. Realización de un muestreo de campo para conocer los objetivos y alcances del sistema, así como las variables que más interactúan con el sistema de calentamiento solar térmico, con estos datos se iniciara la simulación previa en Matlab Simulink para encontrar la relación computacional con lo real.

III. Toma de mediciones de todo el sistema así de comportamientos térmicos para poder entender el funcionamiento practico del sistema, y así poder definir el procedimiento más adecuado de simulación, de igual manera se estudiara el comportamiento del sistema en el simulador Comsol de acuerdo a los resultados obtenidos en Matlab Simulink. Esto con el fin de comparar y observar resultados de esta interacción de flujos y temperaturas en el sistema de calentamiento térmico solar.

IV. Discusión de los resultados obtenidos y análisis del sistema se propondrá un diseño que sea capaz de mejorar la eficiencia del sistema de calentamiento solar, con un respectivo análisis financiero que demuestre la factibilidad de usar sistemas solares.

III.1 Modelado del sistema térmico a través de ecuaciones diferenciales

Para tener una idea de la naturaleza de la solución parcial diferencial se considera algunos ejemplos para resolver la ecuación de primer orden

$$U_x = y \operatorname{sen} x \quad (47)$$

Al integrar la Ecuación 1 con respecto a x se obtiene las funciones

$$U(x, y) = -y \operatorname{cos} x + f(y) \quad (48)$$

Donde f es una función arbitraria que dará cierta solución a la Ecuación 48, por lo que cada solución depende de un elemento arbitrario. Por lo que se puede considerar el siguiente ejemplo de ecuación simple de segundo orden como $U_{xx} = 1$ al integrar esta ecuación con respecto a x dos veces se obtiene:

$$U(x, y) = \frac{1}{2}x^2 + xf(y) + g(y) \quad (49)$$

Suponiendo que U es función de tres variables se tiene la solución general siguiente:

$$U(x, y, z) = \frac{1}{2}x^2 + xf(y, z) + g(y, z) \quad (50)$$

Donde f y g son funciones arbitrarias de dos variables.

Se podría considerar que la solución a la ecuación general parcial con m variables independientes tendrá n funciones independientes igual a $m - 1$. Este planteamiento es análogo al concerniente a la solución de una ecuación diferencial ordinaria, la cual se puede considerar con el caso especial donde $m=1$. Que es aproximadamente correcto pero difícilmente preciso e imposible de probar generalmente, en efecto solo aplica para este caso especial de ecuaciones diferenciales ordinarias.

Para el modelado matemático del sistema se realizaron las siguientes consideraciones: el sistema recibe calor solar a través de la radiación, después es transmitido por medio de conducción y por ultimo por convección, y debido a la forma cilíndrica de los tubos de vacío se consideró la ecuación de energía en función de las densidades del flujo de energía y cantidad de movimiento en coordenadas cilíndricas obtenido del libro de “Fenómenos de Transporte”. (Bird, et al, 1992:10.10).

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_r \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = - \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r q_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial q}{\partial \theta} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right] - T \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right) \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) - \left\{ \tau_{rr} \frac{\partial v_r}{\partial r} + \tau_{\theta\theta} \frac{1}{r} \left(\frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + v_r \right) + \tau_{zz} \frac{\partial v_z}{\partial z} \right\} - \left\{ \tau_{r\theta} \left[r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{v_\theta}{r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} \right] + \tau_{rz} \left(\frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) + \tau_{\theta z} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \theta} + \frac{\partial v_\theta}{\partial z} \right) \right\} \quad (51)$$

Para iniciar el análisis se considera que el punto inicial será en un tiempo igual a cero, además que los vectores principales de transmisión de temperatura serán en tres direcciones como se muestra en la Figura 18 donde la dirección en z será despreciable además que el valor de flujo de calor debido al desplazamiento de placas τ de igual manera es despreciable debido ya que es un fluido newtoniano, por lo que la ecuación se reduce a la siguiente expresión.

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_r \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) = - \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r q_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial q}{\partial \theta} \right] - T \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right) \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} \right) \quad (52)$$

Donde T es la temperatura, q es el calor transmitido por conducción, radiación y convección ρ es la densidad del fluido y C_p es la capacidad calorífica.

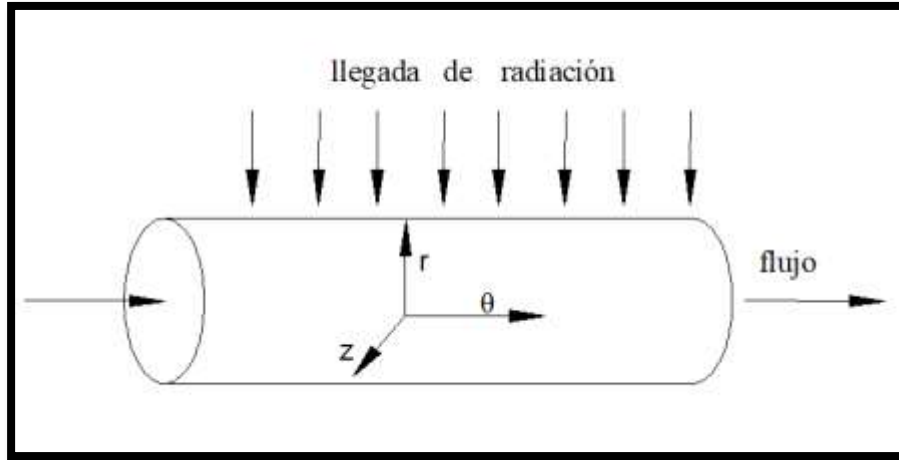


Figura 18. Flujo vectorial de calor. Fuente: Elaboración propia basada en Bird, et al 1992.

Debido a la intervención de estas tres formas de transmisión de calor se tiene la siguiente relación:

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_r \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) = - \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r [-k\nabla T - h\nabla T + \sigma \varepsilon A \nabla T^4]_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (-k\nabla T - h\nabla T + \sigma \varepsilon A \nabla T^4)_\theta \right] - T \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right) \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} \right) \quad (53)$$

Desarrollando la ecuación de transferencia térmica se obtiene

$$\left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r[-k\nabla T - h\nabla T + \sigma\varepsilon A\nabla T^4]_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (-k\nabla T - h\nabla T + \sigma\varepsilon A\nabla T^4)_\theta \right] \quad (54)$$

Por lo que se tiene que de acuerdo a la ecuación fundamental

$$\frac{\partial(uv)}{\partial u} = u \frac{\partial u}{\partial u} + v \frac{\partial v}{\partial u} \quad (55)$$

se obtiene que:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r[-k\nabla T - h\nabla T + \sigma\varepsilon A\nabla T^4]_r) = \frac{1}{r} \left[r \frac{\partial}{\partial r} (-k\nabla T - h\nabla T + \sigma\varepsilon A\nabla T^4) + (-k\nabla T - h\nabla T + \sigma\varepsilon A\nabla T^4) \frac{\partial r}{\partial r} \right] \quad (56)$$

Por lo que

$$\begin{aligned} & \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r[-k\nabla T - h\nabla T + \sigma\varepsilon A\nabla T^4]_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (-k\nabla T - h\nabla T + \sigma\varepsilon A\nabla T^4)_\theta \right] \\ &= \frac{1}{r} \left[r \frac{\partial}{\partial r} (-k\nabla T) + r \frac{\partial}{\partial r} (-h\nabla T) + r \frac{\partial}{\partial r} (\sigma\varepsilon A\nabla T^4) \right] \\ &+ (-k\nabla T - h\nabla T + \sigma\varepsilon A\nabla T^4) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (-k\nabla T - h\nabla T + \sigma\varepsilon A\nabla T^4)_\theta \end{aligned} \quad (57)$$

Desarrollando nabra en la ecuación respecto a θ y r despreciando z se tiene que:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{r} \left[r \frac{\partial}{\partial r} (-k\nabla T) + r \frac{\partial}{\partial r} (-h\nabla T) + r \frac{\partial}{\partial r} (\sigma\varepsilon A\nabla T^4) + (-k\nabla T - h\nabla T + \sigma\varepsilon A\nabla T^4) \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (-k\nabla T - \\ & h\nabla T + \sigma\varepsilon A\nabla T^4)_\theta = \frac{\partial}{\partial r} \left(-k \left(\frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left(-h \left(\frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left(\sigma\varepsilon A \left(\frac{1}{r} \frac{\partial T^4}{\partial r} + \frac{\partial T^4}{\partial \theta} \right) \right) - \\ & \frac{k}{r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) - \frac{h}{r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) - \frac{\sigma\varepsilon A}{r} \left(\frac{1}{r} \left(\frac{\partial T^4}{\partial r} + \frac{\partial T^4}{\partial \theta} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial \theta} \left(-\frac{k}{r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) - \frac{h}{r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \right. \\ & \left. \frac{\sigma\varepsilon A}{r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial T^4}{\partial r} + \frac{\partial T^4}{\partial \theta} \right) \right) \end{aligned} \quad (58)$$

Realizando las operaciones indicadas se obtiene:

$$\begin{aligned} &= -\frac{k}{r} \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} - \frac{k}{r} \frac{\partial^2 T}{\partial r \partial \theta} - \frac{h}{r} \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} - \frac{h \partial^2 T}{\partial r \partial \theta} + \frac{\sigma\varepsilon A}{r} \frac{\partial^2 T^4}{\partial r^2} + \frac{\sigma\varepsilon A \partial^2 T^4}{\partial r \partial \theta} - \frac{k}{r^2} \frac{\partial T}{\partial r} - \frac{k}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} - \frac{h}{r^2} \frac{\partial T}{\partial r} - \frac{h}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} + \frac{\sigma\varepsilon A}{r^2} \frac{\partial T^4}{\partial r} + \\ & \frac{\sigma\varepsilon A}{r} \frac{\partial T^4}{\partial \theta} - \frac{k}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial r \partial \theta} - \frac{k}{r} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} - \frac{h}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial r \partial \theta} - \frac{h}{r} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\sigma\varepsilon A}{r^2} \frac{\partial^2 T^4}{\partial r \partial \theta} + \frac{\sigma\varepsilon A}{r} \frac{\partial^2 T^4}{\partial \theta^2} \end{aligned} \quad (59)$$

agrupando los términos queda:

$$= \left[-\frac{k}{r} \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} - \frac{h}{r} \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\sigma \varepsilon A}{r} \frac{\partial^2 T^4}{\partial r^2} \right] + \left[-\frac{k}{r} \frac{\partial^2 T}{\partial r \partial \theta} - \frac{k}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial r \partial \theta} - \frac{h \partial^2 T}{\partial r \partial \theta} - \frac{h}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial r \partial \theta} + \frac{\sigma \varepsilon A \partial^2 T^4}{\partial r \partial \theta} + \frac{\sigma \varepsilon A}{r^2} \frac{\partial^2 T^4}{\partial r \partial \theta} \right] + \left[-\frac{k}{r^2} \frac{\partial T}{\partial r} - \frac{h}{r^2} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\sigma \varepsilon A}{r^2} \frac{\partial T^4}{\partial r} \right] + \left[-\frac{k}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} - \frac{h}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} + \frac{\sigma \varepsilon A}{r} \frac{\partial T^4}{\partial \theta} \right] + \left[-\frac{k}{r} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} - \frac{h}{r} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\sigma \varepsilon A}{r} \frac{\partial^2 T^4}{\partial \theta^2} \right] \quad (60)$$

Regresando a la Ecuación 53 considerando que la velocidad en el vector θ será despreciable debido a lo establecido en un tiempo cero, se obtiene la siguiente expresión:

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_r \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \left[-\frac{k}{r} \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{h}{r} \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} - \frac{\sigma \varepsilon A}{r} \frac{\partial^2 T^4}{\partial r^2} \right] + \left[-\frac{k}{r} \frac{\partial^2 T}{\partial r \partial \theta} - \frac{k}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial r \partial \theta} - \frac{h \partial^2 T}{\partial r \partial \theta} - \frac{h}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial r \partial \theta} + \frac{\sigma \varepsilon A \partial^2 T^4}{\partial r \partial \theta} + \frac{\sigma \varepsilon A}{r^2} \frac{\partial^2 T^4}{\partial r \partial \theta} \right] + \left[-\frac{k}{r^2} \frac{\partial T}{\partial r} - \frac{h}{r^2} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\sigma \varepsilon A}{r^2} \frac{\partial T^4}{\partial r} \right] + \left[-\frac{k}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} - \frac{h}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} + \frac{\sigma \varepsilon A}{r} \frac{\partial T^4}{\partial \theta} - \frac{k}{r} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} - \frac{h}{r} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\sigma \varepsilon A}{r} \frac{\partial^2 T^4}{\partial \theta^2} \right] - T \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right) \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v_r) \right) \quad (61)$$

Para entender el comportamiento de la Ecuación 61 se realizara la discretización de esta ecuación basándonos en la ecuación:

$$\frac{\partial T}{\partial r} = \frac{\left[\frac{\Delta T_{i-1} + \Delta T_{i+1}}{\Delta T} \right]}{\left[\frac{\Delta r_{i-1} + \Delta r_{i+1}}{\Delta r} \right]} = \frac{[(\Delta T_{i-1} + \Delta T_{i+1}) \Delta r]}{[(\Delta r_{i-1} + \Delta r_{i+1}) \Delta T]} \quad (62)$$

Por lo que nuestra Ecuación 35 resulta:

$$\begin{aligned} \rho C_p \left[\frac{(\Delta T_{i-1} + \Delta T_{i+1}) \Delta t}{(\Delta t_{i-1} + \Delta t_{i+1}) \Delta T} \right] + \rho C_p v_r \left[\frac{(\Delta T_{i-1} + \Delta T_{i+1}) \Delta t}{(\Delta t_{i-1} + \Delta t_{i+1}) \Delta T} \right] &= -\frac{k}{r} \left[\frac{((\Delta T_{i-1})^2 + 2(\Delta T_{i-1})(\Delta T_{i+1}) + (\Delta T_{i+1})^2) (\Delta r)^2}{((\Delta r_{i-1})^2 + 2(\Delta r_{i-1})(\Delta r_{i+1}) + (\Delta r_{i+1})^2) (\Delta T)^2} \right] - \\ &\frac{h}{r} \left[\frac{((\Delta T_{i-1})^2 + 2(\Delta T_{i-1})(\Delta T_{i+1}) + (\Delta T_{i+1})^2) (\Delta r)^2}{((\Delta r_{i-1})^2 + 2(\Delta r_{i-1})(\Delta r_{i+1}) + (\Delta r_{i+1})^2) (\Delta T)^2} \right] + \frac{\sigma \varepsilon A}{r} \left[\frac{((\Delta T_{i-1}^4)^2 + 2(\Delta T_{i-1}^4)(\Delta T_{i+1}^4) + (\Delta T_{i+1}^4)^2) (\Delta r)^2}{((\Delta r_{i-1})^2 + 2(\Delta r_{i-1})(\Delta r_{i+1}) + (\Delta r_{i+1})^2) (\Delta T^4)^2} \right] + \\ &\left[-k \left[\frac{((\Delta T_{i-1})^2 + 2(\Delta T_{i-1})(\Delta T_{i+1}) + (\Delta T_{i+1})^2) (\Delta r \Delta \theta)}{(\Delta r_{i-1} + \Delta r_{i+1})(\Delta \theta_{i-1} + \Delta \theta_{i+1})(\Delta T)^2} \right] \right] + \left[-h \left[\frac{((\Delta T_{i-1})^2 + 2(\Delta T_{i-1})(\Delta T_{i+1}) + (\Delta T_{i+1})^2) (\Delta r \Delta \theta)}{(\Delta r_{i-1} + \Delta r_{i+1})(\Delta \theta_{i-1} + \Delta \theta_{i+1})(\Delta T)^2} \right] \right] + \\ &\left[\sigma \varepsilon A \left[\frac{((\Delta T_{i-1}^4)^2 + 2(\Delta T_{i-1}^4)(\Delta T_{i+1}^4) + (\Delta T_{i+1}^4)^2) (\Delta r \Delta \theta)}{(\Delta r_{i-1} + \Delta r_{i+1})(\Delta \theta_{i-1} + \Delta \theta_{i+1})(\Delta T^4)^2} \right] \right] + \left[-\frac{k}{r^2} \frac{(\Delta T_{i-1} + \Delta T_{i+1}) \Delta r}{(\Delta r_{i-1} + \Delta r_{i+1}) \Delta T} \right] + \left[-\frac{h}{r^2} \frac{(\Delta T_{i-1} + \Delta T_{i+1}) \Delta r}{(\Delta r_{i-1} + \Delta r_{i+1}) \Delta T} \right] + \\ &\left[\frac{\sigma \varepsilon A}{r^2} \frac{(\Delta T_{i-1}^4 + \Delta T_{i+1}^4) \Delta r}{(\Delta r_{i-1} + \Delta r_{i+1}) \Delta T^4} \right] + \left[-\frac{k}{r} \frac{(\Delta T_{i-1} + \Delta T_{i+1}) \Delta \theta}{(\Delta \theta_{i-1} + \Delta \theta_{i+1}) \Delta T} \right] + \left[-\frac{h}{r} \frac{(\Delta T_{i-1} + \Delta T_{i+1}) \Delta \theta}{(\Delta \theta_{i-1} + \Delta \theta_{i+1}) \Delta T} \right] + \left[\frac{\sigma \varepsilon A}{r} \frac{(\Delta T_{i-1}^4 + \Delta T_{i+1}^4) \Delta \theta}{(\Delta \theta_{i-1} + \Delta \theta_{i+1}) \Delta T^4} \right] - \\ &T \left[\frac{(\Delta P_{i-1} + \Delta P_{i+1}) \Delta T}{(\Delta T_{i-1} + \Delta T_{i+1}) \Delta P} \right] \frac{v_r}{r} \left[\frac{(\Delta v_{i-1} + \Delta v_{i+1}) \Delta r}{(\Delta r_{i-1} + \Delta r_{i+1}) \Delta v} \right] \quad (63) \end{aligned}$$

Este análisis se considera muy cercano a la realidad de sistemas de transferencia térmica anular y representa solo una parte del sistema de calentamiento térmico, pero principalmente ayuda a dimensionar la energía que es aprovechada.

III.2 Mat Lab y Comsol aplicados al sistema

Matlab es un software que facilita las operaciones matriciales, una herramienta que permite resolver ecuaciones diferenciales, matrices, y todo tipo de operación matemática, que de igual manera ayuda a interpretar los resultados de ecuaciones más complejas, las cuales tomarían mucho tiempo para resolver, además de todo esto tiene una aplicación llamada Simulink que de manera más gráfica resuelve ecuaciones como derivadas parciales, precisamente como las que se utilizan en el cálculo de transferencia de calor en la Ecuación 61 por tanto a través del manejo de este software se interpretaran resultados que ayuden a mejorar los sistemas.

Matlab desarrolla un lenguaje de programación propio donde tú eliges el nombre de tus variables y defines el valor numérico, o formula basada en ecuaciones determinadas por el usuario, esto permite realizar cálculo de vectores y matrices, funciones, cálculo lambda, y programación orientada a objetos.

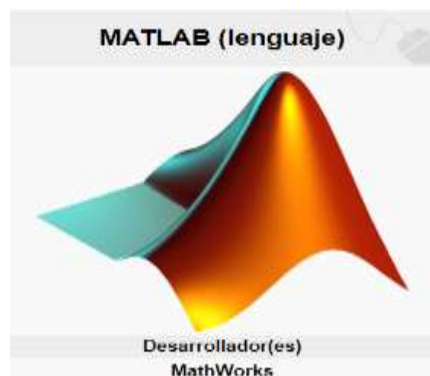


Figura 19. Presentación de Matlab.

Una de las funciones básicas de Matlab es el ploteo que básicamente es la representación gráfica de una función lo que ayuda a graficar en dos dimensiones y tres dimensiones, un ejemplo es el siguiente:

```

>> h = figure;                % crea una nueva figura con el valor de "h"

>> x = [0:0.001:10];        % crea el vector "x"

>> y = sin(x);

>> plot(x, y)

```

Si se escribe esto en el programa se obtiene la gráfica Figura 20, de seno en el intervalo de incrementos de 0.001 de 0 a 10.

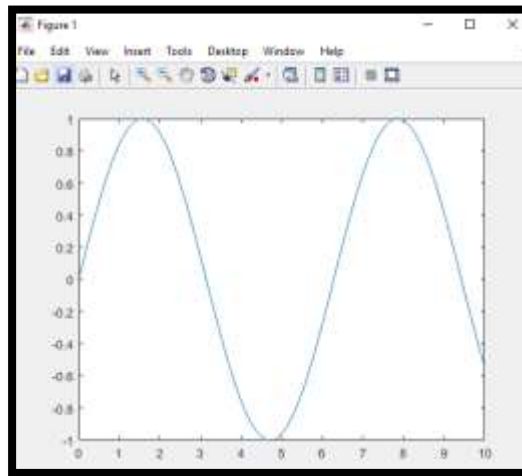


Figura 20. Diagrama de Seno Fuente elaboración propia, 2020

También se usa principalmente en condiciones de análisis de ecuaciones diferenciales, en donde la herramienta llamada Simulink facilita la forma de realizar cálculos de derivadas parciales etc.

Se debe tomar en consideración que la parte matemática es muy importante ya que va a definir el sistema, y los resultados que se obtengan derivados de la compilación de las ecuaciones será el resultado final de este análisis y lo principal es encontrar valores que se acerquen a la realidad del contexto del sistema estudiado. Los siguientes comandos en Matlab Simulink dan como resultado una gráfica en 3D Figura 21, lo cual es bastante interesante.

```

>> x=linspace(0,10*pi,1000)

>> y=cos(x)

>> z=sin(x)

```

```
>> figure  
  
>> plot3(x,y,z)  
  
>> grid  
  
>> xlabel('angulo'), ylabel('cosx'), zlabel('senox')
```

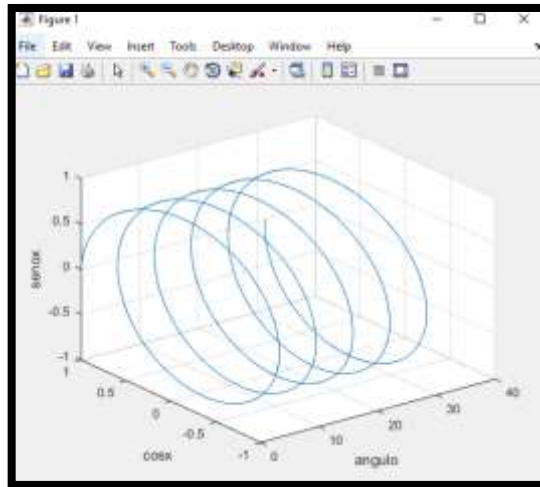


Figura 21. Grafico 3D en Matlab Fuente elaboración propia.

De la misma manera que otros programas Matlab presenta herramientas que facilitan estudios de sistemas, donde se necesita introducir variables que se comportan en el tiempo de formas inesperadas, como es el caso de los sistemas solares y eólicos, donde las características del sistema varían de acuerdo a la estación del año, lo cual representa una idea de cómo se comporta un sistema en verano o invierno, con solo cambiar las variables de temperatura y de igual manera el flujo.

En el sistema de estudio a través del modelado matemático se busca obtener resultados medibles que puedan tener un comportamiento similar a las condiciones reales de operación, para así saber que se necesita para mejorar un sistema térmico solar.

Comsol es un software que permite analizar a través de elementos finitos, en casos de ingeniería especialmente elementos acoplados o multifísicos, que ayudan a conocer el comportamiento de fenómenos físicos, químicos etc.. COMSOL Multiphysics (antes conocido como FEMLAB) ofrece una amplia y bien gestionada interfaz a MATLAB y sus toolboxes que proporcionan una amplia variedad de posibilidades de programación, preprocesado y postprocesado. También permite entrar sistemas acoplados de ecuaciones en derivadas parciales (EDP). Además del amplio rango de

problemas clásicos que pueden ser eficientemente trabajados con los diferentes módulos específicos disponibles, el módulo básico "Multifísica" puede ser usado para resolver EDPs tipo Schrödinger, y ha sido exitosamente aplicado para simular efectos cuánticos en sistemas de baja dimensionalidad tales como nanopartículas metálicas, nanotubos de carbono, puntos cuánticos, pozos cuánticos, moléculas artificiales, y monocapas de calcogenuros con metales de transición.

Es usado en diseño de piezas metálicas a las cuales le pueden aplicar una carga eléctrica, de temperatura, esfuerzo mecánico, etc, lo interesante es la interacción de todos los fenómenos como la multifísica, lo cual permite observar en base a el material y condiciones físicas el comportamiento, de el objeto de estudio en este caso el comportamiento térmico del sistema solar.

Dentro del software se puede realizar modelos en dos planos y tres planos, lo cual se realiza mediante comandos que van de lo más sencillo a formas más complicadas, sin embargo es muy fácil de manejar de igual forma se añaden herramientas que permiten analizar materiales distintos que se encuentran en la librería del software.

Los análisis van desde fuerzas mecánicas, transferencia de energía, conducción térmica, entre otros, sin embargo se puede añadir el análisis de su preferencia, los resultados de igual manera se pueden comparar alterando las variables físicas como temperatura y flujo.



Figura 22. Logo de Comsol

A manera de ejemplo en la Figura 23 se muestra una aplicación realizada a un sistema de transferencia térmica donde se observa la diferencia de las temperaturas, para lograr este efecto se introducen los valores de temperatura inicial, tipo de materiales, dimensiones, con lo que se puede observar el comportamiento del sistema, y de igual manera un pequeño análisis de incremento de temperaturas con respecto a una linealidad.

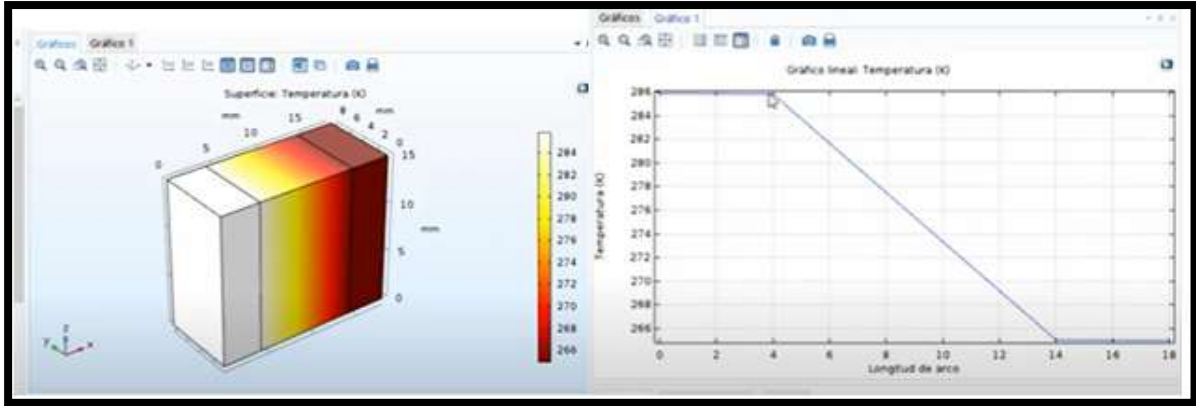


Figura 23 Aplicación térmica de Comsol. Fuente elaboración propia 2020

Se puede observar de una manera muy gráfica el comportamiento de este sistema, sin embargo es labor del investigador o analista que los valores de campo sean los mismos que en la simulación esto se pondrá a discusión en los resultados de esta investigación.

III.3 Modelado y simulación una comparativa de los datos de campo.

Se Partirá del análisis de nuestra Ecuación 35 que fue dividida en la Tabla 8 la cual ayudo a iniciar la simulación puesto que define parte del sistema de estudio de tal forma que a través de esta tabla se definieron los valores de las variables que afectan el sistema térmico solar, de acuerdo a las condiciones las cuales se verificaron en campo, con la toma de datos de los equipos de bombeo por lo que se vaciaron en la Tabla 9 y con esto se realizó la simulación en Matlab Simulink, y se obtuvo los resultados teóricos del comportamiento, donde se obtiene 90 °C de temperatura final en condiciones estáticas, sin embargo se considera solo un tubo de borosilicato, como se puede ver en la Figura 24, sin embargo en las mediciones de campo se encontró que la temperatura máxima alcanzada fue de 120°C en la parte interna del tubo además que el diseño de este equipo es diferente ya que por allí no pasa el agua, el agua pasa por una tubería de cobre con aislamiento, por lo cual se realizaron adecuaciones para acercarse más a lo real, enseguida se planteó una ecuación que ayudara a realizar el estudio de equilibrio térmico del sistema de forma más general, para comprenderlo se usó el plano generado debido al levantamiento Figuras 41-46, donde se observa que existen dos fuentes de energía la parte solar y la parte fósil, las dos interactúan con el tanque horizontal de almacenamiento térmico el cual interactúa con la salidas a las regaderas las cuales se encuentran a una distancia de más de 80metros, lo que indica que en un principio el agua caliente tarda en salir.

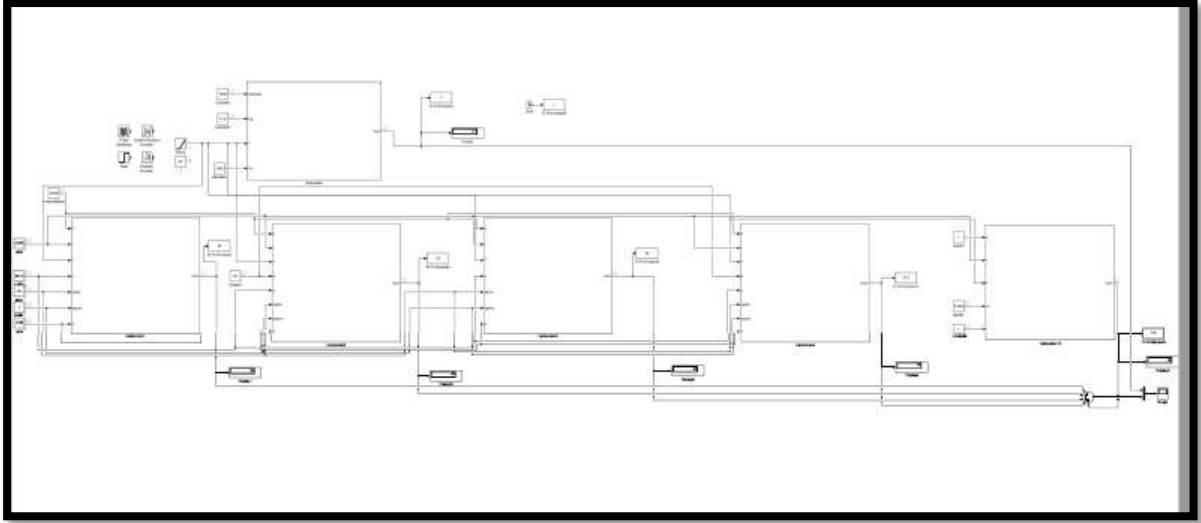


Figura 24. Integrado de la ecuación 35 en Simulink. Fuente elaboración propia, 2020.

El sistema actual como se observa en la Figura 25 es de tubos de vacío de borosilicato los cuales tiene salida de $\frac{3}{4}$ " o 19mm, el interior es de cobre y se encuentran configurados en 4 filas en paralelo de 5 equipos en serie como lo pueden ver en los planos del anexo Figura 44, de acuerdo a los cálculos previos de transferencia de calor es necesario aumentar el flujo para propiciar la mejora de eficiencia.



Figura 25. Sistema de calentamiento actual.

Tabla 8 Ecuaciones para modelado. Fuente: Elaboración propia 2020

Ecuaciones	Variables	Valore numéricos
$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_r \frac{\partial T}{\partial r} \right)$	$\rho, C_p, T, t, v_r.$	$\rho = 1000 \text{ Kg/cm}^3$ $C_p = 4.179 \text{ J/g K}$ $T = 30^\circ\text{C}$ $t = 0$ $v_r = 0$
$\frac{k \partial^2 T}{r \partial r^2}$	$k, T, r.$	$k = 0.0236 \text{ W/m K}$ equivalente vidrio-aire-vidrio $T = 30^\circ\text{C}$ $r = 0.025 \text{ m}$
$\frac{u \partial^2 T}{r \partial r^2}$	$u, T, r.$	$u = 45.16 \text{ W/m}^2\text{K}$ $T = 30^\circ\text{C}$ $r = 0.025 \text{ m}$
$\frac{\sigma \epsilon A \partial^2 T^4}{r \partial r^2}$	$\sigma, \epsilon, A, T, r.$	$\sigma = 5.6704 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ $\epsilon = 1$ $A = 2\pi r \theta = 0.254 \text{ m}^2$ $T = 30^\circ\text{C}$ $r = 0.025 \text{ m}$
$\frac{k \partial^2 T}{r \partial r \partial \theta}$	k, T, r, θ	$k = 0.0236 \text{ W/m K}$ $T = 30^\circ\text{C}$ $r = 0.025 \text{ m}$ $\theta = 1.72 \text{ m}$
$\frac{h \partial^2 T}{\partial r \partial \theta}$	$h, T, r, \theta.$	$h = 45.16 \text{ W/m}^2\text{K}$ $T = 30^\circ\text{C}$ $r = 0.025 \text{ m}$ $\theta = 1.80 \text{ m}$
$\frac{\sigma \epsilon A \partial^2 T^4}{\partial r \partial \theta}$	$\sigma, \epsilon, A, T, r, \theta.$	$\sigma = 5.6704 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ $\epsilon = 1$ $A = \text{m}^2$ $T = 30^\circ\text{C}$ $r = 0.025 \text{ m}$ $\theta = 1.72 \text{ m}$
$\frac{k \partial T}{r^2 \partial r}$	$k, T, r.$	$k = 0.0236 \text{ W/m K}$ $T = 30^\circ\text{C}$ $r = 0.025 \text{ m}$

$\frac{h\partial T}{r^2\partial r}$	$h, T, r.$	$h = 45.16 \text{ W/m}^2\text{K}$ $T = 30^\circ\text{C}$ $r = 0.025 \text{ m}$
$\frac{\sigma\varepsilon A\partial T^4}{r^2\partial r}$	$\sigma, \varepsilon, A, T, r.$	$\sigma = 5.6704 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ $\varepsilon = 1$ $A = 0.254 \text{ m}^2$ $T = 30^\circ\text{C}$ $r = 0.025 \text{ m}$
$\frac{k\partial T}{r\partial \theta}$	$k, T, r, \theta.$	$k = 0.0236 \text{ W/m K}$ $T = 30^\circ\text{C}$ $r = 0.025 \text{ m}$ $\theta = 1.72 \text{ m}$
$\frac{h\partial T}{r\partial \theta}$	$h, T, r, \theta.$	$h = 45.16 \text{ W/m}^2\text{K}$ $T = 30^\circ\text{C}$ $r = 0.025 \text{ m}$ $\theta = 1.72 \text{ m}$
$\frac{\sigma\varepsilon A\partial T^4}{r\partial \theta}$	$\sigma, \varepsilon, A, T, r, \theta.$	$\sigma = 5.6704 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ $\varepsilon = 1$ $A = 0,254 \text{ m}^2$ $T = 30^\circ\text{C}$ $\theta = 1.72 \text{ m}$ $r = 0.025 \text{ m}$
$T \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right) \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rv_r) \right)$	$T, P, r, v_r.$	$T = 30^\circ\text{C}$ $P = 1 \text{ atm.}$ $r = 0.025 \text{ m}$ $v_r = 0.038 \text{ m/s}$

De acuerdo con la revisión en campo y para fines aplicativos se generó la Tabla 9 que muestra los caudales máximos de los equipos instalados de acuerdo a placas de datos, lo que ayuda a encontrar datos que permitirán analizar el sistema dando mejores resultados al modelado de Simulink en Matlab.

Tabla 9 Caudal máximo fuente datos técnicos de campo 2020.

Equipo	Caudal máximo m^3/s	Sistema	Subsistema
Bomba de 7.5 hp	0.0183333	Alberca	fósil/solar
Bomba Sentinel T8 de 1/2hp	0.0013333	regaderas	solar
Bomba de 1/6 hp Armstrong	0.0023	regaderas	fósil

Consumo regaderas	0,000495	regaderas	fósil/solar
-------------------	----------	-----------	-------------

A propósito de los resultados que se analizaron se tiene la comparativa del número de Reynolds que será distinto. (Crane, 1987:5), ya que los flujos del sistema de calentamiento de regaderas se rigen por el caudal de la bomba marca Sentinel T8 que de acuerdo a los datos técnicos tiene un caudal máximo de 80 litros por minuto, y fluye en un diámetro de 1.5” diámetro, por lo que al realizar la unificación de unidades de las constantes de viscosidad dinámica y densidad se tiene que:

$$Re=4Q\rho/\pi D\mu \quad (64)$$

La anterior ecuación es resultado de la Ecuación 11 y usando los valores obtenidos se obtiene el siguiente resultado:

$$Re = \frac{4(1333.33cm^3/s)*1g/cm^3}{3.141592*3,81cm*0.01kg/cm s} = 44557.86 \quad (65)$$

Este número indica que es turbulento. De igual manera en el caso del sistema de calentamiento de la alberca de acuerdo con los datos técnicos de bombeo se tiene un caudal máximo de 1100 litros por minuto y un diámetro máximo de 4” diámetro por lo que de igual manera se unifican unidades y se sustituyen valores para obtener como resultado:

$$Re = \frac{4(18333.33cm^3/s)*1g/cm^3}{3.141592*10cm*0.01g/cm s} = 233427.29 \quad (66)$$

Lo que indica de igual manera un flujo turbulento. Debido a las variaciones en los diámetros de las tuberías se debe considerar que este número corresponde a la salida de los equipos de bombeo.

Para continuar con el análisis de campo se usara la Ecuación 18 que dará el flujo:

$$V = \frac{(44557.86)*(0.000001m^2/s)}{0.044m} = 0.101267 m/s \quad (67)$$

Que es la velocidad correspondiente al sistema de calentamiento de regaderas. En el caso de los tapetes de membrana de alto flujo se tiene un diámetro de trabajo por equipo de 3.81 cm lo que dará como resultado:

$$V = \frac{(233427.29) * (0.000001 \text{ m}^2/\text{s})}{0.0381 \text{ m}} = 6.1267 \text{ m/s} \quad (68)$$

Para estos resultados se debe considerar que el fluido se divide y por tanto no todo el caudal se considera que atravesara solo por un equipo por tanto debe dividirse entre los equipos instalados, considerando entradas y salidas existentes en paralelo mas no en serie, por lo que observando los planos Figura 44 se observa que son 6 divisiones por tanto en el caso del sistema de regaderas será dividido así:

$$0.101267 \text{ m/s} / 6 = 0.01687 \text{ m/s}, \quad (69)$$

Se menciona que esta velocidad es la promedio aproximada ya que existirá una variación dependiendo de la altura, accesorios y trayectorias de las tuberías.

Usando la Ecuación 24 para determinar el número de Nusselt se tiene que para el sistema de regaderas

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^n = 0.023 * 44557.86^{0.8} * 7^{0.4} = 262.36 \quad (70)$$

Después de esto se usara en la Ecuación 21 para determinar el coeficiente de transferencia por convección

$$hc = \frac{Nuk}{Dh} = (262.36) * \frac{(0.56 \text{ W})}{0.044 \text{ m}} = 3339.19 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (71)$$

Teniendo esta consideración se usara la Ecuación 16

$$q = h\Delta T \quad (16)$$

de donde se despejara la diferencial de temperatura que será

$$\Delta T = \frac{q}{h} = \frac{7250 \text{ w/m}^2}{\frac{3339.19 \text{ W}}{\text{m}^2}\text{K}} = 2.17 \text{ K} \quad (72)$$

Lo cual indica el diferencial de temperatura que se tendrá en el interior de un fluido con las condiciones dadas. Por lo tanto esto sirve para realizar la comparación de eficiencia del sistema por lo que se va a considerar que el calor absorbido de acuerdo a nuestro modelado que maneja un caudal de $0.0013 \text{ m}^3/\text{s}$ para sacar el número de Reynolds con este caudal

$$Re = \frac{4(1300)*1}{3.141592*4.4*0.01} = 37618.46 \quad (73)$$

Después de esto se obtiene el número de Nulsent

$$Nu = 0.023Re^{0.8}Pr^n = 0.023 * 37618.46^{0.8} * 7^{0.4} = 229.13 \quad (74)$$

Por lo consiguiente

$$hc = \frac{Nuk}{Dh} = (229.13) * \frac{\left(\frac{0.56W}{mK}\right)}{0.044m} = 2916.23W/m^2K \quad (75)$$

El calor es por tanto igual a

$$q = h\Delta T = 2916.23(2.17K) = 6328.21W/m^2 \quad (76)$$

De acuerdo con esta condición el calor perdido será

$$7250 w/m^2 - 6328 w/m^2 = 922 w/m^2 \quad (77)$$

Por tanto la energía útil del colector es de 6328 w/m² la cual debe multiplicarse por el área del colector, considerando el área unitaria de 1 m² se obtendrá de acuerdo a la Ecuación 25 y 26

$$\eta = \frac{Q_{util}}{Ac*G} = \frac{6.328}{7.25} = 0.87 \quad (78)$$

Donde Ac es el área considerada unitaria, y G es la radiación promedio incidente, sin embargo esto aplica para las condiciones de verano, y el valor promedio de radiación.

Llegando a las condiciones de 70°C dentro del tanque de almacenamiento, y en invierno las condiciones son distintas llegando solo a 55°C por lo que es necesario usar calderas para llegar a la temperatura requerida por tanto se debe ajustar este factor a nuestra ponderación de eficiencia donde llegar a 70°C se entiende que se tiene una caída de temperatura que de acuerdo con la modelación debe ser de 90°C por lo que se le aplicara este factor como perdida energética debida a las condiciones del sistema, extrapolando 100 es a 90 como 70 es 63, que por tanto en verano la eficiencia del sistema será de 55%, y en invierno realizando la misma extrapolación en invierno será de 43%, como se observa en la Figura 26:

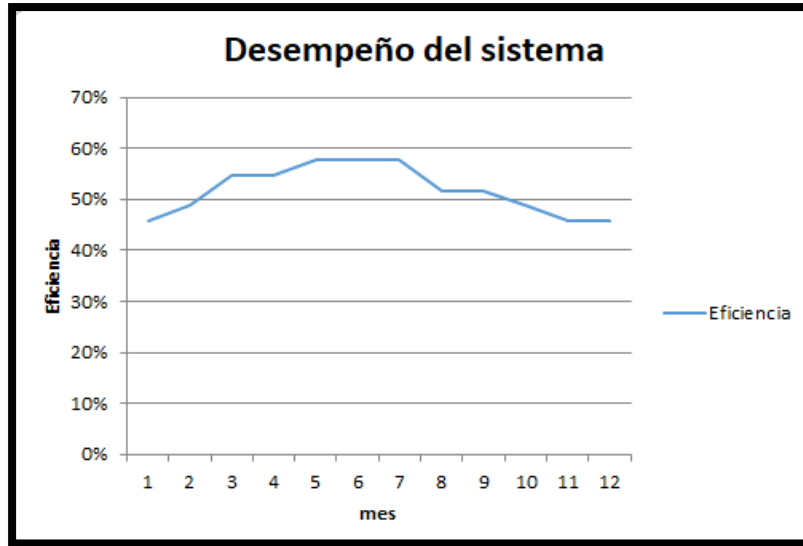


Figura 26. Eficiencia del sistema térmico en regaderas. Fuente elaboración propia, 2020.

con las modificaciones propuestas en el plano Figura 49 de acuerdo con los datos de Matlab Simulink se alcanzara el 62% de eficiencia en verano y en invierno de 47%, como comentario referente al sistema de calentamiento se denota que cumpliendo la eficiencia del 50% se tendría un ahorro sustancial de consumo de energía fósil, lo que se plantea en el análisis financiero, sin embargo esta eficiencia se puede aumentar si se realizan los mantenimientos adecuados, aislamiento de tuberías de agua caliente, colocación de reflejantes cóncavos en los equipos, la parte de la inclinación de los equipos de igual manera ayudara, además de ir considerando un sistema de control que ayude a monitorear condiciones de los equipos en tiempo real para mejorar el bombeo de agua del sistema.

La siguiente tabla muestra los valores de eficiencia energética así como la pérdida que presenta el sistema.

Tabla 10. Eficiencia del sistema de regaderas

Temperatura ideal °C	Temperatura máxima por mes	Eficiencia η	% perdida	Eficiencia	Mes
70	75	0.87	53%	46%	1
70	80	0.87	56%	49%	2
70	90	0.87	63%	55%	3
70	90	0.87	63%	55%	4
70	95	0.87	67%	58%	5
70	95	0.87	67%	58%	6
70	95	0.87	67%	58%	7
70	85	0.87	60%	52%	8
70	85	0.87	60%	52%	9
70	80	0.87	56%	49%	10
70	75	0.87	53%	46%	11
70	75	0.87	53%	46%	12

En la parte del sistema de calentamiento de la alberca se observa en el plano del anexo Figura 43 son 16 divisiones por lo que la velocidad final será de $6.1267 \text{ m/s} / 16 = 0.382918 \text{ m/s}$ se menciona que esta velocidad es la promedio aproximada ya que existirá una variación dependiendo de la altura, accesorios y trayectorias de las tuberías.

Usando la Ecuación 24 para determinar el número de Nusselt se tiene que para el sistema de regaderas

$$Nu = 0.023Re^{0.8}Pr^n = 0.023 * 233427.29^{0.8} * 7^{0.4} = 986.93 \quad (79)$$

Posteriormente de esto se usara en la ecuación 19 para determinar el coeficiente de transferencia por convección

$$hc = \frac{Nuk}{Dh} = (986.93) * \frac{\left(\frac{0.56 \text{ W}}{\text{mK}}\right)}{0.1 \text{ m}} = 5526.83 \text{ W/m}^2\text{K}, \quad (80)$$

teniendo esta consideración se usara la Ecuación 16

$$q = h\Delta T \quad (16)$$

De donde se despejara la diferencial de temperatura que será

$$\Delta T = \frac{q}{h} = \frac{7.25 \text{ kw} / \text{m}^2}{\frac{5526.83 \text{ w}}{\text{m}^2 \text{ K}}} = 1.31 \text{ K} \quad (81)$$

lo cual indica el diferencial de temperatura que se tendrá en el interior de un fluido con las condiciones dadas. Por lo tanto con esto sirve para realizar la comparación de eficiencia del sistema por lo que se va a considerar que el calor absorbido será de acuerdo al modelado que maneja un caudal de $0.018 \text{ m}^3/\text{s}$ para sacar el número de Reynolds con este caudal

$$Re = \frac{4(18000) * 1}{3.141592 * 10 * 0.01} = 229,183.165 \quad (82)$$

después de esto se obtiene el número de Nusselt

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^n = 0.023 * 229183.165^{0.8} * 7^{0.4} = 972.55, \quad (83)$$

por lo consiguiente

$$hc = \frac{Nuk}{Dh} = (972.55) * \frac{\left(\frac{0.56 \text{ W}}{\text{mK}}\right)}{0.1 \text{ m}} = 5446.29 \text{ W}/\text{m}^2 \text{ K} \quad (84)$$

el calor es por tanto igual a

$$q = h\Delta T = 5446.29(1.31 \text{ K}) = 7134.63 \text{ W}/\text{m}^2 \quad (85)$$

De acuerdo con esta condición el calor perdido será

$$7250 \text{ w}/\text{m}^2 - 7134 \text{ w}/\text{m}^2 = 115 \text{ w}/\text{m}^2 \quad (86)$$

por tanto la energía útil del colector es de $7134 \text{ w}/\text{m}^2$ la cual debe multiplicarse por el área del colector, lo cual es 3 m de longitud por 1.3 m de ancho para cada tapete si en total son 167 tapetes por lo que el calor teórico será:

$$(651.3 \text{ m}^2) * (7134 \text{ w}/\text{m}^2) = 4,646,374.2 \text{ w}, \quad (87)$$

para el estudio de eficiencia se considera al área unitaria de 1 m^2 por lo que se obtendrá de acuerdo a la Ecuación 41 y 42

$$\eta = \frac{Q_{util}}{Ac * G} = \frac{7.134}{7.25} = 0.98 \quad (88)$$

Donde A_c es el área considerada unitaria, y G es la radiación promedio incidente, Sin embargo las condiciones de la alberca en cuanto a temperatura es de 25°C , y en invierno las condiciones son distintas por lo que es necesario usar calderas para llegar a la temperatura requerida por tanto se debe ajustar este factor a nuestra ponderación de eficiencia donde llegar a 25°C se entiende que se tiene una caída de temperatura que de acuerdo con nuestra modelación debe ser de 70°C por lo que se le aplicara este factor como perdida energética debida a las condiciones del sistema, extrapolando 100 es a 70 como 28 es 19, que por tanto en verano la eficiencia del sistema será de 19%, y en invierno realizando la misma extrapolación en invierno será de 10%, con las modificaciones propuestas en el plano de acuerdo con los datos de Matlab Simulink se alcanzara el 22% de eficiencia en verano y en invierno de 14%, como se grafica en la Figura 27 basado en datos promedios.

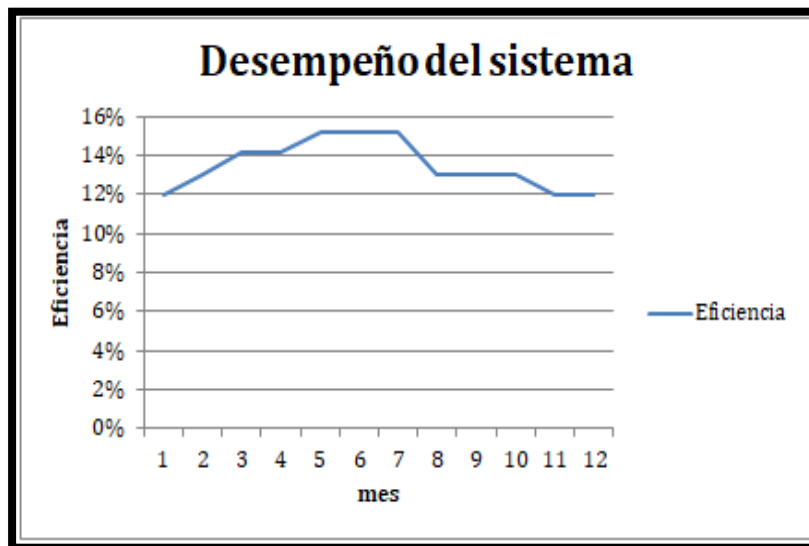


Figura 27 Eficiencia del sistema de calentamiento de alberca. Fuente elaboración propia, 2020.

como comentario referente al sistema de calentamiento debido al alto volumen de agua complica el ahorro sustancial de consumo de energía fósil, sin embargo esta eficiencia se puede aumentar si se realizan los mantenimientos adecuados, aislamiento de tuberías de agua caliente, considerando la inclinación de los equipos, también considerando un sistema de control que ayude a monitorear condiciones de los equipos en tiempo real para mejorar la transferencia energética a través del sistema de bombeo.

En la tabla siguiente se muestran los valores correspondientes al desempeño del sistema de la alberca.

Tabla 11. Eficiencia del sistema de calentamiento de alberca.

Temperatura ideal °C	Temperatura máxima por mes	Eficiencia η	% pérdida	Eficiencia	Mes
25	55	0.98	14%	13%	1
25	60	0.98	15%	15%	2
25	65	0.98	16%	16%	3
25	65	0.98	16%	16%	4
25	70	0.98	18%	17%	5
25	70	0.98	18%	17%	6
25	70	0.98	18%	17%	7
25	60	0.98	15%	15%	8
25	60	0.98	15%	15%	9
25	60	0.98	15%	15%	10
25	55	0.98	14%	13%	11
25	55	0.98	14%	13%	12

Debido al mantenimiento y el tiempo de operación algunos equipos presentan cierto deterioro y recientemente se les había dado mantenimiento, por lo que se pudieron obtener mediciones al interior del equipo, como lo se observa en la Figura 28 la temperatura llega a los 84 °C sin embargo esta medición se realizó al medio día con el equipo fuera de operación esto es que no había flujo. Por lo que en el software Comsol se realizó la simulación de esta parte variando las dimensiones y temperaturas y se observó que el comportamiento térmico llegaba a un equilibrio de temperatura demostrando que la operación de los equipos solares de tubo de vacío son eficientes. Comsol como se observa en la Figura 28 lo que ayuda a simular una parte del sistema y ver cómo se comporta de acuerdo a las condiciones de campo revisadas, es una herramienta que ayuda para verificar que las temperaturas de nuestra modelación en Matlab Simulink son correspondientes y por tanto se acerca mucho a la realidad.



Figura 28. Mediciones de campo en equipos de calentamiento solar. Fuente propia 2020.

III.4 Estudio de campo y simulaciones en Matlab y Comsol

A continuación se resume como se realizó el análisis de equilibrio energético en el sistema de regaderas considerando que el sistema tiene una interacción con la energía fósil y la energía solar se propuso un sistema cerrado que interactúa con el tanque de almacenamiento térmico de 6000 litros en el cual entraran y saldrán flujos energéticos lo que implica que debe existir un equilibrio energético por tanto se tiene dos entradas distintas definidas por las entalpías que resultan en el balance final de energía como lo expresa la ecuación 89. (Bird, et al, 1992:15.24)

$$H1(t) + H2(t) - H3(t) = \frac{\partial U}{\partial t} \quad (89)$$

Donde la entalpia se define por el producto de la densidad, calor específico temperatura y flujo, donde los dos últimos están determinados por el tiempo, y serán igual a la energía total del sistema como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\rho C_p T1(t) Q1(t) + \rho C_p T2(t) Q2(t) - \rho C_p T3(t) Q3(t) = \rho V C_v \frac{\partial T3(t)}{\partial t} \quad (90)$$

Esto sucede hasta el momento en el que el sistema se comporta de manera cerrada sin embargo en el momento que las regaderas se abren existirá un ingreso volumétrico de agua fría entrando al sistema para esta situación se deberá considerar debido a que la masa volumétrica de nuestro tanque el cual no varía y por tanto este flujo será otra entrada de entropía quedándonos la siguiente ecuación.

$$\rho C_p T1(t) Q1(t) + \rho C_p T2(t) Q2(t) + \rho C_p T4(t) Q4(t) - \rho C_p T3(t) Q3(t) = \rho V C_v \frac{\partial T3(t)}{\partial t} \quad (91)$$

Donde el flujo másico 4 interactúa con el balance final de nuestra Ecuación 40 de la misma manera que se consideró en la primera parte ya que el flujo de entrada será igual al flujo de salida en un volumen constante, donde en el volumen de control en nuestro tanque horizontal no varía.

Las constantes consideradas para este estudio serán la densidad del agua de 1000kg/m^3 $C_p= 4.2\text{kJ/kg K}$ el $Q_1=0.0013\text{ m}^3/\text{s}$ flujo del sistema solar, $Q_2=0.0023\text{m}^3/\text{s}$ que es el flujo del sistema fósil, $Q_4=0.000495\text{ m}^3/\text{s}$ el flujo de agua hacia regaderas, $C_v=4.1\text{kJ/kg K}$ $V=6\text{m}^3$ y las condiciones de operación del sistema solar T_1 inicia en 25°C hasta 90°C , T_2 de igual forma inicia en 25°C y llega hasta 90°C $T_3= 70^\circ\text{C}$ es la condición ideal, y $T_4=20^\circ\text{C}$ que es la entrada de agua fría al sistema. Como se observa en la Figura 29 donde se denota que existirá un equilibrio energético debido a los flujos de entrada con los flujos de salida.

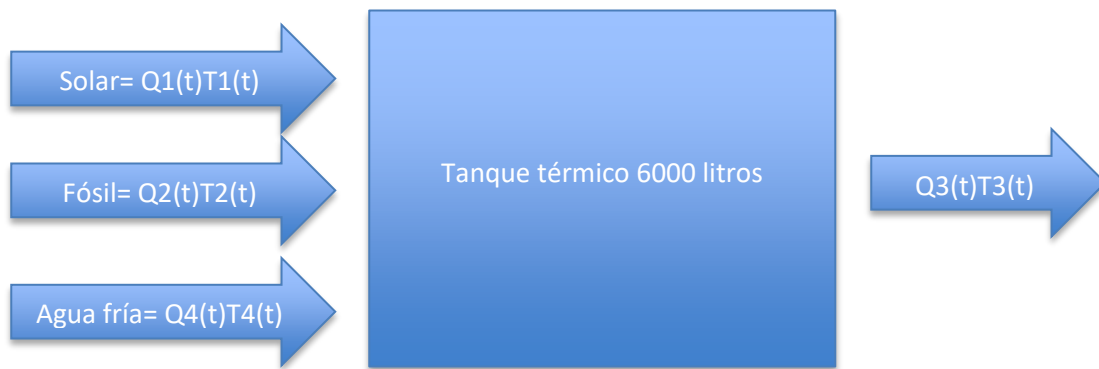


Figura 29 Diagrama de equilibrio energético del sistema de calentamiento de la alberca.

De esta manera se realizó en Matlab Simulink (Figura 30) la simulación donde se utilizaron valores de campo los cuales se ven en la Tabla 12 donde se lograron realizar mediciones de en fechas de mes de julio cielo abierto, considerando que de acuerdo con el estudio previo de localización estas fechas son las más calurosas. En los softwares tanto como Matlab Simulink y Comsol puedes variar los valores de entrada respecto a la tabla 12 para observar el comportamiento del sistema lo que fue muy útil para usar datos obtenidos de campo y comparar resultados, lo que ayudo a corroborar el uso de energías fósiles que necesariamente en tiempos de frio se deben usar en el sistema actual.

Tabla 12. Mediciones promedio mes de julio Fuente elaboración propia.

temperaturas en tubos de vacio				
horas	horario	temp. interna	temp. externa	temp. ambiente
1	7	35	22	22
2	8	36	22	23
3	9	40	30	27
4	10	33	32	28
5	11	80	33	29
6	12	120	34	30
7	13	120	34	30
8	14	110	35	30
9	15	100	35	28
10	16	90	35	28
11	17	80	35	27
12	18	60	32	26
13	19	40	30	25

Las mediciones de la Tabla 12 fueron promediadas de una muestra de 15 días a cielo abierto, en la localización de los equipos, con esta información así como el flujo debido al equipo de bombeo que da 4.68 m³ /hora se habla de 1.28 horas para recircular los 6 metros cúbicos del agua del tanque de calentamiento, esto sugiere que el caudal máximo está cumpliendo con el recirculado del agua y una vez que este a la temperatura adecuada puede recircularse. Esta simulación permitió ver el comportamiento energético así como el comportamiento de igual manera brinda una idea de cómo interactúan las variables principalmente de flujo y temperatura.

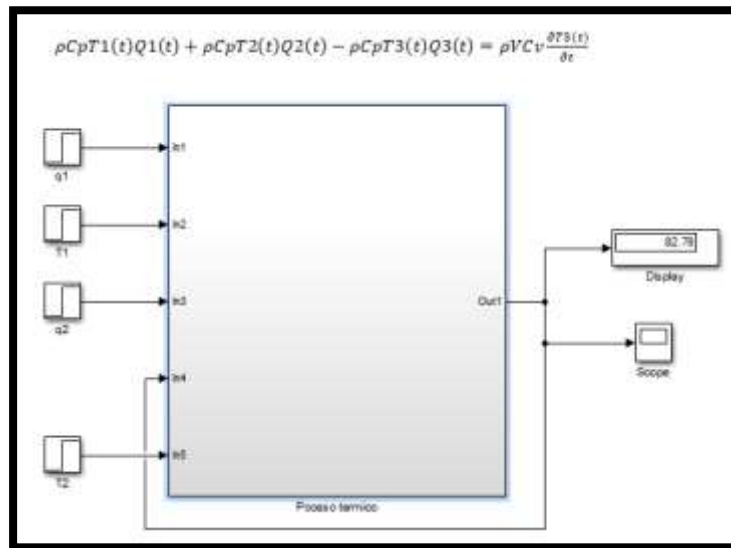


Figura 30. Simulación del sistema de regaderas. Fuente de elaboración propia 2020.

Para lograr los resultados esperados de la temperatura de 71 grados Celsius se necesitó una temperatura de 90°C por tanto el sistema en verano si es capaz de alcanzar estas variables pero en invierno debido a que la temperatura baja no se logra el objetivo, esto se verifico en base a el conocimiento de campo del personal técnico de mantenimiento, por lo que en estas fechas se requiere el uso de energías fósiles, de acuerdo con la toma de mediciones de campo la temperatura inicial del sistema es de 20°C lo que indica que la cantidad de agua usada es mayor a la almacenada, este comportamiento en un sistema solar convencional denotaría que no cumple con la capacidad suficiente para la cantidad de usuarios, ya que donde se almacena agua al inicio debe tener una temperatura inicial almacenada mayor que permita tener agua caliente hasta las 10 horas que por lo regular a esa hora del día el sol irradia lo necesario para incrementar la temperatura y mantener las condiciones adecuadas en los equipos, lo que permitiría incrementar la temperatura, adicional un sistema convencional solar de almacenamiento puede iniciar en una temperatura más alta como se puede observar en la Figura 31 el volumen total es de 6m³ y la temperatura inicial se enmarca en los 20 °C que bien es posible iniciar en los 30 a 40 °C, aun así y debido a la alta demanda de usuarios enmarcada en el marco de antecedentes, se requiere el uso de energía fósil, que como en la parte de análisis financiero da un margen de costos y de igual manera una fuente de contaminante hacia la atmosfera.

En la siguiente parte de la simulación se requiere anexar al estudio el consumo de agua caliente considerando el funcionamiento de 22 regaderas en el lado de los hombres y 11 en el lado de mujeres, teniendo en cuenta una apertura de 75% en cada válvula donde el diámetro de salida es de 13mm.

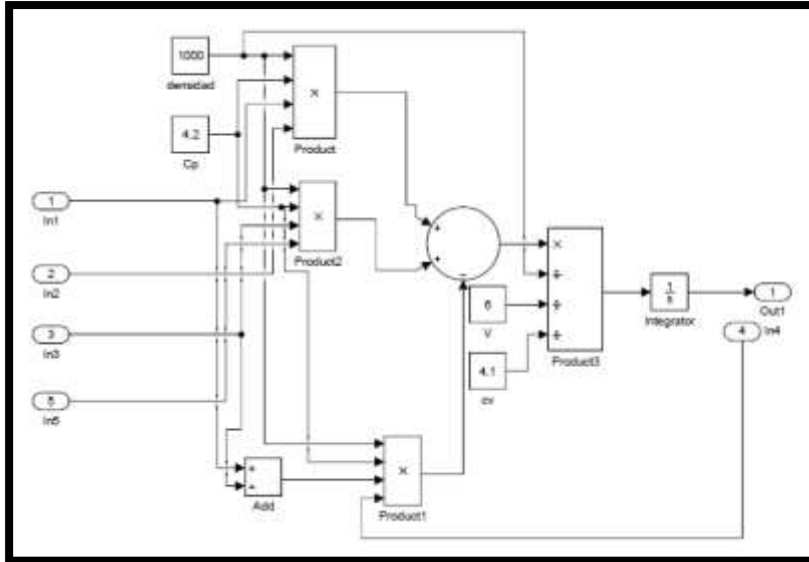


Figura 31. Simulación del sistema de regaderas. Fuente de elaboración propia 2020.

El consumo de agua en las regaderas es una variable que de igual forma debe tomarse como valor promedio para lo cual se consideró un volumen basado en 30 litros por cada usuario de lo cual el uso de agua caliente no será el 100% (donde el 75% es 22.5L), considerando un tiempo de mínimo 20 minutos y un máximo de 30 minutos, que en promedio será de 25 minutos, por lo que se asevera de manera teórica $22.5L/25min=0.9L/min$ esto será multiplicado por las 33 regaderas por tanto el consumo máximo será de 29.7 L/min para este análisis se va a convertir a metros cúbicos por segundo esto será $0.00495 m^3 /s$ ($17.82m^3/h$), este volumen será considerado para la entalpia 4, como se puede ver es mucho el consumo de agua y casi triplica el almacenamiento. Considerando la temperatura inicial de $20^{\circ}C$ por lo que la simulación se verá afectada como se observa en la Figura 31. Donde se puede ver que se obtiene una temperatura final de $74^{\circ}C$ lo que indica que en condiciones idóneas este será el resultado sin embargo para dejar de usar combustibles fósiles es necesario aumentar temperatura y flujo en el tiempo adecuado lo que en primera instancia también indica un aumento de equipos, en conjunto de un buen control que permitirá provocar un buen intercambio calórico más adelante se plantea como realizar las modificaciones que permitirían una mejora al sistema en los anexos Figuras 45-48 se puede observar algunas modificaciones que permitirán aumentar la eficiencia.

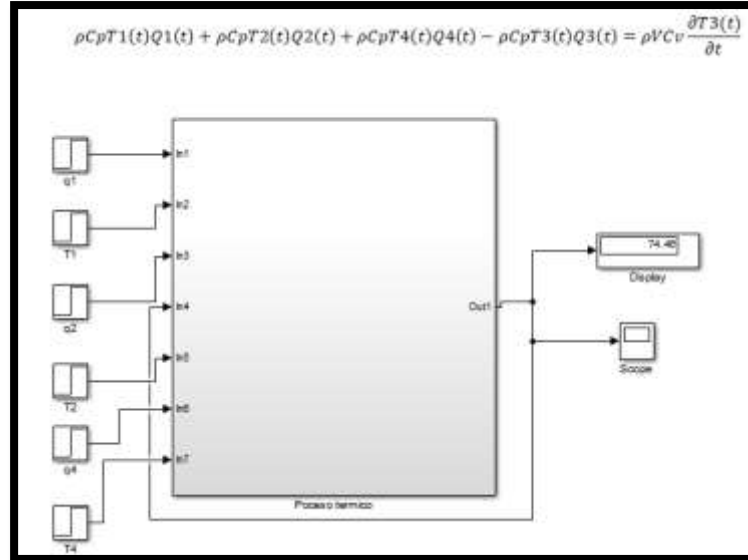


Figura 32. Balance energético en operación máxima. Fuente propia 2020.

Las consideraciones usadas son con equipos funcionando al 100%, se debe prestar atención a las fluctuaciones derivadas de factores como las climáticas, consumo de usuarios entre otras, dando valores que varían con el tiempo. Por lo que los valores que hacen tener el equilibrio deseado serán los valores mínimos que debe tener el sistema.

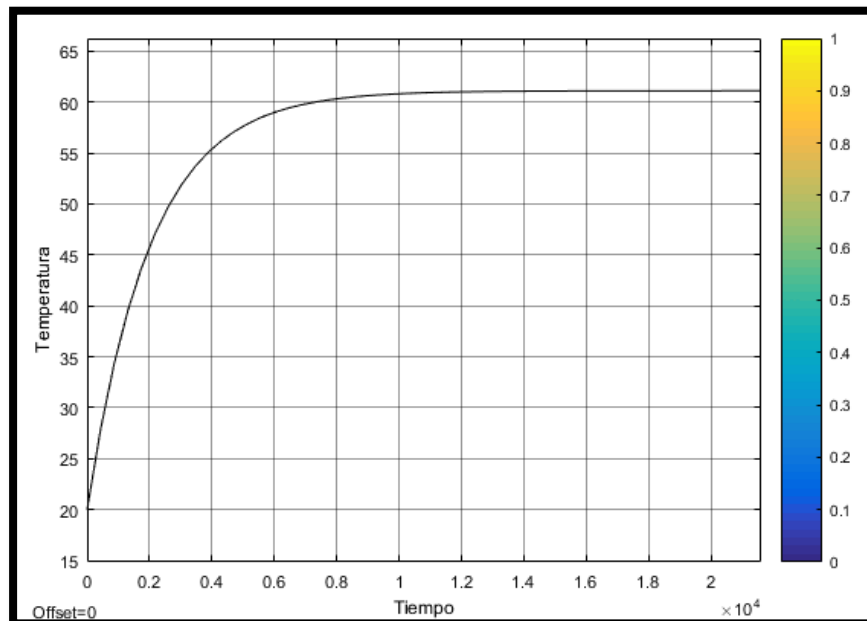


Figura 33. Grafica de simulación Matlab Simulink sistema de regaderas. Fuente elaboración propia 2020.

Para este análisis por parte de Comsol Figura 28 se planteó el análisis de transferencia térmica de manera anular de la parte final de transferencia que básicamente es un tubo de cobre que a manera de intercambiador lo que indica cual es el comportamiento de transferencia térmica, esto con el objetivo de corroborar los resultados de la simulación de Matlab. Los resultados fueron coherentes por lo que se considera que este estudio arroja datos cercanos a la realidad.

Para el sistema de calefacción de la alberca se va a considerar el balance de energía Figura 33 de la manera siguiente: se tienen dos entradas de energía definidas como la solar y fósil, definidas en el tiempo donde se dice que entra un flujo 1 a temperatura 1 de igual manera la dos y la suma será la salida 3 del sistema. Por tanto nuestro balance de energía se define por el balance de entalpías como en la Ecuación 89. Donde la entalpía se define por el producto de la densidad, calor específico temperatura y flujo, donde los dos últimos están determinados por el tiempo, y serán igual a la energía total del sistema como se muestra en la Ecuación 90, donde se puede observar que los sistemas en realidad tienen un comportamiento muy similar.

Las constantes consideradas para este análisis del sistema de calentamiento de la alberca serán la densidad del agua que es 1000kg/m^3 $C_p= 4.2\text{kJ/kg K}$ $Q_1=0.009\text{m}^3/\text{s}$ $Q_2=0.009\text{m}^3/\text{s}$ $Q_3=0.018\text{m}^3/\text{s}$ $C_v=4.1\text{kJ/kg K}$ $V=3850\text{m}^3$. Para el estudio las condiciones iniciales son $T_1=45^\circ\text{C}$ $T_2=45^\circ\text{C}$ y $T_3=25^\circ\text{C}$ las condiciones de operación se dan por estas tres últimas temperaturas, considerando que hay momentos en los que el flujo total de entrada será suministrado totalmente por el lado solar o lado caldera, como se observa en la Figura 34 por tanto en la Ecuación 90 una de las partes de la ecuación será cero cuando esto suceda, dará como resultado el equilibrio energético que será igual a la condición final del sistema, por tanto llevando la ecuación a Matlab Simulink se encontró que a una temperatura inicial de 20°C durante 8 horas con el flujo Q_3 se requiere un temperatura promedio de 60°C proveniente ya sea de los tapetes de membrana de alto flujo o la caldera. Cumpliendo esto se logra la temperatura deseada, sin embargo este sistema tiene muchas pérdidas energéticas debido a sus características, ya que está expuesta a cielo abierto, no cuenta con aislamiento de tuberías y los tapetes también expuestos a ambientes externos no se encuentran aislados a flujos de aire o lluvia que por tanto disminuyen la eficacia del sistema.

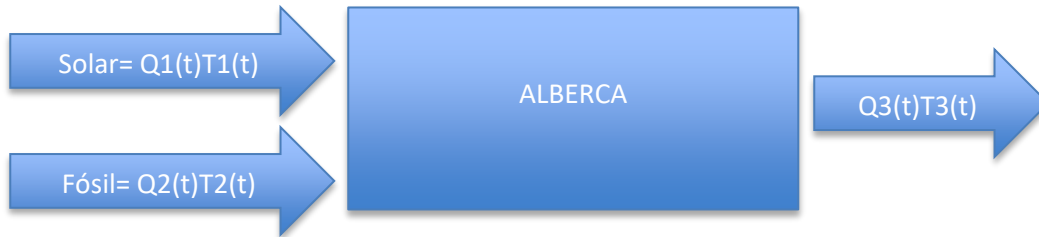


Figura 34. Diagrama de equilibrio energético del sistema de calentamiento de la alberca.

Para realizar el modelado en Matlab se introdujo la información de temperaturas, sin embargo considerando que las temperaturas más adecuadas se presentan en el lapso de 8 horas que de acuerdo con la Tabla 13 la energía solar se empieza a aprovechar a partir de las 9 de la mañana hasta las 4 pm esto fluctuando en el rango de una hora, ya que depende de la estación del año.

Tabla 13. Temperaturas en tapetes de membrana de alto flujo en operación. Fuente propia 2020

temperaturas en tapetes de membrana de alto flujo			
horas	horario	Temp. interna	Temp. externa
1	7	22	18
2	8	30	22
3	9	35	36
4	10	45	43
5	11	47	50
6	12	56	65
7	13	61	65
8	14	65	65
9	15	66	65
10	16	59	63
11	17	55	60
12	18	45	50
13	19	40	44

Se logró observar en la Figura 35 que en el mes de mayo y junio el sistema responde de manera adecuada de acuerdo con la simulación en conjunto de datos de campo ya que en un tiempo menor se logra llegar a la temperatura deseada, sin embargo para lograr que en los meses más fríos se logre estos objetivos de temperatura se debe considerar un sistema que permita aumentar el flujo energético del sistema, donde los tapetes de membrana de alto flujo deben aumentar su desempeño, pero como se ha estudiado los equipos que usan tubos de vacío son más eficientes, se debe considerar

el control de estos equipos por sistemas automáticos o manuales que permitan maximizar el flujo de energía a donde más se requiera.

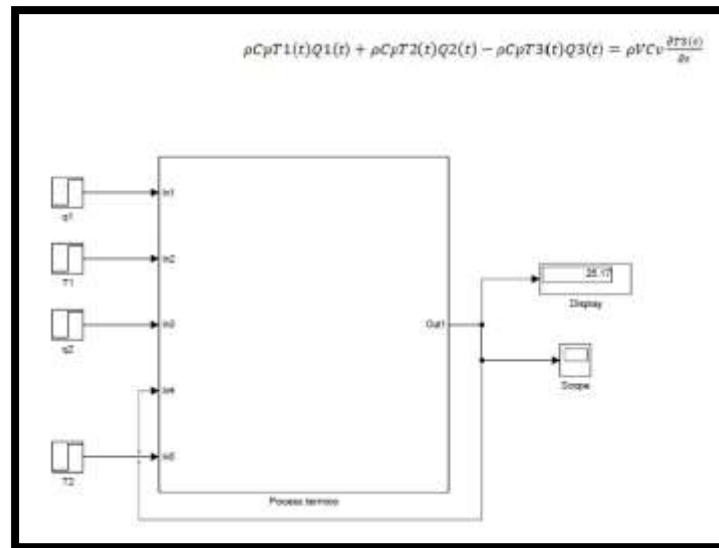


Figura 35. Resultado en Simulink Matlab. Fuente elaboración propia 2020

Como se observa en la Figura 36 el volumen de la alberca lo define y el flujo también es relevante, sin embargo los tapetes de membrana de alto flujo se ven afectados de gran manera por factores ambientales ya que carecen de un aislamiento externo por lo que factores como el viento, sombras, temperatura ambiental afectan su desempeño.

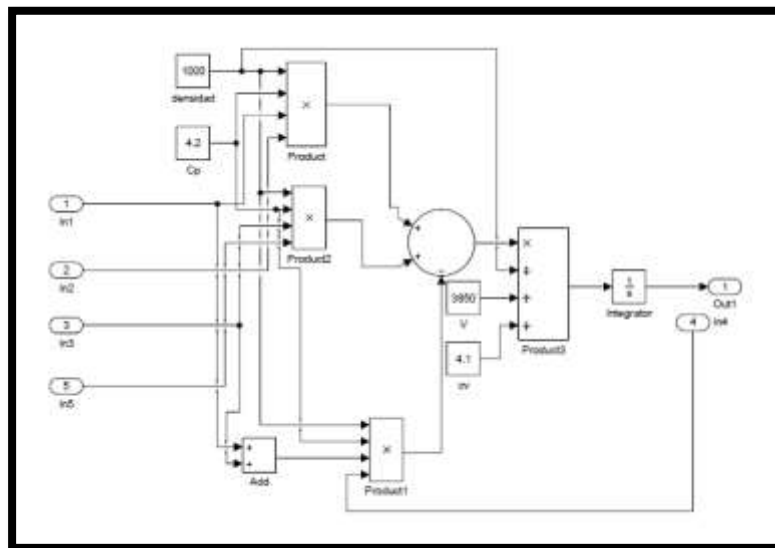


Figura 36. Simulación en Matlab Simulink. Fuente: Elaboración propia 2020.

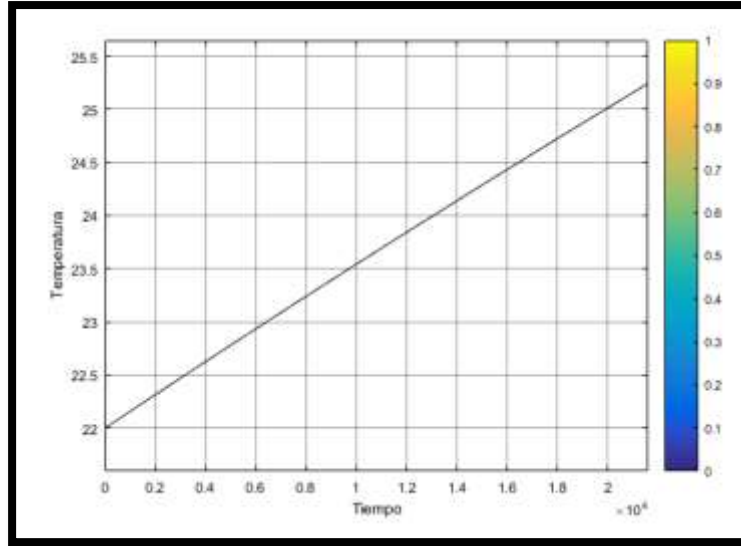


Figura 37. Grafica de simulación Matlab Simulink sistema de alberca. Fuente elaboración propia 2020.

A través de Comsol se realizó un análisis del diseño de estos tapetes que pueden ser similares a un calentador solar plano por lo que su eficiencia máxima se dará al medio día, o cuando el sol se encuentre perpendicular a los equipos sin embargo parte del sistema no se encuentra direccionado respecto al sol como se puede ver en el plano Figura 43 en los anexos.

III.5 Análisis de campo.

Para este análisis de campo se realizaron visitas a las instalaciones de acuerdo a un plan diario, Tabla 14 donde se tomaron mediciones de temperatura a diferentes horas del día, en los equipos de calentamiento, tanto en tuberías como equipos. Como se muestra en el cronograma de actividades se realizó levantamiento de trayectorias y diámetros, debido a esto se pudo intuir áreas de oportunidad respecto a las instalaciones actuales.

Tabla 14. Programa de visitas de campo. Fuente elaboración propia 2020.

Horario para visitas a las instalaciones de la UPAEP						
fecha de inicio 15-jul-2020						
horario	lunes	martes	miércoles	jueves	viernes	sábado
9:00-11:00			Toma de temperaturas en equipos, de acuerdo a un mapeo.			Determinación de flujo en equipos.

11:00-13:00				Toma de temperaturas en equipos, de acuerdo a un mapeo.		
13:00-15:00					Toma de temperaturas en equipos, de acuerdo a un mapeo.	
15:00-17:00						
horario	lunes	martes	miércoles	jueves	viernes	sábado
9:00-11:00		Levantamiento dimensional de equipos	Levantamiento dimensional de equipos	Levantamiento dimensional de equipos		
15:00-17:00	Toma de temperaturas en equipos, de acuerdo a un mapeo.					

Dentro de las observaciones principales se encontró los parámetros pico de temperatura en los equipos y tuberías, además se revisaron las trayectorias, dirección de flujo, con lo que se generó el plano en anexos Figura 43, durante el recorrido se encontró que el sistema de membrana de alto flujo tiene bastante tiempo de antigüedad, por tanto no llega a superar los 35°C en la superficie lo que indica que el flujo de agua está absorbiendo energía radiante sin embargo la superficie plana, permite pérdidas superficiales por condiciones de viento además de la inclinación que pocas veces coincide con la adecuada de 20° hacia el sur, adicional los rayos por tanto no caen paralelos a la superficie en un mayor porcentaje, lo que disminuye mucho su eficiencia,

Para nuestro tanque de 6000 litros a temperatura inicial de 20°C sabiendo que la Cp (calor específico) del agua es de 4179 J/Kg K por lo que los Joules necesarios para elevar un grado kelvin serán

$$4179 \times 6000 = 25074000 \text{ J/K} \tag{92}$$

y por tanto si la temperatura deseada es de 70 °C se tiene que la diferencia será 70-20= 50 por tanto los joules necesarios para elevar la temperatura de 20° a 70° será:

$$50 \times 25074000 = 1,253,700,000 \text{ J} \quad (93)$$

Considerando que cada Joule es igual a 0.238902957 Calorías, entonces se requieren 299,512,628.415 calorías por lo que si una caloría es igual a 0.000001163 kilovatios por hora tendremos 348.33 kwh si lo contrastamos con los kilowatts teóricos 1104.9 kwh que son el promedio se puede observar que la energía teórica triplica a la necesaria para cumplir con las necesidades del sistema, sin embargo el consumo es la variable que afecta más a este sistema lo que provoca la eficiencia actual del sistema. Los datos teóricos que se consideraron al inicio para llegar a la temperatura de 70°C se usó un flujo en el rango situado en el régimen de turbulento con velocidades de $V = 0.08510 \text{ m/s}$, sin embargo de acuerdo con los datos técnicos el caudal ofrecido por la bomba Sentinel del sistema de calentamiento solar de regaderas es de $0.0013 \text{ m}^3/\text{s}$ y teniendo en cuenta el diámetro hidráulico por el cual fluye que es de 1.5" diámetro que en metros es un área de 0.00114 m^2 lo que arroja una velocidad de 1.14 m/s lo que sería $4.68 \text{ m}^3/\text{h}$ lo que indica que si son 6 m^3 totales el tiempo en el que debería recircular todo el volumen será $6/4.68 = 1.28$ horas esto indica el tiempo que se requiere para realizar este intercambio térmico que como se observó en la simulación en Matlab durante las 8 horas efectivas, de las cuales 5 horas son primordiales las más cercanas al medio día, por tanto se necesita considerar aumentar la capacidad de almacenamiento y el flujo para permitir el intercambio calórico adecuado para el tanque de almacenamiento.

La alberca cuenta con un sistema de bombeo de 7.5hp y maneja un caudal mínimo de 1100 litros por min, la temperatura de la alberca en condiciones normales esta en los 22°C para elevarla a 25°C se verá cuanto se requiere, si la capacidad total de la alberca es de $3,850 \text{ m}^3$ por lo tanto 3,850,000 litros sabiendo que la Cp (calor específico) del agua es de 4179 J/Kg K por lo que los Joules necesarios para elevar un grado kelvin serán:

$$4179 \times 3,850,000 = 16,054,500,000 \text{ J/K} \quad (94)$$

y por tanto si la temperatura deseada es de 25 °C se tiene que la diferencia será $25 - 22 = 3$ por tanto los joules necesarios son:

$$3 \times 16,054,500,000 = 48,163,500,000 \text{ J} \quad (95)$$

Considerando que cada Joule es igual a 0.238902957 calorías

entonces se requieren 11,506,402,569.4695 calorías por lo que si una caloría es igual a 0.000001163 kilovatios por hora tendremos 13,381.95 kwh si lo contrastamos con los kilowatts teóricos 4,646.3742 kwh esto indica que la energía necesaria para mover nuestro fluido a la condición requerida es tres veces más alta por lo cual se necesita triplicar el área utilizada para coleccionar energía con los tapetes de membrana de alto flujo, además de elevar el flujo ya que el tiempo de recirculación total será de

$$3,850.000\text{L}/1100\text{L}/\text{min}=3,500\text{min.} \quad (96)$$

Por tanto son 58.33 horas. Por lo que se requiere que la temperatura de entrada al sistema sea mayor para aumentar la transferencia térmica ya que a pesar que este sistema maneja un alto flujo no está logrando el objetivo deseado en temporada de frío principalmente, sin embargo debido a la forma de la alberca las pérdidas calóricas debido a las condiciones climáticas se acentúan más debido a que está expuesta al exterior debido a que no cuenta con un techo y en época de lluvias se requiere un mayor uso del sistema de calentamiento de calderas.

Como se vio en este capítulo se obtuvieron datos teóricos y prácticos, que se compararon y se sumaron al análisis para poder obtener una propuesta de mejora a través de los programas Matlab Simulink y Comsol, por lo que son herramientas que ayudan a conocer el comportamiento en base a las variables.

CAPÍTULO IV RESULTADOS

Este capítulo se discuten resultados teóricos y comparan con la parte práctica medible, además de dar a conocer las expectativas que se tenían al respecto de los programas Matlab Simulink y Comsol. Seguido de las recomendaciones finales del trabajo.

IV.1 Discusión de los resultados

La energía disponible del sol triplica las necesidades de consumo en el caso del sistema de regaderas sin en cambio el factor consumo es vital ya que de inicio no tiene la temperatura adecuada y este factor de almacenamiento de agua caliente también debe considerarse, en el caso de la alberca se requiere una mayor fuente de energía que requeriría un área mayor sin embargo la variable superficie no siempre puede ocuparse debido a la disponibilidad de área para la instalación de equipos, por lo que se deben usar equipos que permitan un mayor aprovechamiento del sol en una área menor, además otra variable es el flujo, por lo que es bueno diferenciar la cantidad necesaria de energía disponible para realizar un proceso será muy cercana a la energía (exergy) que se requiere en el caso de los sistemas de estudio para llegar a las temperaturas adecuadas, esto implica condiciones muy singulares y por tanto impredecibles. (Jafarkazemi, et al, 2016). Sin embargo a través del modelado se intenta llegar a las condiciones reales, por lo que solo se requiere la implementación de un sistema de control que ayude a minimizar las pérdidas energéticas, a través de la medición de temperaturas en tiempo real y mientras no exista tendrá que ser controlado a través de la experiencia del encargado en sitio del sistema.

En el caso del sistema de calentamiento térmico de la alberca se propone de acuerdo al plano Figura 48 donde se considera el aumento de equipos de manera híbrida de sistema de tubos de borosilicato de 20 tubos en total 20 equipos, además de la implementación de un intercambiador de calor el cual iniciara su operación cuando la temperatura del sistema sobrepase los 27°C ya que exceder este límite no sería adecuado para los usuarios. Para el análisis en Matlab se usara el aumento de temperatura debido al uso de estos equipos lo que incrementa la transferencia energética por lo que el tiempo de calentamiento disminuirá, la manera de demostrarlo es con la simulación de Matlab de equilibrio térmico. Donde se va a dividir los 1100 litros por hora de la bomba en 75% para los tapetes de

membrana y el resto para los tubos de borosilicato, por lo que la simulación tendrá tres componentes 2 provenientes de fuentes solares y una fósil. Por lo que se adecua la ecuación 40 con la cual de acuerdo con los datos de campo asociados a este modelo se obtuvo un resultado satisfactorio en invierno con una temperatura de 22 °C como temperatura inicial logrando elevar a la temperatura ideal de 25°C en un tiempo de 6 horas,

En el caso del sistema de regaderas se observa que es necesario el aumento de equipos de tubos de vacío, los cuales deben ser de 20 tubos que de acuerdo con la literatura son más eficientes, se propone la colocación a manera de sustitución, Figura 49 en anexos, ya que se aprovecha que los equipos ya presentan deterioro, para sustituir y colocar equipos de tubos de borosilicato de 20 tubos en total 21 equipos obteniendo las siguientes observaciones:

1. El sistema de calentamiento térmico se encuentra a 65 metros alejada de las regaderas por lo que se propone un tanque de almacenamiento vertical de 6000 litros que de igual manera tendrá su sistema de bombeo, pero situado en cercanías a las regaderas, esto aunado a que el consumo por cada 25 min aproximado es de 1000 litros refuerza la necesidad de aumentar el sistema de almacenamiento.
2. Es necesario sustituir algunos de los equipos y otros adecuarlos a 20° de inclinación ya que esta es la inclinación de acuerdo a nuestro estudio la más adecuada.
3. El sistema carece de aislamiento térmico en sus tuberías expuestas a intemperie, por tanto también es recomendable se aíslen.

De igual manera de acuerdo con el análisis realizado con Matlab Simulink se observó un mejor desempeño en el sistema debido al aumento de equipos considerando las variables de campo se pudo observar que el sistema es estable pero es necesario lograr que la temperatura inicial sea mayor a 20 grados para que exista un menor uso de combustibles fósiles, de igual manera al colocar el tanque de almacenamiento cerca de las regaderas proporcionara menos desperdicio de agua, ya que al inicio se tenían que vaciar los 65 metros de agua de las tuberías que se anteponen a el sistema.

Para concluir con el análisis de resultados se puede ver que para mejorar un sistema evaluado con la tecnología actual comercial se requiere el aumento de capacidad energética de los equipos, así como el almacenamiento, sin embargo se puede plantear un modelo que maneje la capacidad de calentamiento que basado en el flujo y temperatura con el fin de obtener el resultado esperado en

menor tiempo lo que ayudaría mucho en tiempo de frío, ya que el tiempo de exposición solar directa es menor, sin embargo este tipo de equipos no existe de manera comercial se tendría que fabricar a la medida de las necesidades, trayendo como consecuencias sistemas de fabricación especiales, o mucho ingenio para utilizar materiales que sean accesibles.

En resumen de acuerdo con la información obtenida de los datos de campo se logró simular a través de Matlab Simulink y de igual manera en Comsol por lo que se observó un comportamiento adecuado en la simulación computacional capaz de provocar resultados similares a las reales correspondientes al comportamiento del sistema, con estos datos se pudo realizar las observaciones correspondientes a la propuesta de mejora del sistema por lo que, se considera que si son herramientas que ayudan al análisis de sistemas térmicos solares, lo interesante es que el programa generado puede adaptarse para analizar otros sistemas, inclusive sistemas que aún se encuentran en planeación.

IV.2 Análisis financiero.

De inicio un sistema que incluye una alberca y regaderas, el cual requiere mantenimiento diario, lo que es suministro de químicos de mantenimiento sistema de filtrado, calderas, definitivamente provoca costos elevados, sin embargo el hecho de solo utilizar combustibles fósiles para el calentamiento de la alberca, y regaderas se propone el siguiente análisis. Teniendo en cuenta el valor de los equipos instalados en la tabla 13 se obtiene un análisis de costos.

Tabla 15. Costos de equipos principales.

Equipos	Costo
Calentador de agua modelo AFJ_2800-D	\$ 427,367.00
Calentador de alberca tapete de membrana de alto flujo	\$ 3,500.00
Calentador de agua modelo LC-150-C MASTERCLAS	\$ 63,167.00
Motor de 1/2hp 8.2amp. 1750	\$ 2,500.00
Bomba Sentinel T8 MS	\$ 12,000.00
Bomba centrifuga de 7 hp	\$ 17,000.00
calentador de agua de tubo de vacío	\$ 15,500.00

Considerando que los equipos que seguirán con el funcionamiento sin cambios, son los equipos de bombeo eléctrico, y solo considerando a las calderas como principal factor de cambio, en el caso del sistema de la alberca se cuenta con una calentador de agua, modelo AFJ-2800-D, para el cual como muestra la Figura 38 lleva los requisitos de instalación, indicados con los que actualmente se cuenta, sin embargo en la parte de mano de obra de instalación considerada en su momento no se obtuvo archivo que nos mencionara su costo, se usan costos del mercado actual para el análisis.

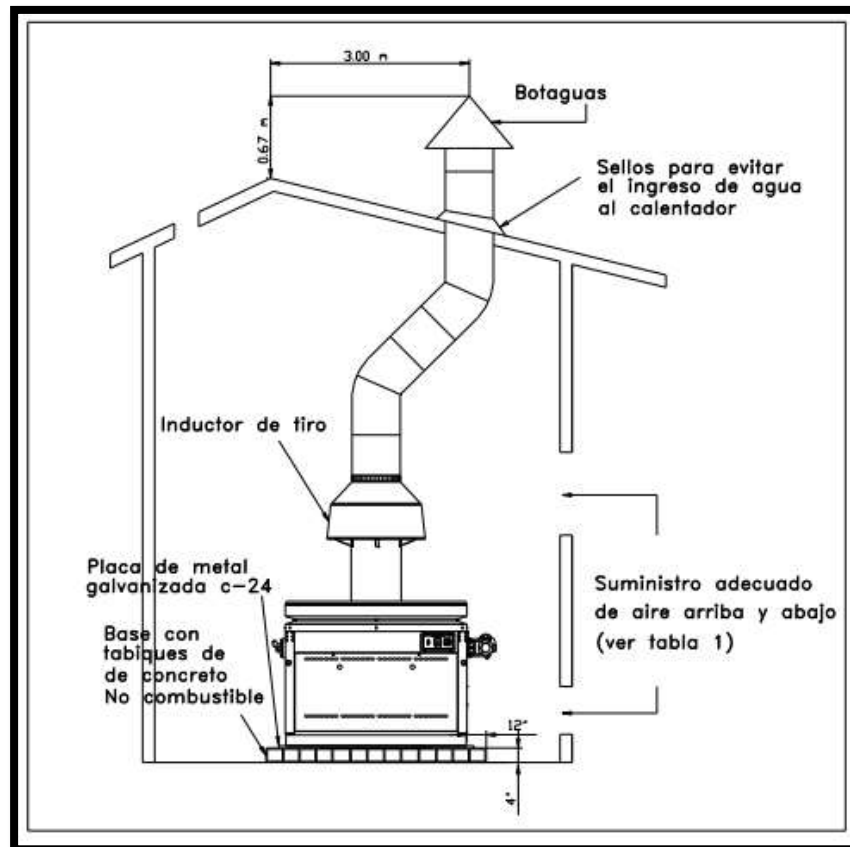


Figura 38. Arreglo de instalación de calentador de agua AFJ-2800-D.

Fuente: hoja de datos técnicos Masstercal (agosto2009)

El consumo de gas es de 2.78 litros por minuto, considerando que el costo por litro esta en 10.52 pesos m/n, considerando el uso de la alberca de lunes a sábado y un promedio de 60 minutos de operación diaria de acuerdo a las condiciones climáticas de la zona solo en diciembre y enero se necesitara más tiempo para el calentamiento de la alberca, sin embargo estimando este costo arroja la cifra de consumo diario de \$1,754.74 pesos M/N lo que al año es \$705,328.13, M/N como se puede

ver en la tabla 14 donde se analizan los costos de ambos sistemas de calentamiento usados en las regaderas y alberca.

Tabla. 16 costos de calentamiento de agua en UPAEP

consumo de combustible en l/min	costo por litro	Tiempo min	costo diario	costo anual	ahorro debido a energía solar	costo mensual
2.78	\$ 10.52	60	\$ 1,754.74	\$505,363.97	\$ 294,795.65	\$ 42,113.66
0.1	\$ 10.52	660	\$ 694.32	\$199,964.16	\$ 99,982.08	\$ 16,663.68
			costo total	\$705,328.13		\$ 58,777.34

Actualmente gracias al sistema que se tiene en la alberca el sistema de calentamiento a base de combustibles fósiles solo se usa por periodos cortos de tiempo los meses de diciembre enero, febrero y marzo es la temporada donde más se utiliza el sistema de calentamiento de la caldera, más adelante en los meses de septiembre y octubre en temporada de lluvias el consumo es la mitad de lo que se consume en enero por tanto arroja un consumo anual de \$210,568.32 M/N este es el consumo actual con el uso de equipos solares por lo que se genera un ahorro anual de \$294,795.65 M/N que genera además el valor agregado de no producir gases derivados de la quema de gas. LP, por lo cual de inicio si representa un ahorro sustancial el uso de energías solares.

Para el sistema solar actual se tiene la cantidad de 167 tapetes de membrana de alto flujo instalados en el tercer nivel de las instalaciones, lo que tendría un costo de instalación y mano de obra de \$751,500.00 más el calentador de alberca se tiene una inversión inicial de \$1,004,867.00 M/N aun con esto si se suma a los costos no es demasiado en comparación de solo usar combustibles fósiles para una instalación de este tipo. Para el análisis se va a considerar que los equipos se adquieran nuevos de paquete adicional la instalación en un tiempo de 10 años por lo que el ahorro durante los diez años da un valor de \$2,947,956.5 M/N casi triplicando el valor de la inversión inicial.

Para el sistema de regaderas de la Universidad se tiene dos calentadores de agua modelo LC-450-C que deben instalarse de manera adecuada como lo indica la Figura 39, los cuales si trabajaran de manera diaria sin los equipos solares tendría un costo de \$199,964.16 M/N, y con los equipos solares el ahorro anual es de \$99,982.08 M/N como se vio en la Tabla 14, por tanto para este sistema le componen 24 equipos de 25 tubos de vacío y un termo tanque de 6000 litros y equipos adicionales de

causando un incremento de costos ya planteado anteriormente, la propuesta es lograr que esto no suceda, a través del aumento de equipos de tubos de vacío, interconectados a los dos sistemas, pero controlado a través de válvulas automatizadas para que cuando la temperatura de la alberca llegue a la temperatura de control estas válvulas redireccionen el flujo a donde se requiera más temperatura.

Para el análisis financiero de la propuesta ver Figura 48 se estarían utilizando 41 calentadores solares de 20 tubos con un costo aproximado de 492000, mas equipos adicionales como el tanque de almacenamiento, la bomba de recirculación, el intercambiador de calor, válvulas de control, retiro y mantenimiento de todos los equipos que se encuentren en mal estado, así como la sustitución y almacenamiento de tapetes de membrana de alto flujo que se pueden colocar en zonas donde sean necesarios, esto como refacciones del sistema. Por lo que de acuerdo con los cálculos de costos investigados vía internet, lo que arroja una cantidad total de 650,000. Pesos M/N esta sería la inversión necesaria para poner a operar el sistema, sin embargo se puede asegurar un ahorro hasta de un 90 % en costos de energía fósil, lo que traducido en números se estarían ahorrando 404,291. Pesos anuales, con lo que se recuperaría la inversión en dos años, por mencionar algo el costo aproximado anual actual debido al consumo de combustibles fósiles es de 310,000 pesos y se reduciría si se tratara de un 85% en 46,000 pesos lo cual es bastante bueno y si se considerara este el valor de retorno se recuperaría la inversión en máximo 3 años. Como se observa en la Tabla 13 donde se observa el flujo de efectivo a manera de ejemplo del ahorro financiero.

Tabla 17. Análisis financiero de la propuesta. Fuente elaboración propia.

Inversión inicial=	\$ 650,000.00					
		0	1	2	3	4
		-\$ 650,000.00	\$ 263,967.84	\$ 263,967.84	\$ 263,967.84	\$ 263,967.84
Riesgo=	15%					
i=	4.4%	VNA=	\$788,384.32			
TIR=	29%					
TMAR=	20.06%					

Donde se define el **Riesgo** del 15% la cual es el valor otorgado debido al porcentaje de incertidumbre derivado de querer realizar una inversión de este índole, derivado del uso de energías solares térmicas y su creciente mercado en expansión. Después de esto se considera la inflación (**i**) de 4.4% de acuerdo a la situación actual del país, considerando ambos valores obtenemos la **TMAR** que es la tasa mínima aceptable de rendimiento, este valor lo compararemos con el valor **TIR** que es la tasa

interna de rendimiento, que como se observa en la Tabla 17 es más alto que la **TMAR** por tanto demuestra viabilidad, de igual manera el valor actual neto está arriba de la inversión inicial, por tanto el cálculo de recuperación de la inversión **PRI** será de 2.51 años, lo que da mucha certeza de ser viable.

En resumen cuando se trata de tener un confort en cuanto a instalaciones de alberca y regaderas es necesario considerar el consumo energético que esto implica, lo cual hace que empresas piensen dos veces en tener estos servicios, sin embargo si se utilizan energías como es el caso de térmicas solares, ayuda a conocer que son una inversión que va a reeditar por tanto es totalmente viable. Y es claro que en un inicio si es costoso pero al final vale la pena.

Conclusiones y recomendaciones.

Derivado de los la investigación documental y de campo realizada se observa que es posible realizar estudios de eficiencia solar a través del modelado matemático y simulación computacional observando que a través de la realización de una propuesta técnica, se puede mejorar la eficiencia de los sistemas de calentamiento de agua de las regaderas del 55% al 62% y en alberca del 19% al 22%, lo que permitiría cumplir con los requerimientos necesarios para el uso de estos sistemas por parte de los alumnos, además de acuerdo al estudio financiero lograrían reducir gastos derivados del uso de combustibles fósiles en un 80%, logrando tener una recuperación de la inversión en 2.51 años demostrando la amplia viabilidad del uso de energías solares térmicas sumado a que dentro del contexto actual, se han visualizado grandes avances, un ejemplo de esto es la planta solar Archimede en Italia fue la primera en usar sal fundida como componente para la tranferencia de energia calorifica, lo que incremento hasta 550°C la temperatura de operación lo que permitio mayor almacenamiento de energia provocando una mayor eficiencia del sistema. Liu, M., et al (2012). Ademas del uso de sistemas con disipadores de calor que de igual manera han demostrado una mejora en la eficiencia energetica como se observa en la Figura 40 que demuestra el uso de paletas disipadores con diferente trespesor demostrando un comportamiento diferente de tranferencia de calor muy distinto al no usar paletas, gracias a estos estudios se puede saber que aun hay mucho que implementar en el campo del conocimiento de las energias renovables.

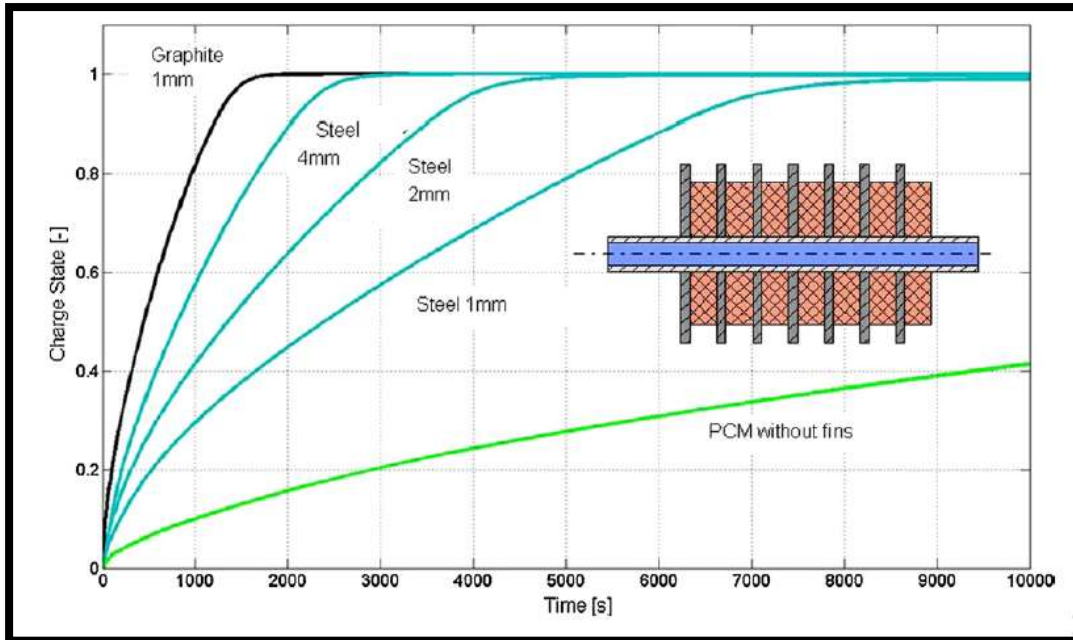


Figura 40. Comparacion de cambio de estado de un fluido con paletas disipadoras y sin paletas, de diferentes espesores de acero y de grafito. Fuente Liu.M., et al (2012).

A propósito se ha comprobado que a través de la simulación matemática computacional que se pueden lograr resultados más cercanos a las expectativas del cliente, sin embargo siempre se requerirá la pericia por parte del ingeniero ambiental para desarrollar una propuesta que sea lo más viable y económica a las necesidades del cliente, además de que existen empresas dedicadas a este tema en concreto que buscan la mejora continua en procesos de generación eléctrica a través de nuevas tecnologías en cuanto a materiales, y equipos, aun se pueden desarrollar sistemas más eficientes que en un inicio serán más costosos pero en un futuro serán más accesibles y se podrán implementar más fácil, así que hago la invitación abierta para que se continúe la investigación y desarrollo de fuentes de energías verdes, en conjunto de sumarse a el cambio de paradigma actual de indiferencia ya que son asuntos que atañen a la sociedad actual, se debe mirar al entorno donde se desenvuelven las actividades para procurar realizar prácticas de economía circular, cuidado del medio ambiente, aprovechamiento y gestión de los residuos, reciclaje por mencionar algunas, se puede terminar diciendo que “el mundo que construyes ahora será el futuro que las generaciones por venir deben merecer”.

Anexos

Parte del trabajo de investigación es el escrutinio del sistema lo que permitió observar el funcionamiento de los equipos por lo que se generaron planos referentes que podrán ser motivo de posteriores estudios de sistemas térmicos solares, además que son modelos que podrían aplicarse a otros sistemas con el dimensionamiento similar.

Los primeros planos Figura 41 a 46 son los planos generados de la situación actual de junio del 2020, las Figuras del 47 al 50 son las propuestas y están basadas en los espacios disponibles derivados de la visita y medición de campo, sin embargo quedara a consideración del personal de proyectos el uso de los espacios, así como el ajuste de campo apropiados.

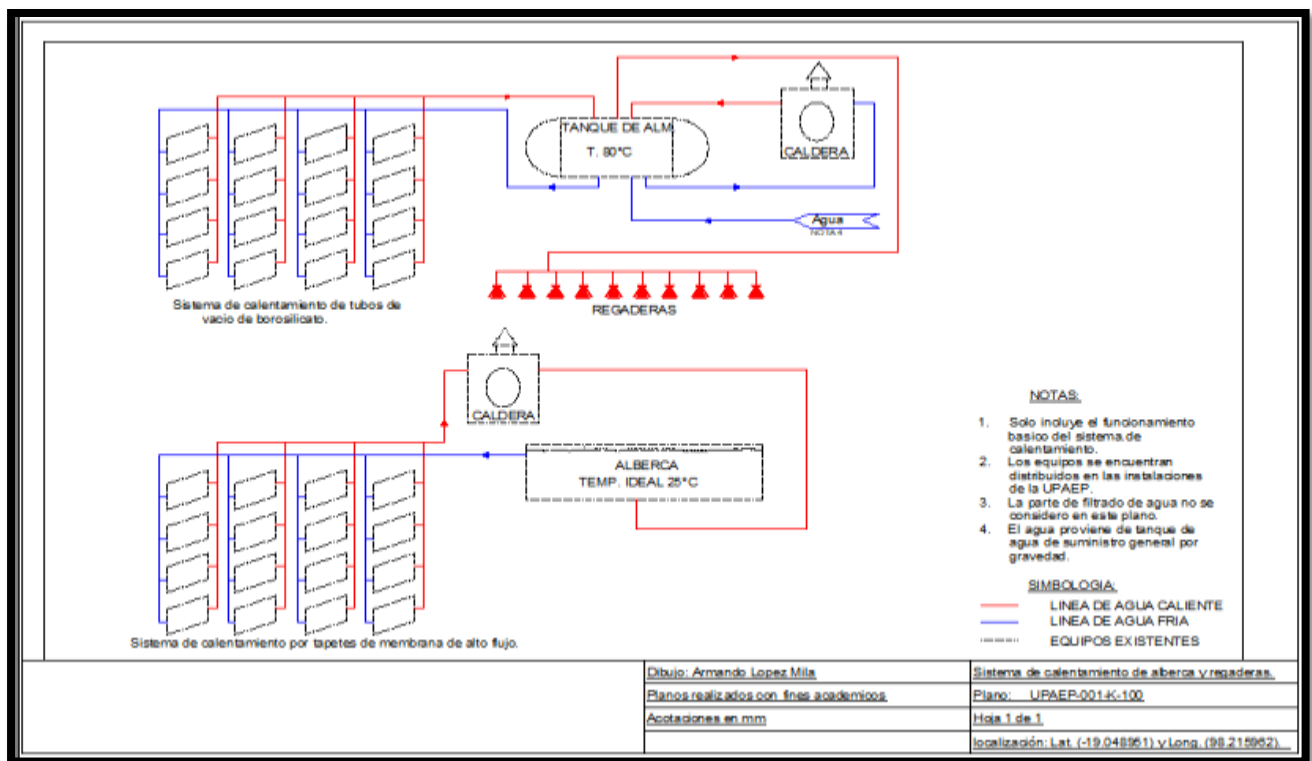


Figura 41. Diagrama unifilar actual del sistema de calentamiento térmico. Fuente elaboración propia. 2020

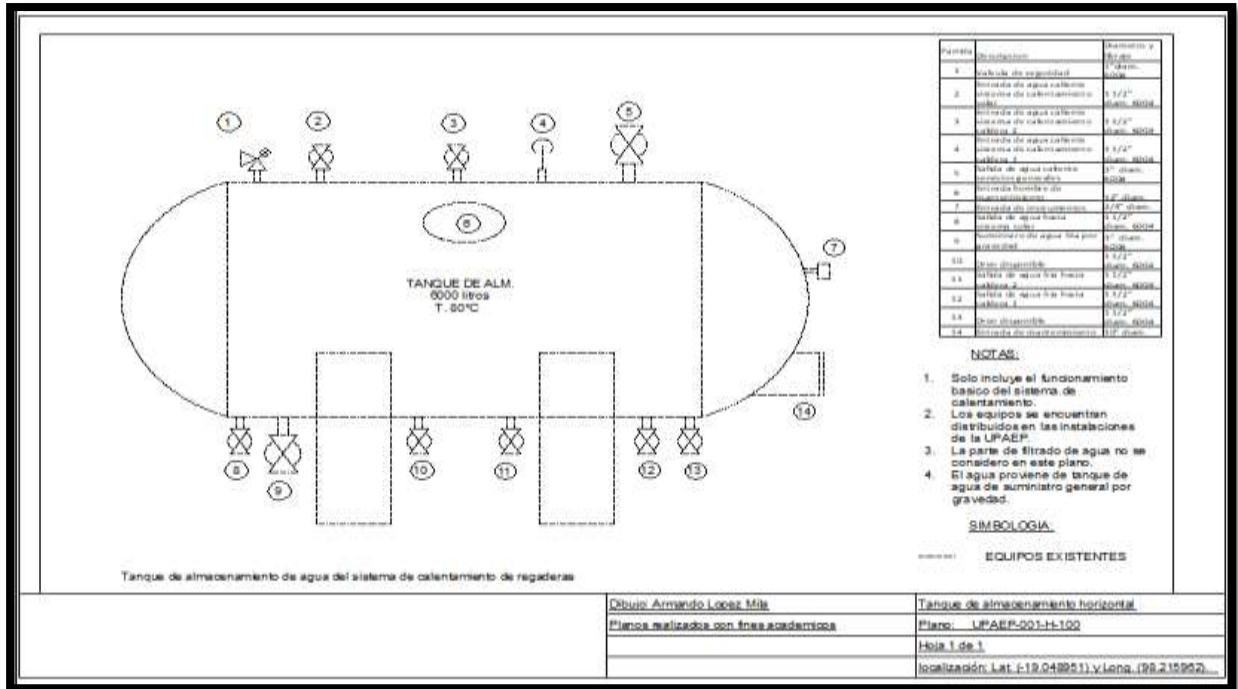


Figura 42. Tanque de almacenamiento térmico 6000 litros. Fuente elaboración propia 2020.

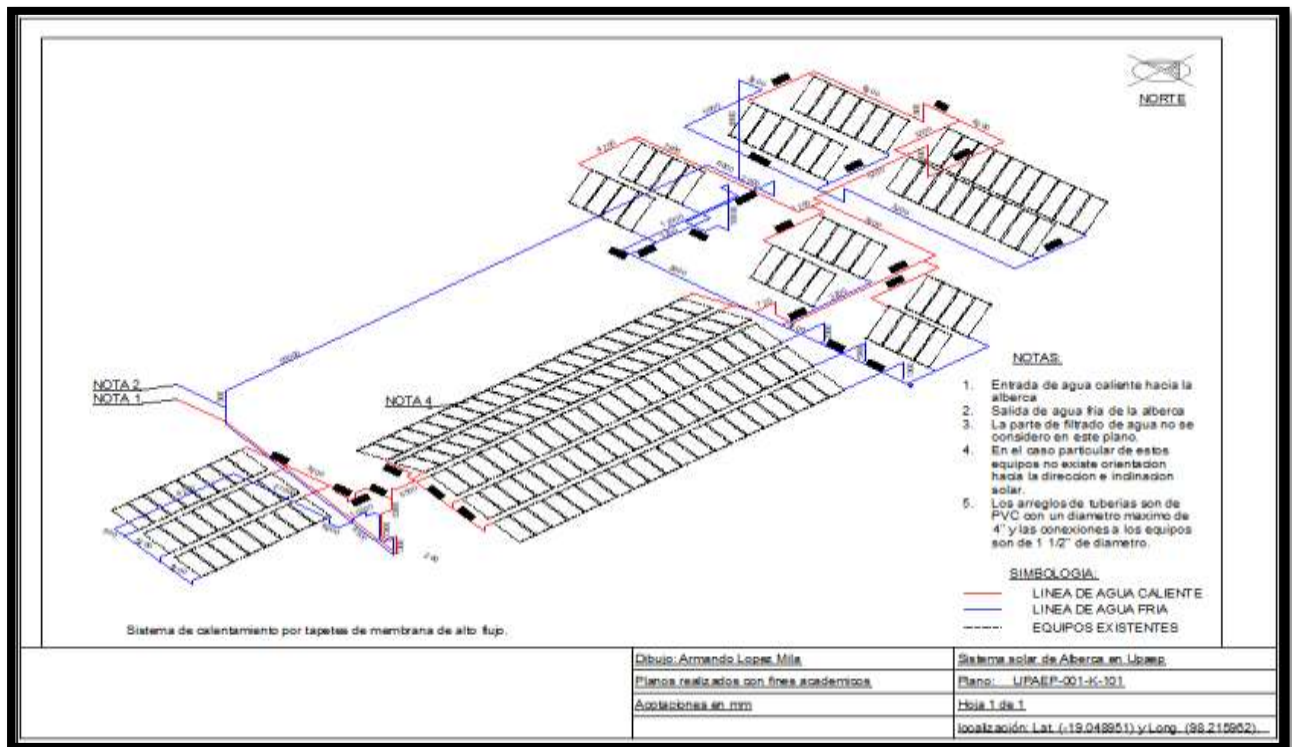


Figura 43. Plano isométrico de sistema de calentamiento solar de Alberca. Fuente elaboración propia 2020.

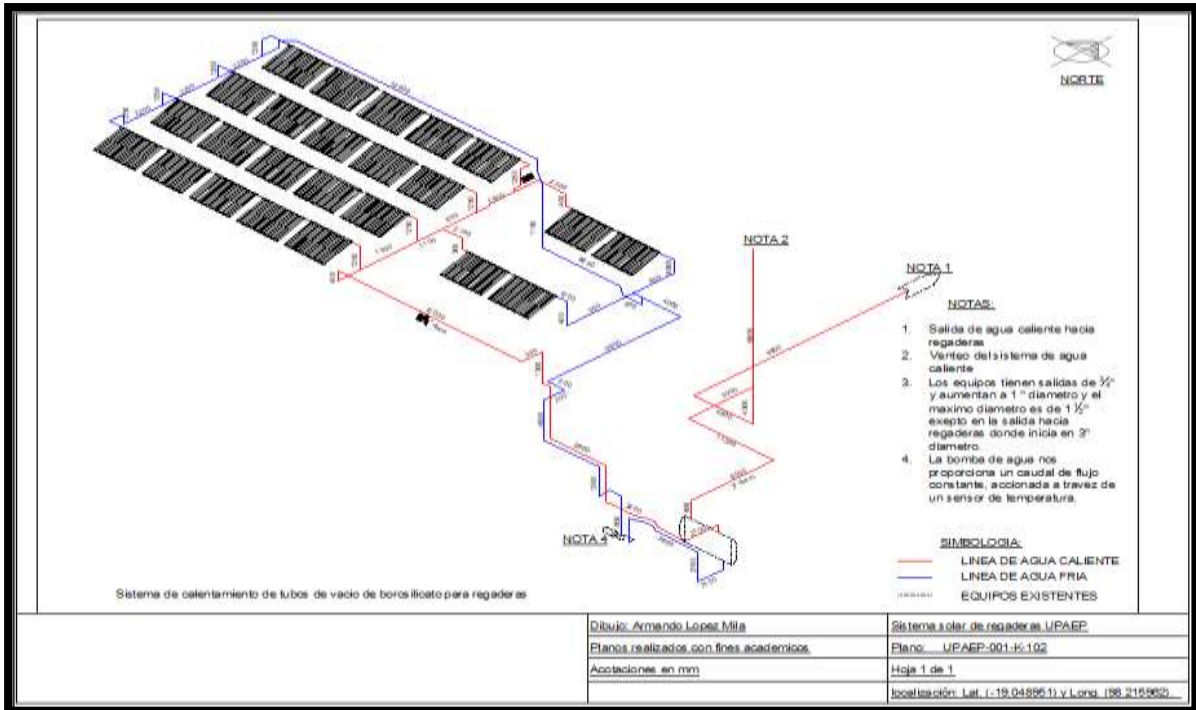


Figura 44. Plano isométrico de sistema de calentamiento de regaderas. Fuente elaboración propia 2020

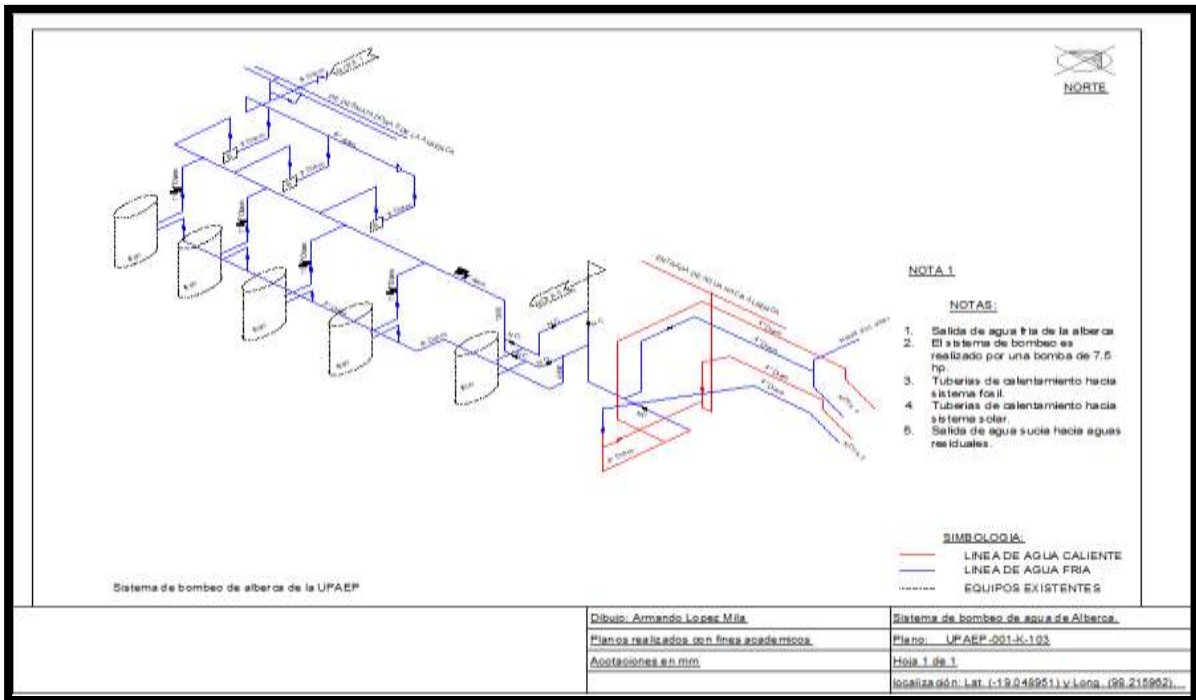


Figura 45. Isométrico del sistema de bombeo de Alberca. Fuente elaboración propia 2020.

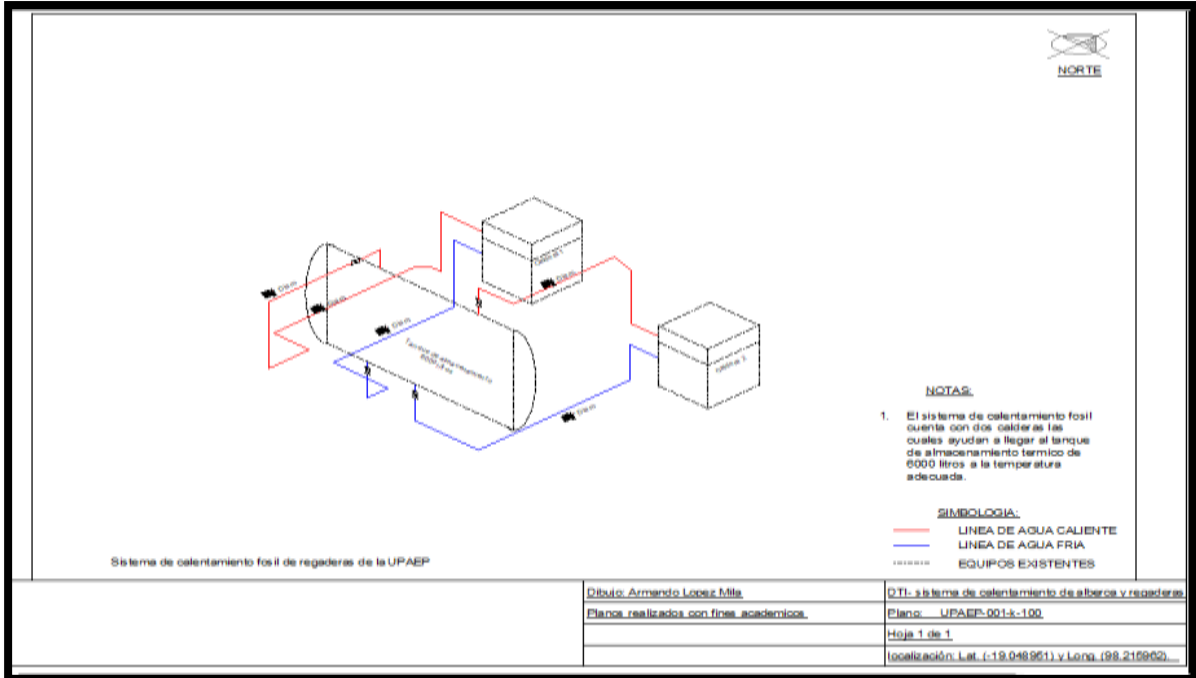


Figura 46. Plano isométrico de sistema de calentamiento de tanque térmico. Fuente elaboración propia 2020.

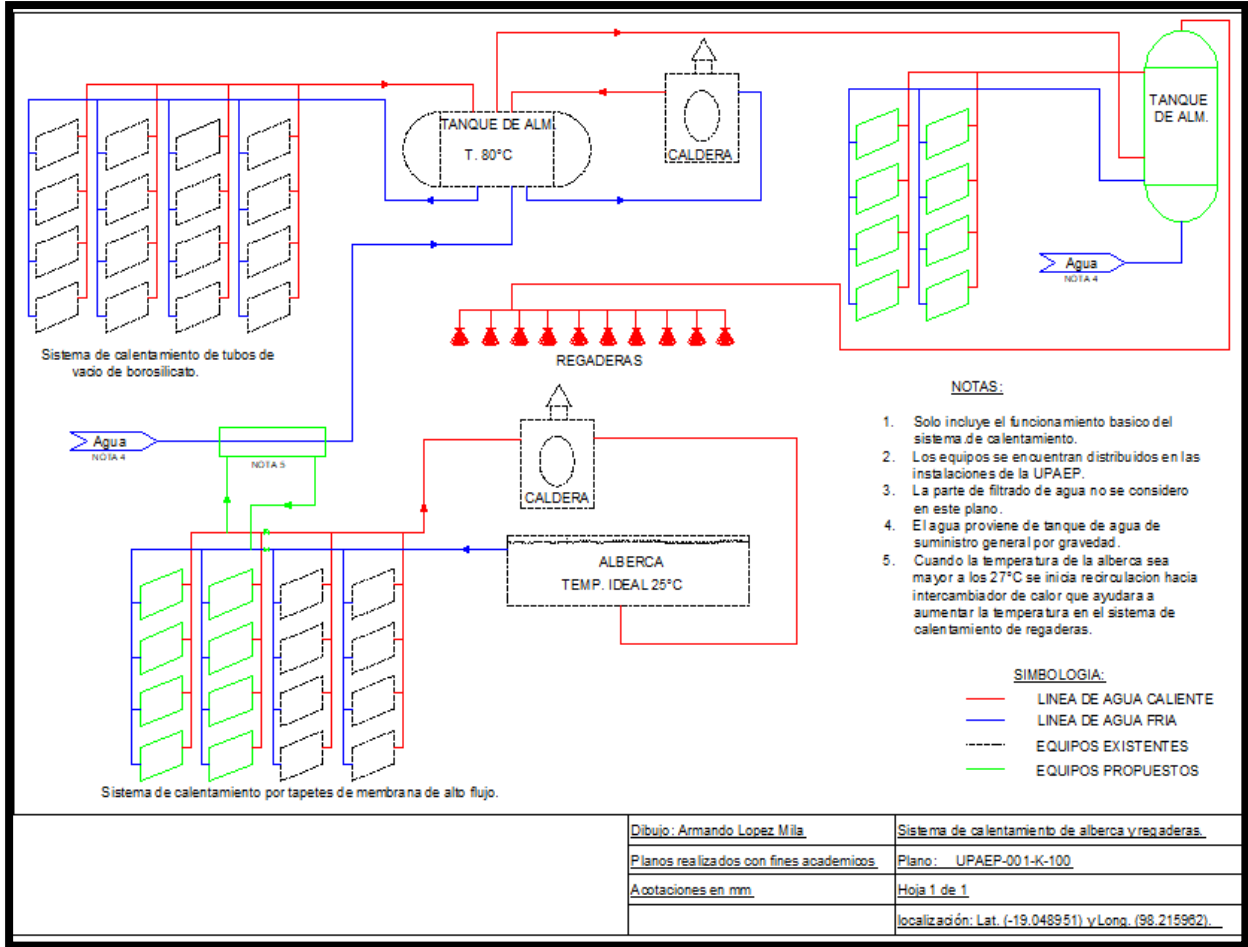
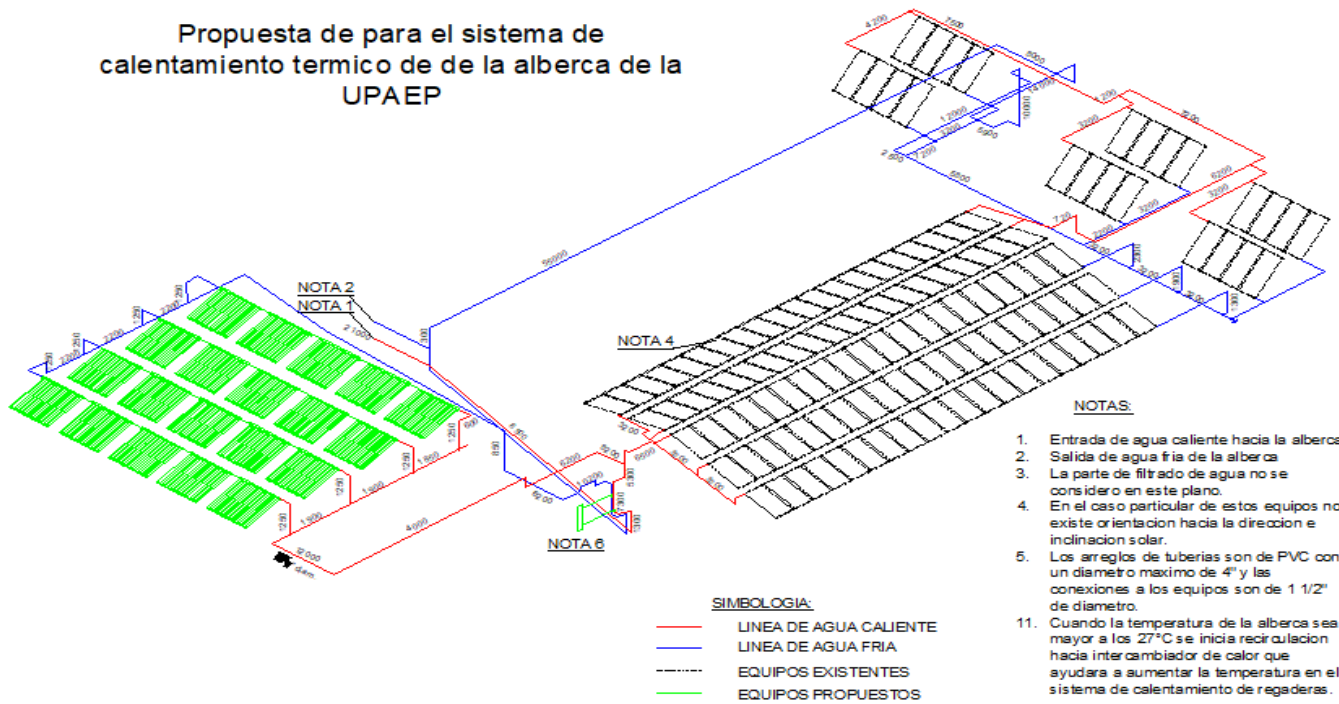


Figura 47. Unifilar de Propuesta de calentamiento térmico de regaderas y alberca de la UPAEP. Fuente elaboración propia 2020.

Propuesta de para el sistema de calentamiento termico de de la alberca de la UPAEP



Dibujo: Armando Lopez Mills	Propuesta del Sistema de calentamiento de regaderas
Planos realizados con fines academicos	Plano: UPAEP-001-K-107
Aotaciones en mm	Hoja 1 de 1
	localización: Lat. (-19.048951) y Long. (98.215962)

Figura 48. Propuesta solar térmica para alberca. Fuente elaboración propia 2020

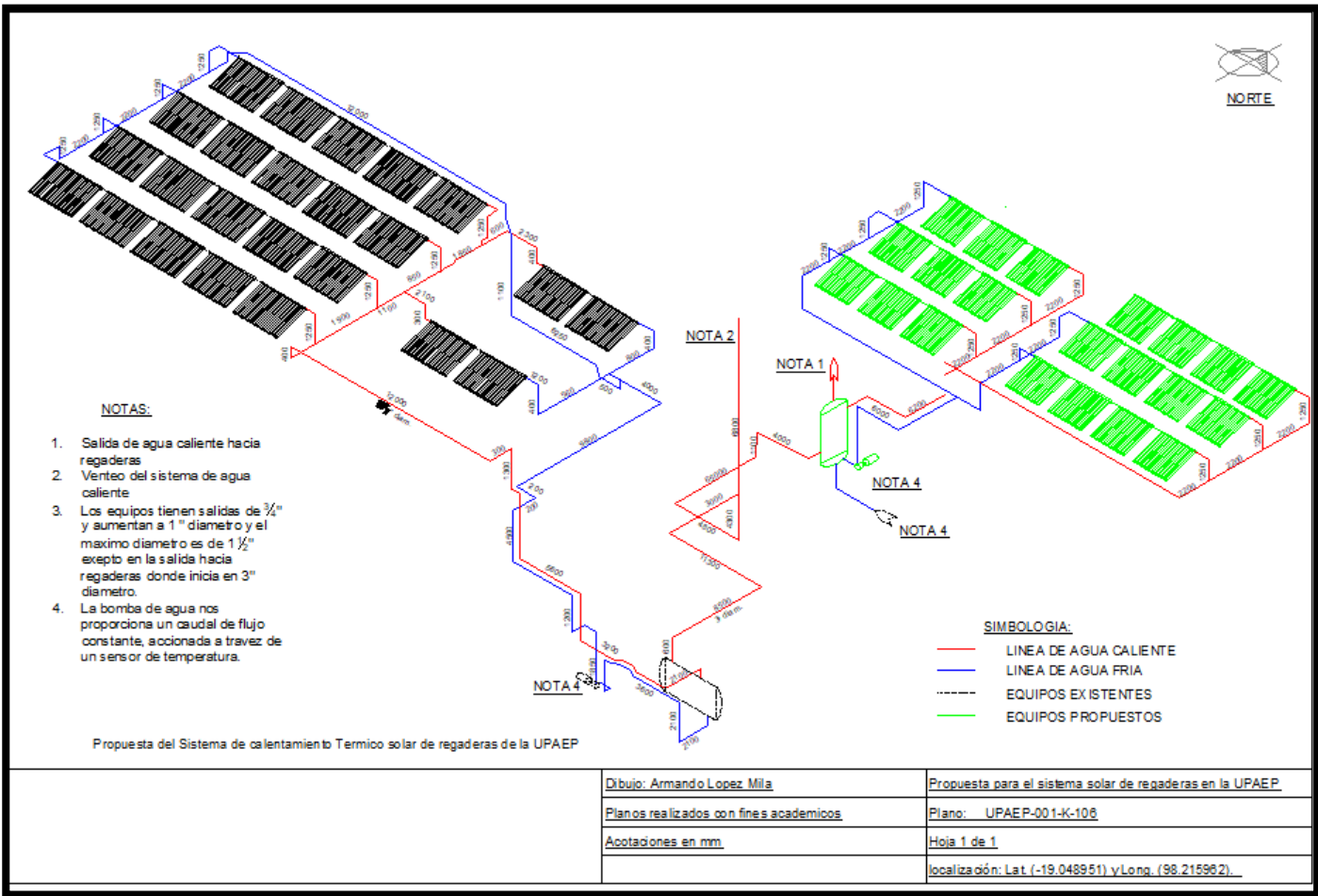


Figura 49. Propuesta de calentamiento solar de regaderas. Fuente elaboración propia.

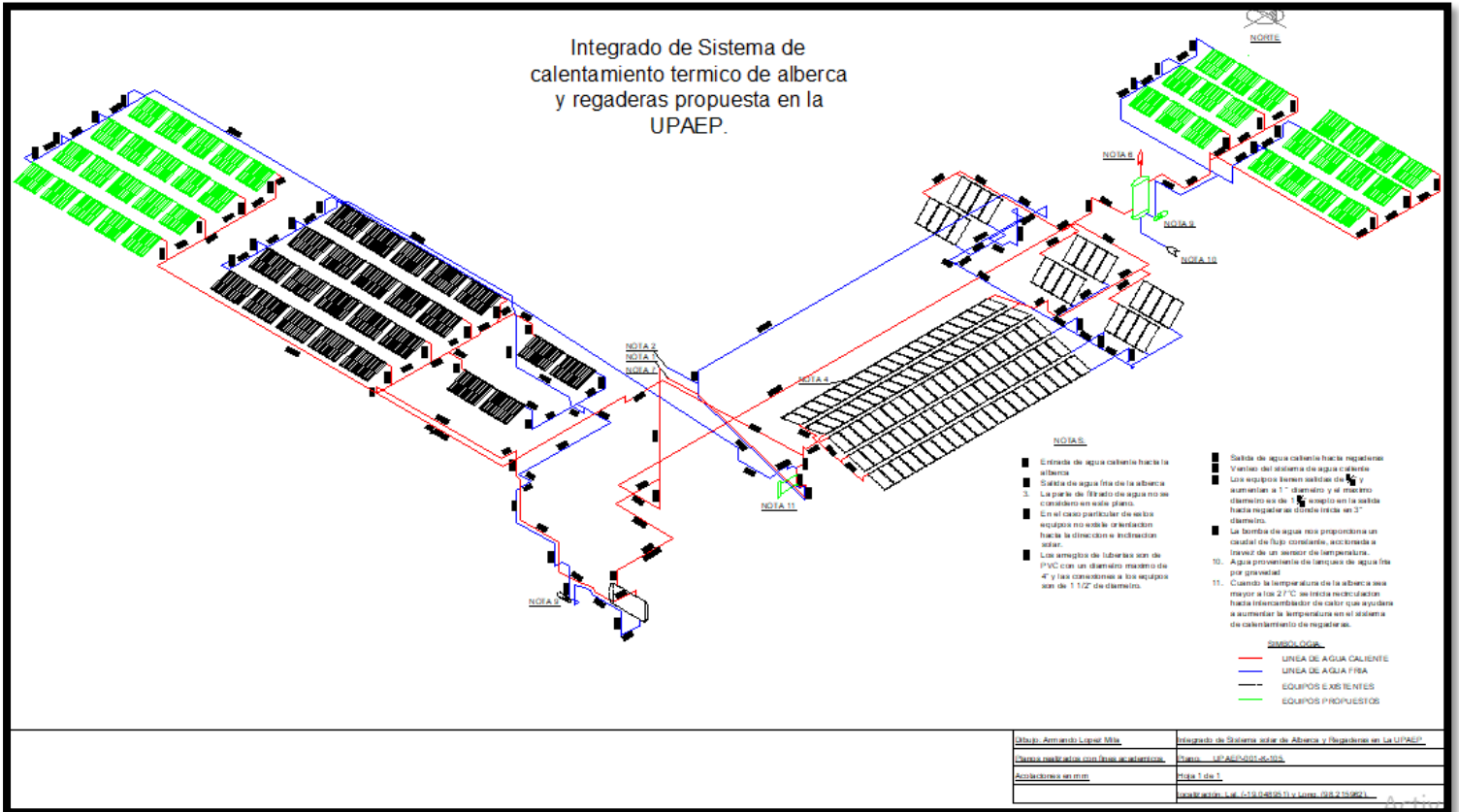


Figura 50. Integrado de propuestas de calentamiento térmico. Fuente elaboración propia 2020.

Referencias

- 1- Almache-Almeida, J., Andrade-Becerra, S., Ibarra-Jácome, A., Abatta-Jácome, L., & Arcos-Aviles, D. (2018). Análisis de un colector solar utilizando policarbonato alveolar para sistemas de calentamiento de agua de baja temperatura. *DYNA-Ingeniería e Industria*, 93(5).
- 2- Baniassadi, A., Momen, M., Amidpour, M., & Pourali, O. (2018). Modeling and design of solar heat integration in process industries with heat storage. *Journal of Cleaner Production*, 170, 522-534.

- 3- Bird, R. B., Stewart, W. E., & Lightfoot, E. N. (1992). *Fenómenos de transporte: un estudio sistemático de los fundamentos del transporte de materia, energía y cantidad de movimiento* (No. TP156 B5321).
- 4- Castañeda, J. L. S., Arrieta, A. A. A., & Sierra, F. J. C. (2012). La radiación infrarroja como mecanismo de transferencia de calor de alta calidad en procesos de calentamiento. *Ingeniería y ciencia*, 8(16), 97-127
- 5- Conte, Grand, M. (2018). Desarrollo sostenible y conceptos “verdes”. *Problemas del desarrollo*, 49(192), 61-84.
- 6- CRANE, C. (1987). *FLUJO DE FLUIDOS: EN VALVULAS, ACCESORIOS Y TUBERÍAS/CRANE* (No. TC174. F58 1987.).
- 7- Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). *Solar engineering of thermal processes*. John Wiley & Sons.
- 8- Ekechukwu, O.V., Norton, B (1999). *Review of solar-energy drying systems II: an overview of solar drying Technology*. *Energy conversion & management* 40 (615-655) Nigeria Nsukka
- 9- Girado-Polo, C., & Gónima-Gónima, L. (2018). Algoritmo teórico para la estimación de la radiación solar global para una atmósfera despejada. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 42(162), 104-113.
- 10- Gómez, A. (2018). Sol y Arquitectura.
- 11- Hamza, J. H., Saad, M. S., Naseer, K. K., (2009) Thermal performance of evacuated tube solar heating system. *College of Engineering/University of Baghdad*.
- 12- Hidalgo, D. B., Borges, R. J., & Nodal, Y. V. (2019a). Applications of Solar Energy: History, Sociology and last Trends in Investigation. *Producción+ Limpia*, 13(3).
- 13- Hidalgo, D. B., & Hernández, A. B. (2019b). Simulación termodinámica en Matlab, aplicación en la pedagogía de la ingeniería. *Opuntia Brava*, 11(Especial 2), 118-133.
- 14- Jafarkazemi, F., Ahmadifard, E., & Abdi, H. (2016). Energy and exergy efficiency of heat pipe evacuated tube solar collectors. *Thermal Science*, 20(1), 327-335.
- 15- Kalogirou, S. (2003). The potential of solar industrial process heat applications. *Applied Energy*, 76(4), 337-361.

- 16- Klein, P., Surridge, K., & Wolf, M. (2018). Potential of solar heat for industrial processes: a summary of the key findings from Solar Payback.
- 17- Kumar, S. S., Kumar, K. M., & Kumar, S. S. (2017). Design of evacuated tube solar collector with heat pipe. *Materials Today: Proceedings*, 4(14), 12641-12646.
- 18- Liu, M., Saman, W., & Bruno, F. (2012). Review on storage materials and thermal performance enhancement techniques for high temperature phase change thermal storage systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(4), 2118-2132.
- 19- Ponce, C. V., & Valderrama, J. O. (2016). Análisis de la Influencia de la Radiación Solar en una Planta de Ciclo Combinado con Colectores Solares Integrados mediante Simulación. *Información tecnológica*, 27(3), 151-160.
- 20- Recalde, C., Cisneros, C., Ávila, C., & Urquizo, G. (2015). Influencia del ángulo de inclinación de los tubos solares evacuados sobre la temperatura del agua. *Información tecnológica*, 26(4), 89-96.
- 21- Sharma, A., Gakare, A., & Saxena, G. (2018). Performance Investigation of Evacuated Tube Solar Heating System: A Review. *Journal of Alternate Energy Sources and Technologies*, 9(3), 15-26.
- 22- Sharma, A. K., Sharma, C., Mullick, S. C., Kandpal, T. C. (2017) *solar industrial process heating: A review*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 78. (124-137). India. Rajasthan.
- 23- Sukhatme S.P. "Solar Energy Principles of Thermal Collection and Storage "Tata McGraw Hill, New Delhi,1980.
- 24- Summers, E. K., & Lienhard V, J. H. (2013). A novel solar-driven air gap membrane distillation system. *Desalination and Water Treatment*, 51(7-9), 1344-1351.
- 25- VijayaVenkataRaman, S., Iniyan, S., Goic, R. (2012). *A review of solar drying technologies*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 (2652-2670).