

INFLUENCIA DEL PRECALENTAMIENTO DEL AGUA DE ALIMENTACION
MEDIANTE ENERGIA SOLAR EN LA EFICIENCIA DE UNA CALDERA
PIROTUBULAR

YAJAIRA JULIANA VEGA MELO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECANICAS
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA
BUCARAMANGA

2017

INFLUENCIA DEL PRECALENTAMIENTO DEL AGUA DE ALIMENTACION
MEDIANTE ENERGIA SOLAR EN LA EFICIENCIA DE UNA CALDERA
PIROTUBULAR

YAJAIRA JULIANA VEGA MELO

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR EL TITULO DE INGENIERA
MECANICA

DIRECTOR

Ph.D JULIAN ERNESTO JARAMILLO IBARRA
INGENIERO MECANICO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECANICAS
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA
BUCARAMANGA

2017

DEDICATORIA

A DIOS por llenarme de fortaleza cuando creí haberla perdido toda, por cada luz guía que puso en mi camino y por ello lo he podido recorrer hasta mi presente.

A Mary Luz Melo Palacios, mi madre quien con su fé inquebrantable y su amor infinito fué, es y será siempre mi gran apoyo y compañera de sueños.

A Gavino Vega Ortega, mi padre quien con su esfuerzo diario logró que yo cumpliera este primer sueño.

A Caroll Lisseth Vega Melo, mi hermana quien ha sido mi compañía y apoyo en todo momento, la mejor del mundo.

A Liam y Gabi, la inspiración y motivación de cada segundo de mi vida, la razón para seguir y nunca pensar en parar, los protagonistas de cada fantasía anhelada.

A Javier Alexander Meneses Gomez, por ser mi compañero en este largo camino y con su amor ayudar a cultivar cada sueño y llegar a cada meta.

A todas personas que con su amor, palabras, ayuda, hicieron que este primer escalón fuera posible alcanzarlo.

YAJAIRA VEGA

AGRADECIMIENTOS

Al Doctor Julián Ernesto Jaramillo Ibarra por su tiempo y conocimiento dedicado en la dirección de este proyecto, para que su desarrollo y culminación fueran posibles.

A la Universidad Industrial de Santander por cada aporte en todos los ámbitos de mi vida, porque, no solo fué académicamente, sin duda después de estos años universitarios no volveré a ser la misma.

YAJAIRA VEGA

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCION	17
1.PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	18
2.JUSTIFICACION	20
3.OBJETIVOS DE LA INVESTIGACION	22
3.1 OBJETIVO GENERAL	22
3.2OBJETIVOS ESPECIFICOS	22
4.MARCO TEORICO	22
4.1 RADIACION SOLAR	23
4.1.1El Sol	23
4.1.2 Definiciones de los componentes de la energia solar	24
4.1.3 Dirección de radiación del haz	25
4.1.4 Radiación solar disponible	27
4.2 ENERGIAS RENOVABLES	29
4.2.1 Energía solar térmica	29
4.2.2 Situación actual	32
4.3 CALDERAS	33
4.3.1 Proceso de la combustión en la caldera	34
4.3.2 Proceso de cambio de fase	34
4.3.3 Clasificación de las calderas	35
4.3.4 Partes fundamentales de una caldera	38
4.3.5 Sistemas y elementos auxiliares una caldera	42
4.3.6 Aplicaciones	47
4.4 HERRAMIENTAS SOFTWARE DE SIMULACIÓN	48
4.4.1 Matlab y Simulink	48
4.4.2 TRNSYS	48
5. DESARROLLO FASE I: CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA	49
5.1 CARACTERIZACIÓN DE LA CALDERA PIROTUBULAR	50
5.2 CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA TÉRMICO SOLAR	54
5.2.1 Tanque Acumulador	54
5.2.2 Colector solar	57
6. DESARROLLO FASE II: MODELADO MATEMÁTICO Y SIMULACIÓN DEL SISTEMA	61
6.1 MODELADO MATEMÁTICO	61

6.1.1 Modelado matemático del Colector Solar Plano	61
6.1.2 Modelado matemático de la Caldera Piro-tubular	74
6.2 SIMULACIÓN DEL SISTEMA	86
6.2.1 Simulación en Matlab-Simulink	87
6.2.2 Simulación en TRNSYS	99
7. DESARROLLO FASE III: VALIDACION DE RESULTADOS	101
7.1 VALIDACION MATLAB-SIMULINK	102
7.2 VALIDACION TRNSYS	116
8. DESARROLLO FASE IV: EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA	119
8.1 EVALUACION MATLAB-SIMULINK	119
8.2. EVALUACION TRNSYS	125
9. DESARROLLO FASE V: ESTUDIO DE VIABILIDAD FINANCIERA	129
10. CONCLUSIONES	133
BIBLIOGRAFIA	134

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Partes del sol	23
Figura 2. Relación Sol-Tierra	24
Figura 3. (a) Ángulo de zenit, pendiente, ángulo de azimut de superficie y ángulo de azimut solar para una inclinación superficie. (b) Vista en planta que muestra el ángulo del azimut solar	25
Figura 4. Pirheliómetro	27
Figura 5. Piranómetro radiación solar Global de alta precisión clase A	28
Figura 6. Sistema térmico solar (Colector) implementado para el calentamiento de agua para uso doméstico.	30
Figura 7. Partes principales de un colector.	30
Figura 8. Energía eólica marina.	33
Figura 9. Diagrama Termodinámico T-v de una sustancia pura, proceso ocurrido en la caldera.	35
Figura 10. Esquema de una Caldera Piro-tubular a carbón.	36
Figura 11. Caldera piro-tubular horizontal de dos pasos.	37
Figura 12. Esquema básico de las partes de una caldera.	38
Figura 13. Diagrama termodinámico T-V	44
Figura 14. Esquema general del Sistema térmico y caldera en conjunto.	49
Figura 15. Caldera Piro-tubular horizontal de dos pasos.	50
Figura 16. Vista lateral de la caldera (Acotación correspondiente a las especificaciones de la Tabla 3).	52
Figura 17. Vista frontal de la caldera (Acotación correspondiente a las especificaciones de la tabla 3).	53
Figura 18. Componentes del sistema térmico solar.	54
Figura 19. Interacumulador de un serpentín Chromagen.	55
Figura 20. Interacumulador esquema básico acotada (correlacionada con las especificaciones de la tabla 4).	56
Figura 21. Vista superior del colector solar.	58
Figura 22. Colector solar de placa plana Chromagen.	58
Figura 23. Curva de rendimiento del colector solar para $QS\beta=850 \text{ W/m}^2$	60
Figura 24. Circuito térmico de un colector solar placa plana de una sola cubierta: (a) Circuito térmico en detalle, (b) Circuito térmico equivalente.	63
Figura 25. Balance de energía en la placa de absorción.	65
Figura 26. Distribución de la temperatura en la placa de absorción.	66
Figura 27. Variación de la eficiencia geométrica en función del parámetro $m * W - D2$	67
Figura 28. Balance de energía en un elemento diferencial de agua dentro del tubo	68
Figura 29. Representación gráfica de la Ley de Snell.	71
Figura 30. Absorción de radiación solar por placa absorbente bajo un sistema de cubierta.	73
Figura 31. Efecto del porcentaje de aire sobre la eficiencia de combustión.	75

Figura 32. Balance diferencial de Trasterencia de Calor en tubo secundario de la caldera.	79
Figura 33. Diagrama de flujo para la simulación en MATLAB-SIMULINK.	88
Figura 34. Diagrama de bloques del Sistema térmico solar.	89
Figura 35. Diagrama de bloques de la Función principal de la caldera.	90
Figura 36. Diagrama de bloques para el Cálculo del calor total, a) Calor tubo principal y b) calor Tubo Secundarios.	91
Figura 37. Diagrama de bloques Balance de líquido y masa de vapor de la caldera.	92
Figura 38. Diagrama de bloques de la Función de propiedades termodinámicas.	94
Figura 39. Diagrama de bloques de control a) Control PI y b) Control ON-OFF.	98
Figura 40. Esquema general de la simulación en TRNSYS.	99
Figura 41. Señalización de los cambios realizados a la hoja original del Type99.	100
Figura 42. Gráfica eficiencia colector, T_{amb} y T_{agua} vs Tiempo, con valor de Temperatura ambiente constante equivalente a 20°C y $Q_{s\beta}=500$ W/m^2 . Matlab-Simulink(Colector).	103
Figura 43. Gráfica Calor Total Incidente y Calor útil vs Tiempo, con valor de Temperatura ambiente constante equivalente a 20°C y $Q_{s\beta}=500$ W/m^2 . Matlab-Simulink(Colector).	103
Figura 44. Gráfica Temperatura Ambiente y Temperatura del agua de salida del colector vs Tiempo, con valor de Temperatura ambiente constante equivalente a 20°C y $Q_{s\beta}=500$ W/m^2 . Matlab-Simulink(Colector).	104
Figura 45. Gráfica eficiencia colector, T_{amb} y T_{agua} de salida del colector vs Tiempo, con valor de Temperatura ambiente constante equivalente a 20°C y $Q_{s\beta}=250$ W/m^2 . Matlab-Simulink(Colector).	104
Figura 46. Gráfica Calor Total Incidente y Calor útil vs Tiempo, con valor de Temperatura ambiente constante equivalente a 20°C y $Q_{s\beta}=250$ W/m^2 . Matlab-Simulink(Colector).	105
Figura 47. Gráfica Temperatura Ambiente y Temperatura del agua de salida del colector vs Tiempo, con valor de Temperatura ambiente constante equivalente a 20°C y $Q_{s\beta}=250$ W/m^2 . Matlab-Simulink(Colector).	105
Figura 48. Gráfica Temperatura Ambiente-Temperatura del agua de salida del colector vs Tiempo, con valor de $Q_{s\beta}=500$ y Temperatura ambiente variable (Datos meteorológicos reales). Matlab-Simulink(Colector).	106
Figura 49. Gráfica Temperatura Ambiente-Temperatura del agua de salida del colector vs Tiempo, con $Q_{s\beta}$ y Temperatura ambiente variable (Datos meteorológicos reales). Matlab-Simulink(Colector).	107
Figura 50. Gráfica de eficiencia colector, $T_{ambiente}$ y T_{media} del agua del colector vs Tiempo, para una Radiación solar incidente de 850 W/m^2 . Matlab-Simulink.	108

Figura 51. Gráfica Temperatura Ambiente-Temperatura del agua del colector vs Tiempo, con $Q_{s\beta}$ y Temperatura ambiente constantes equivalentes al nivel bajo. Matlab-Simulink.	110
Figura 52. Gráfica Temperatura Ambiente-Temperatura del agua de salida del colector vs Tiempo, con $Q_{s\beta}$ y Temperatura ambiente constantes equivalentes al nivel medio. Matlab-Simulink.	110
Figura 53. Gráfica Temperatura Ambiente-Temperatura del agua de salida del colector vs Tiempo, con $Q_{s\beta}$ y Temperatura ambiente constantes equivalentes al nivel alto. Matlab-Simulink.	111
Figura 54. Gráfica Eficiencia caldera y Temperatura de agua de alimentación Constante=20°C. Matlab-Simulink.	112
Figura 55. Gráfica Eficiencia de caldera-Temperatura de agua de alimentación variable (proveniente colector). Matlab-Simulink.	113
Figura 56. Acercamiento a la curva de eficiencia de la gráfica Eficiencia de caldera-Temperatura de agua de alimentación variable (proveniente colector).	113
Figura 57. Resultados de La Programación para el cálculo de una caldera pirotubular de dos pasos[18].	115
Figura 58. Gráfica de la Eficiencia de la caldera y Temperatura a la salida del colector, sin Datos metrológicos. TRNSYS.	116
Figura 59. Gráfica de eficiencia de caldera, T_{salida} colector y flujos másicos de agua. TRNSYS.	117
Figura 60. Gráfica de la Eficiencia de la caldera y Temperatura a la salida del colector, con Datos metrológicos. TRNSYS.	118
Figura 61. Gráfica de Temperatura y flujo másico del agua de alimentación de la caldera vs Tiempo. Matlab-Simulink.	119
Figura 62. Gráfica Regulación del flujo másico de alimentación de la caldera en función del control del volumen de líquido en la caldera. Matlab-Simulink.	120
Figura 63. Gráfica Presión y flujo de combustible en caldera vs tiempo. Matlab-Simulink.	121
Figura 64. Eficiencia caldera vs tiempo. Matlab-Simulink.	122
Figura 65. Gráfica eficiencia de caldera y temperatura del agua de alimentación. Matlab-Simulink.	122
Figura 66. Gráfica de Presión-flujo másico de combustible vs tiempo con temperatura de agua de alimentación constante. Matlab-Simulink.	123
Figura 67. Gráfica eficiencia de la caldera y Temperatura de agua de alimentación vs tiempo. Matlab-Simulink.	124
Figura 68. Regulación del flujo de agua de alimentación mediante el control del volumen de líquido en la caldera. Matlab-Simulink.	124
Figura 69. Acercamiento en detalle de gráfica de la Eficiencia de la caldera y Temperatura a la salida del colector, con Datos meteorológicos (figura 61). TRNSYS.	125
Figura 70. Gráfica de la Eficiencia de la caldera, Temperatura a la salida del colector y radiación solar con Datos meteorológicos. TRNSYS.	126

Figura 71. Acercamiento en detalle gráfica de la Eficiencia de la caldera, Temperatura a la salida del colector y radiación solar con Datos meteorológicos. TRNSYS.	127
Figura 72. Acercamiento en detalle gráfica de la Eficiencia de la caldera, Temperatura a la salida del colector y radiación solar con Datos meteorológicos, comparación Tagua y eficiencia caldera. TRNSYS.	127
Figura 73. Gráfica de eficiencia de caldera vs número de colectores	132

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Días Promedios Recomendados para Meses y Valores de n por Meses.	27
Tabla 2. Clasificación de carbones según el rango.	45
Tabla 3. Especificaciones de la caldera	51
Tabla 4. Especificaciones técnicas del interacumulador.	56
Tabla 5. Dimensiones y pesos. Presiones de prueba y caudal recomendado	57
Tabla 6. Moles y fracciones molares de los productos de la combustión.	75
Tabla 7. Fracciones molares y presiones parciales de los productos de la combustión.	76
Tabla 8. Masa total de aire.	76
Tabla 9. Tabla de resultados del proceso iterativo para el cálculo de la temperatura de llama adiabática.	78
Tabla 10. Correlaciones de Leckner para emisividad (que se usan igualmente para absorptividad) del CO ₂	82
Tabla 11. Correlaciones de Leckner para emisividad (que se usan igualmente para absorptividad) del H ₂ O.	82
Tabla 12. Factores de nivel para el análisis de sensibilidad del modelo.	109
Tabla 13. Tabla comparativa de los valores de temperatura de agua de alimentación y eficiencia de caldera obtenidos en la simulación.	128

LISTA DE ANEXOS¹

Anexo A. Catálogo de Hurst Boiler and Welding Company, series 200.

Anexo B. Catálogo técnico Chromagen.

Anexo C. Datos meteorológicos.

Anexo D. Precios Gas Natural Fenosa.

¹ Ver anexos en la carpeta adjunta al CD.

RESUMEN

TITULO: INFLUENCIA DEL PRECALENTAMIENTO DEL AGUA DE ALIMENTACION MEDIANTE ENERGIA SOLAR EN LA EFICIENCIA DE UNA CALDERA PIROTUBULAR*

AUTORA: YAJAIRA JULIANA VEGA MELO**

PALABRAS CLAVE: RADIACIÓN SOLAR, CALDERA PIROTUBULAR, ENERGÍA RENOVABLE, SISTEMA TÉRMICO SOLAR, EFICIENCIA, MODELACIÓN, SIMULACIÓN.

DESCRIPCION:

Las calderas son máquinas productoras de vapor, materia usada para diferentes fines industriales. Su desempeño se mide por medio de la eficiencia, factor que se ve afectado por diversas situaciones, procesos y elementos del sistema generador de vapor, dependiente de lo anterior está rentabilidad, costos y el impacto ambiental.

En el presente proyecto se formula la implementación de un sistema térmico solar para el precalentamiento del agua de alimentación de una caldera pirotubular de dos pasos, con el fin de observar y evaluar la influencia de este proceso en la eficiencia de la caldera, además de promover el aprovechamiento de las energías renovables. Para ello se usa el modelado y la simulación a través de herramientas software, permitiendo la evaluación por medio de un método práctico y actualizado, sin inversiones en montajes reales.

La simulación arroja resultados en Matlab-Simulink de un aumento de 3% en la eficiencia y para TRNSYS se muestra un aumento de 1,62%, con la implementación del precalentamiento. Viéndose también un ahorro de combustible con respecto a mantener el agua de alimentación a temperatura ambiente.

La viabilidad aplicando el PRI (periodo de retorno de inversión), relacionando el beneficio obtenido mediante el costo de combustible ahorrado y el costo de implementación del sistema térmico, da un valor para el proyecto propuesto equivalente a 48,4 meses, indica que para una proyección de poco mas de 4años, se tendrá devuelta el dinero invertido.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Julián Ernesto Jaramillo Ibarra. Ingeniero Mecánico.

ABSTRACT

TITLE: INFLUENCE OF FEEDING WATER PREHEATING THROUGH SOLAR ENERGY IN THE EFFICIENCY OF A PIROTUBULAR BOILER*

AUTHOR: YAJAIRA JULIANA VEGA MELO**

KEYWORDS: SOLAR RADIATION, PIROTUBULAR BOILER, RENEWABLE ENERGY, SOLAR THERMAL SYSTEM, EFFICIENCY, MODELING, SIMULATION.

DESCRIPTION:

Boilers are steam producing machines, steam is used for different industrial purposes. Its performance is measured by efficiency, a factor that is affected by different situations, processes and elements of the steam generator system, cost efficiency and environmental impact both depend on the above.

In the following project the implementation of a solar thermal system for the preheating of the feeding water of a two-step pirotubular boiler is formulated, in order to observe and evaluate the influence of this process on the efficiency of the boiler, while promoting the use of renewable energies. For this purpose, modeling and simulation are used through software tools, allowing evaluation through a practical and updated method, without real assemblies investments.

The simulation results in Matlab-simulink of a 3% increase in efficiency and for TRNSYS an increase of 1.62% is shown, with the implementation of preheating. There is also a saving of fuel with respect to maintaining the feed water at room temperature.

Feasibility is developed through applying the PRI (return on investment period), relating the benefit obtained by the cost of fuel saved and the cost of implementation of the thermal system, gives a value for the proposed project equivalent to 48.4 months, indicates that for a Projection of just over 4 years, the money will be returned.

* Bachelor Thesis

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Julián Ernesto Jaramillo Ibarra. Ingeniero Mecánico.

INTRODUCCION

Las fuentes de energía renovable, fruto de recursos inagotables o de fácil restablecimiento, son la opción para el aporte a la disminución de la contaminación y calentamiento global. La energía solar clasifica en este grupo, considerando el sol como una fuente infinita de energía, brindando diversas aplicaciones y utilidades. Aunque la carga energética obtenida mediante esta fuente no es muy alta comparada con las tradicionales (combustibles fósiles) o de ser posible, debería implementarse en gran masa cualquiera de los sistemas térmicos solares. Pero su uso se ha fortalecido en diferentes áreas, como la climatización de recintos y piscinas o calentadores de uso doméstico.

Como aporte, este proyecto propone hacer el estudio preliminar para la implementación de un sistema térmico solar, en el proceso de precalentamiento del agua de alimentación de una caldera pirotubular, para analizar la influencia que esto tendría en la eficiencia de la caldera y dependiendo de los resultados avalar la aplicación de esta fuente de energía para una nueva aplicación a nivel industrial.

En la Fase I se hace la caracterización del sistema térmico solar y la caldera pirotubular los cuales serán integrados para la generación de vapor.

En la Fase II se formulan los modelos matemáticos y se hace la simulación por medio de las herramientas software seleccionadas.

En la Fase III se validan los resultados obtenidos en las simulaciones.

En la Fase IV se evalúa el comportamiento del sistema térmico solar y caldera pirotubular en conjunto, teniendo como pilar principal la eficiencia.

En la Fase V se hace el estudio de viabilidad que está regido por lo concluido en la Fase IV, relacionándolo con el retorno de la inversión que se puede obtener de esta implementación.

1. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

El consumo energético del mundo crece en cada instante que pasa, la demanda aumenta progresivamente, y con ello el agotamiento de las principales fuentes de energía, ya que la explotación es mayor que la velocidad de generación de las materias primas (gas, petróleo). “La producción diaria estimada promedio mensual de crudo con corte a 30 de Abril de 2016 fue de 915 KBPD (Miles de barriles promedio por día)”². Esta cifra revela el aumento de extracción de crudo en Colombia con el paso de los años, siendo este un país con reservas de petróleo disponibles y con riqueza minera. Es posible que no se “acaben” los recursos, pero su existencia no garantiza su viabilidad de extracción, ya que la situación actual pronostica que la inversión será mayor que la retribución, lo que trae problemas económicos. Sumado a esto, está la contaminación ambiental a causa de la emisión de gases (monóxido de carbono, dióxido de azufre y óxido de nitrógeno) los cuales contribuyen a la formación y deposición de la lluvia ácida, afectando esta la vida acuática, el daño en bosques y la corrosión en estructuras, la explotación también lleva la invasión de hábitats naturales para la construcción de campos de explotación y minería, por tanto, se hace más que necesario, obligatorio buscar soluciones.

Como una alternativa se presentan las fuentes de energía renovable, fruto de recursos inagotables o de fácil restablecimiento. La energía solar clasifica en este grupo, considerando el sol como una fuente infinita de energía, brindando diversas aplicaciones y utilidades. Aunque la carga energética obtenida mediante esta fuente no es muy alta comparada con las tradicionales (combustibles fósiles) o de ser posible, debería implementarse en gran masa cualquiera de los sistemas térmicos solares. Pero su uso se ha fortalecido en diferentes áreas, como la climatización de recintos y piscinas o calentadores de uso doméstico. Con ello se hacen aportes pequeños individualmente, pero significativos globalmente, que hacen presagiar un uso masivo a futuro. Así mismo, es posible la adaptación de sistemas de energía solar con sistemas industriales.

Como aporte, este proyecto propone hacer el estudio preliminar para la implementación de un sistema térmico solar, en el proceso de precalentamiento del agua de alimentación de una caldera pirotubular. Lo cual, posibilita el uso de energías renovables y mejoras en el sistema térmico, ya que “por cada 10°F de aumento en la temperatura del agua de alimentación de la caldera, su eficiencia mejora en 1%”³. El comportamiento de la eficiencia térmica de la caldera,

² ANH, Agencia Nacional de Hidrocarburos.

³ ECOCARBON, Universidad Pontificia Bolivariana. Calderas a Carbón. Medellín, Colombia: Editorial Universidad Pontificia Bolivariana, 1998. 104p. ISBN 958-696-017-X

dictaminará la factibilidad de la aplicación del precalentamiento. Además, un análisis financiero, determinará la viabilidad del mismo.

2. JUSTIFICACION

La principal fuente energética en el mundo son los combustibles fósiles (petróleo, carbón, gas natural), para su producción es necesario millones de años de transformación en la naturaleza, su extracción es posible a un alto costo. La explotación y uso masivo, ha llevado al agotamiento y contaminación ambiental, dos consecuencias casi irreparables. “Desde los años 80 se consume más petróleo que el que se descubre”⁴. En los últimos años Centro y Suramérica han incrementado su participación en la producción de petróleo, donde Colombia represento el 12,8% de obtención en esta región al término del 2012.

Como alternativa, están las fuentes de energía renovable, provienen de fuentes inagotables o de fuentes con capacidad de regeneración “rápida”. La energía solar, pertenece a este grupo de energías renovables, considerando el sol una fuente infinita de energía. Es posible, que la energía solar no supla la demanda energética mundial actualmente, por ello una sustitución total de los combustibles fósiles no es dable, pero el porcentaje que pueda contribuir con su implementación es realmente importante, puesto que representaría disminución en el uso de combustibles, y por consiguiente reducción de gases contaminantes, producto de la combustión. Alemania es uno de los países que ha implementado el uso de energías renovables. El 8 de mayo fue un día especial en este país, se registró que casi el 90% de la energía requerida fue abastecida por la energía solar y la eólica, una repuesta favorable, aunque como se depende directamente del cambio climático, no se puede asegurar una repetición. En América Latina, se ha dado un crecimiento rápido del uso de energías renovables, “19 de 20 países han establecido al menos un tipo de objetivo de energías renovables a nivel nacional”⁵, incluyéndose Colombia. En la Guajira, la fundación Cerrejon⁶ e Hybrytec⁷ instaló un Sistema de Bombeo solar para el suministro de agua, el cual beneficia a 1.219 personas de las comunidades Wayuu.

Para un avance en el uso de energías renovables, debe estar involucrado el gobierno, comprometido con el avance del país. Investigaciones y estudios para la aplicación de estas en Colombia son la base, ya que es indispensable conocer

⁴ FERNÁNDEZ, Ramón. El inicio del fin de la era de los combustibles fósiles. Madrid. 3p.

⁵ INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CANARIAS, S.A. Energías renovables y eficiencia energética. 1 ed. Copyright, 2008. 16 p. ISBN 978-84-69093-86-3.

⁶ Cerrejón es un complejo de minería y transporte integrado en La Guajira.

⁷ Hybrytec es una empresa de diseño, comercialización e instalación de Energía Solar fotovoltaica y térmica.

el comportamiento, beneficios y desventajas. Además, es necesario un estudio de viabilidad, analizar la relación costo-beneficio dependiendo de la aplicación que se le va a dar, así, se tiene certeza de la funcionalidad.

En este proyecto se quiere analizar la influencia del precalentamiento del agua de alimentación mediante energía solar en la eficiencia de una caldera pirotubular en estado estacionario, contribuyendo con el crecimiento de las aplicaciones de energía renovables y con ello mejorar el rendimiento de la caldera, a través del uso de herramientas como el modelado y la simulación, las cuales permiten el estudio matemático y computacional de diversos sistemas. La aplicación de ello para el sistema solar térmico y caldera pirotubular en conjunto, facilitará el conocimiento del funcionamiento y la interacción directa de importantes variables en cada uno de sus procesos, tomando como entes principales la presión, temperatura y combustible(gas natural) de la caldera, ligado a ello la capacidad energética del sistema térmico solar para proveer el cambio de temperatura necesaria en el agua de alimentación, sus cambios, condiciones a través del tiempo y finalmente cuando alcance el estado estable. También, hará posible la evaluación de viabilidad económica de la energía renovable implementada. Todo esto, sin un montaje físico, aunque el conocimiento previo sobre el sistema que se va a trabajar, datos experimentales como punto de referencia (sistema de caldera pirotubular sin precalentamiento de agua de alimentación), programas de cálculo para calderas pirotubulares⁸ ya existentes y validados, aspectos y leyes físicas elementales que se manifiestan en este, son la base para un modelado y simulación acertado y realista.

Además de la aplicación de herramientas tecnológicas útiles, se promueve el uso de energías renovables, en pro de la mejora de sistemas industriales y un entorno libre de gases contaminantes.

⁸ GELVEZ AROCHA, Omar Armando. Programación para el cálculo de una caldera pirotubular. Proyecto de clase Sistemas Térmicos. Bucaramanga, Colombia :Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica.

3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACION

3.1 OBJETIVO GENERAL

De acuerdo a los propósitos de la misión de la Universidad Industrial de Santander, de promover una cultura orientada al uso eficiente de la energía y de energías renovables, se propone analizar la influencia del precalentamiento del agua de alimentación mediante energía solar en la eficiencia de una caldera pirotubular horizontal de 2 pasos, usando el modelado y la simulación como herramientas para el estudio en conjunto de los sistemas.

3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Caracterizar el sistema térmico solar y caldera pirotubular que será estudiado (potencia de caldera: 20HP, salida de vapor (@212°F;100°C):690[Lb/H], flujo de combustible,gas:840 [CFH])⁹.
- Modelar matemáticamente y simular en conjunto el sistema térmico solar y caldera pirotubular en régimen estacionario de operación.
- Validar los resultados obtenidos con datos experimentales¹⁰ o con un programa de cálculo para calderas pirotubulares, sin precalentamiento.
- Evaluar la incidencia del precalentamiento del agua de alimentación y los cambios de presión sobre el consumo de combustible y la eficiencia de la caldera.
- Realizar un análisis financiero para establecer la viabilidad de una posible implementación del sistema solar térmico.

4.MARCO TEORICO

⁹ Catálogo Caldera Serie 200 Hurst Boiler and Welding Company.

¹⁰ Datos experimentales del fabricante, Catálogo Chromagen.

4.1 RADIACION SOLAR

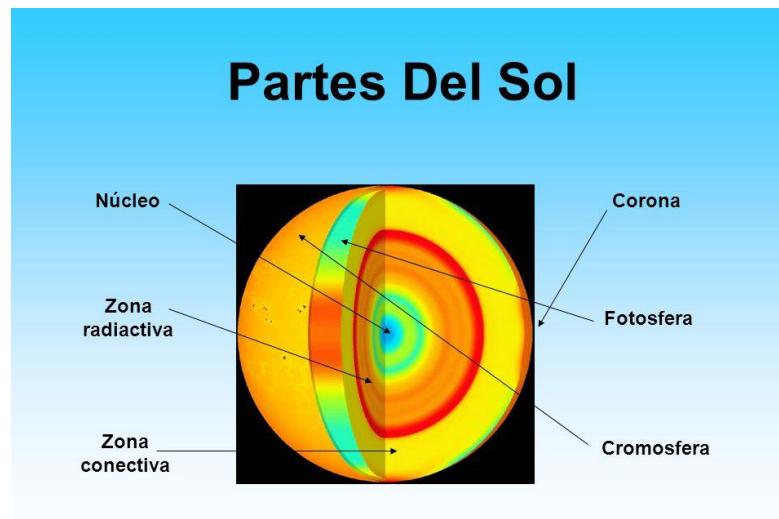
4.1.1 El Sol : Calor, vida, iluminación natural, son algunos de los beneficios del sol. Una estrella gigantesca. Su diámetro de 1,4 millones de kilómetros, una temperatura de superficie que alcanza los 5.500 grados centígrados y en el núcleo más de 15,5 millones de grados centígrados, son las imponencias de este.

En la región de 0 a 0,23R (R=radio del sol) se considera que se genera el 90% de energía con el 40% de la masa del sol, es el *núcleo* donde se produce la fusión nuclear debido a las temperaturas altas. Los fotones son las partículas que transportan la energía su viaje al exterior tarda alrededor de 100.000 años, debido a que son absorbidos y redireccionados. A medida que se avanza a la superficie hay descenso de la temperatura y la densidad, en la zona de 0,7 a 1,0R desde el centro se ubica la zona convectiva, donde la temperatura se encuentra aproximadamente 5000K y densidad de 10-5kg/m³.

La fotosfera es la capa externa de la zona convectiva y el borde es de baja densidad pero definido. Los gases que la componen son capaces de absorber y emitir un espectro continuo de radiación. Es la fuente de la mayor parte de la radiación solar y es la parte del sol que se puede observar desde la tierra.

La cromósfera está constituida por gases enrarecidos y campos magnéticos, solo se puede ver en un eclipse total de sol, de color rojizo, temperatura alta y densidad baja.

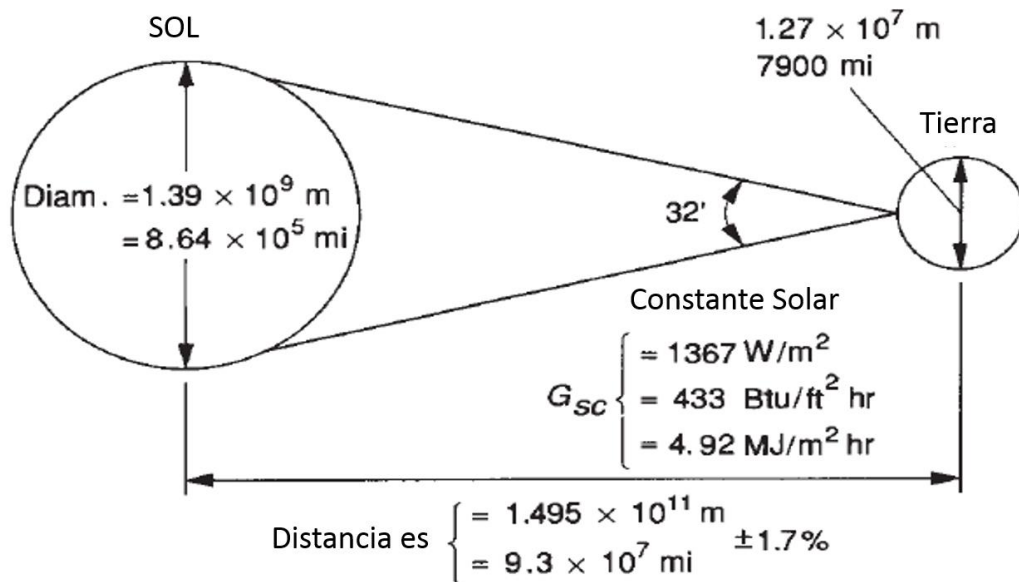
Figura 1. Partes del sol.



Fuente: astronomiaomg.blogspot.com.co

- Constante solar : “La constante solar [Gsc] es la energía del sol por unidad de tiempo recibida en un área unitaria de superficie perpendicular a la dirección de propagación de la radiación a una distancia media tierra-sol fuera de la atmósfera”¹¹.

Figura 2. Relación Sol-Tierra.



Fuente: Solar Engineering of Thermal Processes.

La constante solar puede adoptar diferentes valores que después de experimentos y mediciones por diferentes autores fueron dadas. El Centro Mundial de Radiación (WRC) ha adoptado un valor de 1367 W / m^2 como se muestra en la Figura 2, con un error estimado de 1%, con base en el criterio del libro Solar Engineering of Thermal Processes este es el valor adoptado para el presente proyecto.

4.1.2 Definiciones de los componentes de la energía solar

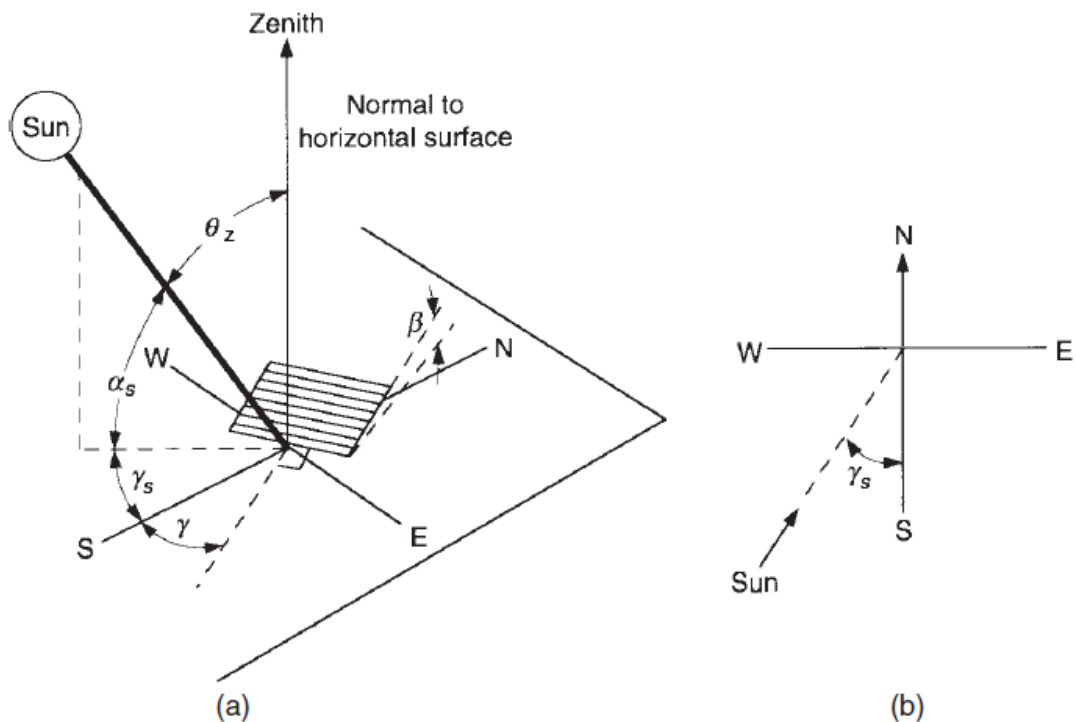
- Radiación del haz: La radiación solar recibida del sol sin haber sido dispersada por la atmósfera. (La radiación del haz se refiere a menudo como radiación solar directa; Para evitar la confusión entre los subíndices directos y difusos, utilizamos el término haz radiación.)
- Radiación difusa: La radiación solar recibida del sol después de su dirección ha sido cambiada por la dispersión de la atmósfera.

¹¹ DUFFIE, John A. Beckman, William A. Solar Engineering of Thermal Processes. 4 ed. Hoboken, New Jersey. Canadá :Copyright, 2013.

- Radiación solar total: La suma del haz y la radiación solar difusa en una superficie.
- Irradiancia, W / m^2 La velocidad a la que la energía radiante es incidente sobre una superficie por unidad de área de superficie. El símbolo G se utiliza para la irradiación solar, con subíndices apropiados para radiación de haz, difusa o espectral.

4.1.3 Dirección de radiación del haz: La orientación del rayo de la radiación solar con respecto a un plano fijo o en movimiento con la tierra, es decir la posición del sol en dependencia con este plano se describe con relaciones geométricas expresadas en ángulos como se muestra en la Figura 3 .

Figura 3. (a) Ángulo de zenit, pendiente, ángulo de azimut de superficie y ángulo de azimut solar para una inclinación superficie. (b) Vista en planta que muestra el ángulo del azimut solar.



Fuente: Solar Engineering of Thermal Processes.

Descripción de ángulos de posición:

- Latitud (ϕ), la posición angular al norte o al sur del ecuador, norte positivo; $-90^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$.
- Declinación (δ), la posición angular del sol al mediodía solar (es decir, cuando el sol está en el meridiano local) con respecto al plano del ecuador, norte positivo; $-23.45^\circ \leq \delta \leq 23.45^\circ$.
- Pendiente (β), el ángulo entre el plano de la superficie en cuestión y la horizontal; $0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$. ($\beta > 90^\circ$ significa que la superficie tiene un componente orientado hacia abajo).
- Ángulo de azimut de superficie (γ), la desviación de la proyección en un plano horizontal de la normal a la superficie desde el meridiano local, con cero debido al sur, al este negativo y al oeste positivo; $-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$.
- Ángulo de hora (ω), el desplazamiento angular del sol al este o al oeste del meridiano local debido a la rotación de la Tierra sobre su eje a 15° por hora; Mañana negativo, tarde positivo.
- Ángulo de incidencia (θ), el ángulo entre la radiación del haz sobre una superficie y el normal a esa superficie.

Se definen ángulos adicionales que describen la posición del sol en el cielo:

- Ángulo cenital (θ_z), el ángulo entre la vertical y la línea al sol, es decir, el ángulo de incidencia de la radiación del haz sobre una superficie horizontal.
- Ángulo de altitud solar (α_s), el ángulo entre la horizontal y la línea al sol, es decir, el complemento del ángulo cenital.
- Ángulo de azimut solar (γ_s), el desplazamiento angular desde el sur de la proyección de la radiación del haz en el plano horizontal, que se muestra en la imagen 3. Desplazamientos al este del sur son negativos y al oeste del sur son positivos.

La declinación δ se halla a partir de la ecuación aproximada de Cooper (1969)¹²

$$\delta = 23,45 * \text{sen}\left(360 * \frac{284 + n}{365}\right)$$

Siendo n el día del año.

En la Tabla 1 se muestra como hallar de forma practica los valores de n , con base en el día del mes que se encuentre que corresponde al valor de i .

¹² Ibid.

Tabla 1. Días Promedios Recomendados para Meses y Valores de n por Meses.

Mes	n para cada valor de i	Para un día promedio del mes		
		Día del Mes	Fecha	n
Enero	i	17	17	-20.9
Febrero	31 + i	16	47	-13.0
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	-23.0

Fuente: Solar Engineering of Thermal Processes. (No usar para $\phi > 66,5$).

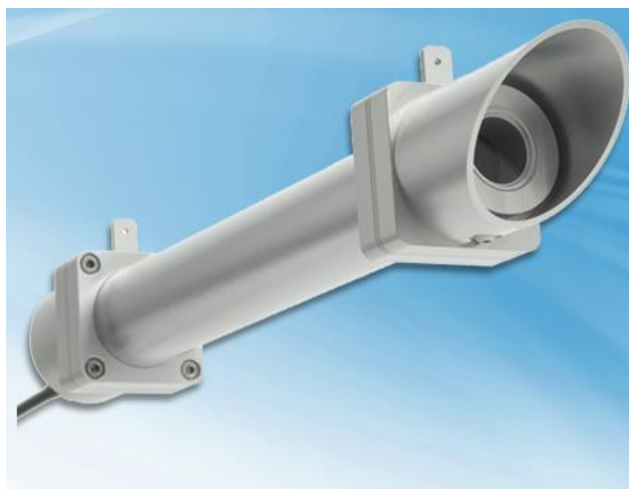
Para las superficies horizontales, el ángulo de incidencia es el ángulo cenital del sol, θ_z . Su valor debe estar entre 0° y 90° cuando el sol está por encima del horizonte. Para esta situación $\beta=0$

$$\cos\theta_z = \sin\phi * \sin\delta + \cos\phi * \cos\delta * \cos\omega$$

Tomado de Solar Engineering of Thermal Processes.

4.1.4 Radiación solar disponible . *Medida de la radiación directa* :El pirheliómetro es el instrumento de medición para la radiación solar directa. La conversión del calor obtenido a través de la recepción de la luz del sol en una señal eléctrica que puede ser monitoreada.

Figura 4. Pirheliómetro.



Fuente: Catalogo SENSOVANT.

- Medida de la radiación solar global y difusa: La radiación global incluye la recibida directamente del disco solar y también la radiación celeste difusa dispersada al atravesar la atmósfera. El instrumento necesario para medir la radiación global es el piranómetro. Este se utiliza a veces para medir la radiación incidente sobre superficies inclinadas y se dispone en posición invertida para medir la radiación global reflejada (albedo). Para medir solamente la componente difusa de la radiación solar, la componente directa se cubre por medio de un sistema de pantalla o sombreado.

Figura 5. Piranómetro radiación solar Global de alta precisión clase A



Fuente: catalogo SENSOVANT.

4.1.4.3 Radiación extraterrestre en superficie horizontal. A continuación se muestra el método de cálculo para la radiación extraterrestre tomado de Solar Engineering of Thermal Processes.

En cualquier momento, la radiación solar incidente en un plano horizontal fuera de la atmósfera es la radiación solar incidente normal dada :

$$G_o = G_{sc} * (1 + 0,033 * \cos\left(\frac{360n}{365}\right)) * (\cos\phi * \cos\delta * \cos\omega + \text{sen}\phi * \text{sen}\delta)$$

A menudo es necesario para el cálculo de la radiación solar diaria tener la radiación extraterrestre diaria integrada en una superficie horizontal, H_o . Esto se obtiene integrando la ecuación anterior durante el período comprendido entre el amanecer y la puesta del sol. Si G_{sc} es en watts por metro cuadrado, H_o en joules diarios por metro cuadrado por día es

$$H_o = \frac{24*3600G_{sc}}{\pi} * (1 + 0,033 * \cos\left(\frac{360n}{365}\right)) * (\cos\phi * \cos\delta * \text{sen}\omega_s + \frac{\pi\omega_s}{180} \text{sen}\phi * \text{sen}\delta)$$

- Componentes de la radiación global (Directa y Difusa): Los estudios de los datos de radiación diaria disponibles han demostrado que la fracción media que es difusa, $\frac{H_d}{H}$, es una función de K_T , el índice de claridad del día.

$$K_T = \frac{\text{radiacion total diaria}}{\text{radiacion extraterrestre diaria}} = \frac{H}{H_0}$$

Con la siguiente correlación de Collares-Pereira and Rabl¹³ se obtiene la relación $\frac{H_d}{H}$:

$$\frac{H_d}{H} = \begin{cases} 0,99 \text{ para } K_T \leq 0,17 \\ 1,188 - 2,272K_T + 9,473K_T^2 - 21,865K_T^3 + 14,648K_T^4 \text{ para } 0,17 < K_T < 0,75 \\ -0,54K_T + 0,632 \text{ para } 0,75 < K_T < 0,80 \\ 0,2 \text{ para } K_T \geq 0,80 \end{cases}$$

4.2 ENERGIAS RENOVABLES

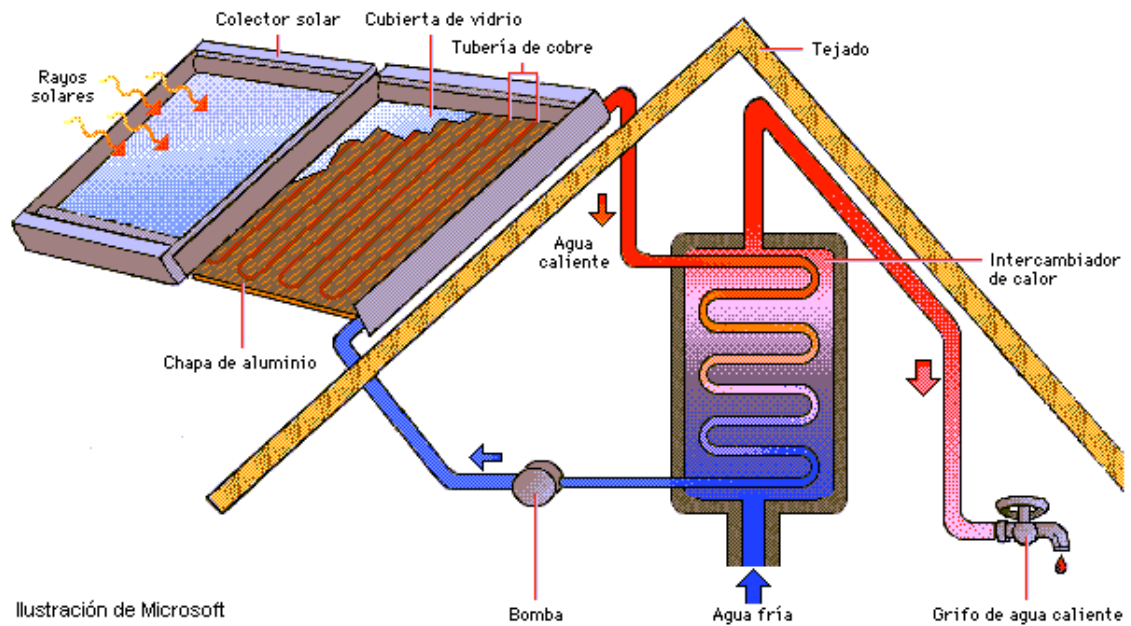
Son fuentes energéticas con potencial muy grande o de fácil regeneración, que se obtienen continuamente, como la radiación solar. Estas son la energía hidráulica, solar, eólica, geotérmica y las marinas.

4.2.1 Energía solar térmica :El sol es un emisor infinito de energía. La radiación que se recibe en el planeta tierra es energía, la cual puede ser captada, transformada y usada de diversas formas. Esta fuente de energía, es cada vez más usada en aplicaciones sencillas, como el calentamiento de agua, calefacción de recintos, pero contribuyen al uso de energías renovables y a la mejora del cambio climático.

La Figura 6, muestra la implementación de un sistema solar térmico (colector placa plana), el cual capta los rayos solares, esta energía es transferida a través de los elementos del sistema al agua que ha perdido su calor en el intercambiador de calor interno en la casa, a la salida el fluido ya ha experimentado un cambio de temperatura y está en condiciones para ingresar de nuevo al intercambiador de calor como fluido caliente.

¹³ Collares Pereira, M. y Rabl, A.(1979) The average distribution of solar radiation. Correlations between diffuse and hemispherical and between daily and hourly insolation values, Solar Energy 22, 155 – 164

Figura 6. Sistema térmico solar (Colector) implementado para el calentamiento de agua para uso doméstico.



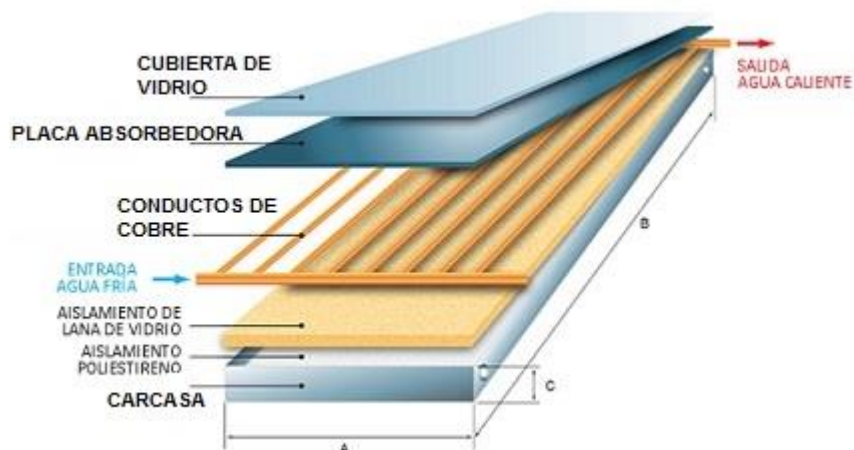
Fuente: www.diariodeciencias.com.ar/energia-solar-fotovoltaica-y-termica-diferencias-y-aplicaciones.

- Sistema solar térmico.

Colector Solar: Los colectores solares son los sistemas a cargo de la conversión de la energía solar en energía térmica.

Partes principales de un colector, se pueden ver en la Figura 7 y se describen a continuación :

Figura 7. Partes principales de un colector.



Fuente: Ingemecánica.

- Placa absorbadora: está compuesto por una placa absorbente y los conductos de fluido térmico. La placa absorbente es la que recibe la radiación solar y se produce la transferencia de calor.
- Circuito de fluido térmico: Conductos de cobre.
- Aislamiento térmico: la pérdida de calor es constante puesto que los colectores están expuestos a la atmósfera, por ello se instala una lámina de aislante térmico entre la cara posterior y la caja, mitigando así las pérdidas.
- Caja: es la estructura en la que se encuentran los componentes del colector.
- Cubierta: es transparente para la propagación de la radiación solar hacia el absorbedor. Esta cubierta disminuye las pérdidas por convección ya que evita el contacto con el aire y pérdidas por radiación.

Clasificación de los colectores. Su clasificación depende del rango de temperatura final que se requiere tenga el fluido:

- Colectores de baja temperatura de trabajo (alcanza un máximo de 50°C). Conformados únicamente por el convertidor (absorbedor), por el circuito de fluido térmico, por el aislamiento térmico y por la caja que contiene todos los componentes. Este tipo de colector también recibe el nombre de captador solar plano no protegido.
- Colectores de media temperatura (alcanza un máximo de 90 °C). tiene la misma composición del colector solar de baja temperatura, adicional una cubierta transparente que limita las pérdidas por convección y parte de radiación y que aumenta el efecto invernadero dentro del colector, lo que hace que se alcancen mayores temperaturas.
- Colector de alta temperatura (hasta 150 °C como máximo). La siguiente evolución en los colectores consiste en añadir otra cubierta entre la anterior y el convertidor y hacer vacío entre las dos. Así se consigue un mayor aislamiento de entre el exterior y el interior y que se alcancen temperaturas aún mayores. En esta clasificación están los colectores de tubos al vacío, concentradores parabólicos.

Tanque de acumulación (Acumulador): Es el recinto donde se recibe y se almacena el agua que pasa por el colector. El mercado ofrece diferentes tipos de acumulador que dependen del sistema térmico que se quiera implementar (termosifónico, circulación forzada).

Tubería y accesorios de conexión: Las tuberías para el transporte del fluido son flexibles, con soporte de temperaturas altas, además de tener un recubrimiento

aislante que disminuya la pérdida de calor en el proceso. Los accesorios son válvulas, elementos roscados que permiten el funcionamiento del sistema térmico.

Bomba: Este elemento aplica solo para sistemas térmicos solares de circulación forzada, en los cuales es necesario una bomba para que sea posible la circulación del fluido porque su montaje no permite una circulación termosifónica.

Controles: Es necesario tener controles para caudal, controles de temperatura que permiten el monitoreo y el funcionamiento óptimo del sistema.

Aplicación general.: En gran parte de los procesos industriales, la transferencia de calor es esencial para la realización de diferentes tareas. Por ejemplo, es común el uso de fluidos calientes (aire, agua, vapor), con rangos de temperatura variados, que van desde bajas (30 a 40°) o temperaturas altas (más de 400°). Actualmente los sistemas solares térmicos se encargan de la elevación de la temperatura en estos fluidos, ahorrando dinero y disminuyendo la emisión de gases contaminantes.

La energía solar térmica está capacitada para proveer una amplia gama de temperaturas. Cuando se requieren temperaturas hasta de 100°C (consideradas bajas) es posibles con la instalación de colectores solares, los cuales están divididos en planos o de tubos al vacío, una ventaja de este sistema térmico solar, es su implementación en espacios libres de no uso, como techos. Para altas temperaturas, por encima de 200°C, están los sistemas de concentración de rayos solares, aptos para proporcionar temperaturas elevadas, supliendo la necesidad a un bajo costo pero un nivel mayor de ejecución.

4.2.2 Situación actual: Las energías renovables van tomando fuerza de la mano con la concientización de la población mundial, ya que se obtiene energía sin un desgaste del medio ambiente, lo que promueve un mundo sostenible. China es el país que comanda en producción y avance, son los primeros en implementar energía eólica marina como se observa en la Figura 8, en general es una globalización de energías renovables.

Según Renewables 2015, Global estatus Report, a finales de 2014 las energías renovables representaron *el 27,7% de la capacidad generadora de energía del mundo*, y fueron las responsables de generar más de 7.7 millones de puestos de trabajo a nivel global.

En Suramérica, Brasil es el país que lidera el uso de energías renovables, seguido de México, Chile y Uruguay que han realizado inversiones de mas de US\$1.000 millones, convirtiéndose Uruguay en el país con mayor porcentaje de energía eólica.

Colombia se ubica entre los países que menos ha invertido en la implementación de energías limpias, pero se augura un crecimiento. Se cuenta con empresas

como Hybritec que ofrecen servicios usando energía solar y que ya han puesto en marcha proyectos. Empresas de construcción de vivienda que también se han acogido a la implementación de energías limpias, en cuanto al aprovechamiento del aire, de la fuente lumínica natural, a la mitigación de cargas energéticas en los edificios, intenciones que van aportando al crecimiento del país.

Figura 8. Energía eólica marina.



Fuente: www.evwind.com/2017/01/05/china-subraya-proteccion-ecologica-en-desarrollo-de-energia-eolica-marina.

4.3 CALDERAS

Las Calderas, también llamadas Generadores de Vapor, son instalaciones industriales en las que el calor de un proceso de combustión se transfiere al agua, para calentarla o producir un cambio de fase líquido-vapor, para ello trabaja a temperaturas altas y presiones mayores a la atmosférica, posteriormente ser utilizada en diversos campos.

4.3.1 Proceso de la combustión en la caldera :La combustión, es “el proceso de reacción química exotérmica auto mantenida por conducción de calor y difusión de especies”¹⁴. Este es necesario para la obtención de la energía del carbón, petróleo y gas natural. Puede ser combustión completa, se consume todo el carbono (C) y el hidrógeno (H) del combustible, y combustión estequiométrica aquella en la que se utiliza el volumen exacto de aire (oxígeno) o todo el oxígeno presente en el aire no es capaz de oxidarse con el combustible para producir una reacción de combustión completa; los productos no oxidados que se derivan de esta combustión se llaman inquemados, dando origen a la combustión incompleta.

En la caldera el combustible entra en el horno, desde los silos dosificadores, mediante alimentadores que permiten la distribución. El aire requerido para la combustión ingresa en el horno por medio de un ventilador. El aire de combustión puede ser precalentado, para un aumento en el rendimiento de la combustión, en ocasiones se hace aprovechando residuos de calor del proceso. Los gases de combustión hacen su paso por el haz tubular (caldera pirotubulares) se produce el intercambio de calor con el agua la cual se encuentra en el tubo hogar, y se dirigen luego a la caja de humos para su escape.

4.3.2 Proceso de cambio de fase: El fenómeno de cambio de fase aparece en un sistema que pierda la condición de estabilidad¹⁵ .

Al recibir o entregar un valor específico de energía (calor latente), una sustancia pura saturada puede sufrir una transformación física, experimentando reordenamiento molecular, adquiriendo y perdiendo propiedades físicas, esto es el cambio de fase. Sólido, líquido y gaseoso son las tres fases en las que se puede encontrar la sustancia.

El cambio de fase de líquido-vapor es el ocurrido en algunas calderas. Cuando las moléculas de un líquido tienen suficiente energía para escapar de la superficie, ocurre el cambio de fase llamado evaporación o vaporización, que es la conversión de líquido a gas. La velocidad con la que se produce este cambio está regida por una temperatura dada y la energía requerida depende de la atracción intermolecular del fluido.

Para que todo lo anterior ocurra el líquido debe pasar por el punto de ebullición, que es la temperatura a la cual la presión de vapor de un líquido es igual a la presión externa, allí es donde se empiezan a formar las primeras burbujas para dar lugar al cambio de fase.

¹⁴ GOMEZ ACEBO, Tomas. Tema 10-Mezcla Reactivas y Combustión. Octubre, 2004. P.1

¹⁵ Continuidad en un comportamiento.

Figura 9. Diagrama Termodinámico T-v de una sustancia pura, proceso ocurrido en la caldera.



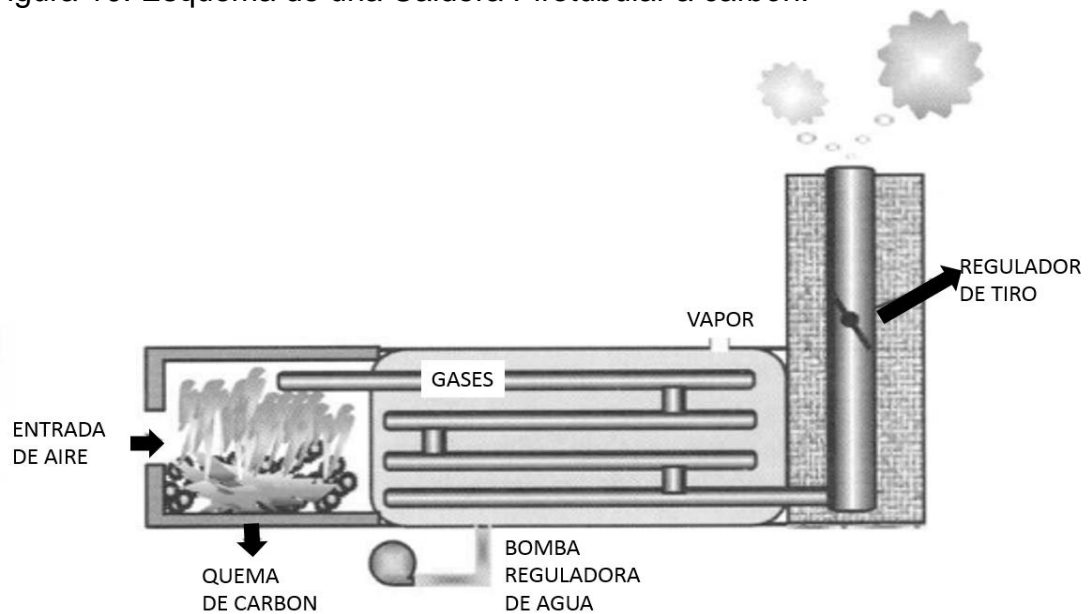
Fuente: www.unet.edu.ve/~fenomeno/F_DE_T-65.htm

4.3.3 Clasificación de las calderas: Se clasifican según diversos criterios, relacionados con la disposición de los fluidos y su circulación, el mecanismo de transmisión de calor dominante, aspectos estructurales, modo de intercambio de calor, la forma del quemado del combustible, forma de alimentación del agua y otros muchos factores.

- Clasificación de acuerdo a la circulación de los fluidos dentro de los tubos de la caldera: Calderas humo tubulares, Calderas Acuotubulares, Calderas Piro tubulares
- Clasificación de acuerdo a presión de trabajo: Calderas de Baja presión, Calderas de media presión, Calderas de alta presión, Calderas supercríticas, Calderas chicas, Calderas medianas, Calderas grandes.
- Clasificación de acuerdo al combustible utilizado Combustibles líquidos, Combustibles gaseosos, Combustibles solidos
- Clasificación de acuerdo a la circulación de agua dentro de la caldera Circulación natural, Circulación asistida, Circulación forzada

4.3.3.1 Caldera piro tubular: Son calderas en las que los gases de combustión circulan por el interior de los tubos y el fluido calo portador por el exterior.

Figura 10. Esquema de una Caldera Pirotubular a carbón.



Fuente: Calderas a Carbón.

Se caracterizan por disponer de tres partes bien definidas:

- Una caja de fuego donde va montado el hogar. Esta caja puede ser de sección rectangular o cilíndrica, es de doble pared, por lo que el hogar queda rodeado de una masa de agua.
- Un cuerpo cilíndrico atravesado, longitudinalmente, por tubos de pequeño diámetro, por cuyo interior circulan los gases calientes.
- Una caja de humos, que es la prolongación del cuerpo cilíndrico, a la cual llegan los gases después de pasar por el haz tubular, para salir hacia la chimenea. Estas calderas trabajan, casi siempre, con tiro forzado, el cual se consigue mediante un chorro de vapor de la misma caldera o utilizando vapor de escape de la máquina.

Su producción es de agua caliente, vapor saturado ó recalentado, según sea el requerimiento. En el primer caso, se les instala un estanque de expansión que permite absorber las dilataciones del agua. En el caso de las calderas de vapor poseen un nivel de agua a 10 o 20 cm sobre los tubos superiores.

Las calderas pirotubulares pueden ser horizontales y verticales, según sea el caso esta será la ubicación de los tubos de humo.

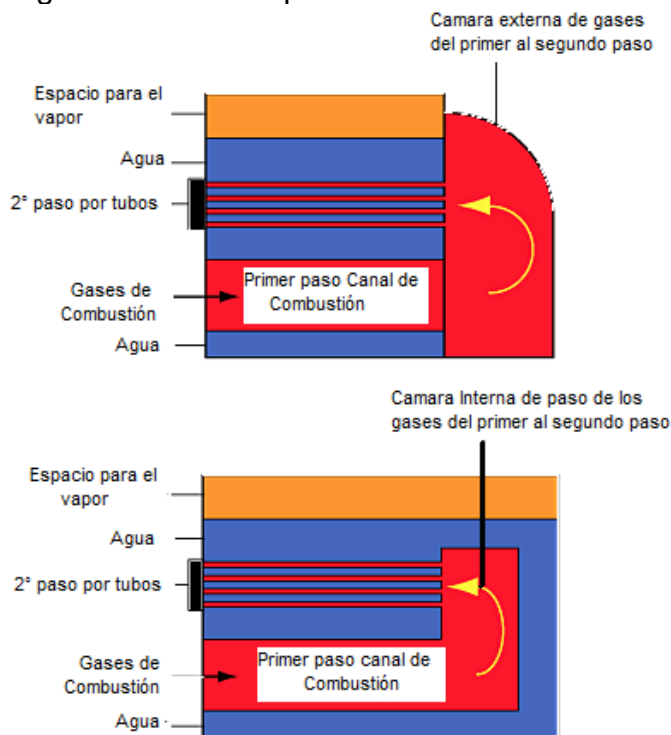
A su vez, pueden ser de uno, dos y hasta tres pasos de gases.

Calderas de dos (2) pasos de gases: En este caso se observa dos vías de paso autónomas para la circulación de los humos productos de la combustión. Se

puede diferenciar una cámara cilíndrica de combustión denominada hogar, localizada en la parte interior de la caldera y rodeada por una pared posterior totalmente refrigerada por agua (cámara húmeda), en donde el área de transferencia de calor es mayor. El cuerpo de la caldera es cilíndrico, con un tubo que es la cámara de combustión principal. Los humos calientes pasan desde el tubo del horno por la parte trasera de la caldera a través de una cámara en ladrillo refractario e ingresan en a una serie de tubos de pequeño diámetro los cuales presentan una gran superficie de calor en contacto externo con el agua. Luego de los dos pasos, los gases de la combustión de la caldera se dirigen a la caja de gases trasera y expulsados al exterior. Las calderas que se basan en este principio se caracterizan por su bajo rendimiento, así como el alto contenido de sustancias contaminantes en sus gases de combustión.

Como se observa en la figura 11, puede ser cámara de gases externa y cámara de gases interna. La cámara de gases interna ofrece ventaja sobre la externa, puesto que el área de transferencia de calor humos-agua es mayor, la eficiencia de la caldera tiende a aumentar.

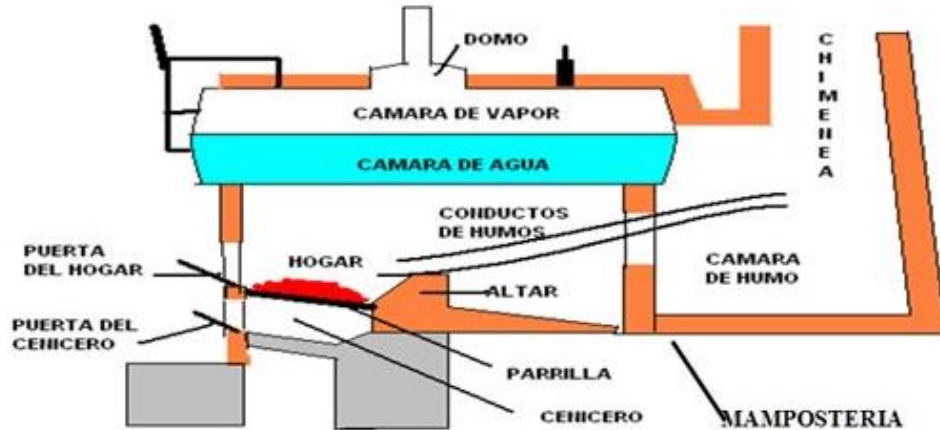
Figura 11. Caldera pirotubular horizontal de dos pasos.



Fuente: datateca.unad.edu.co/contenidos/211618/EXELARNING/leccion_34_calderas.html

4.3.4 Partes fundamentales de una caldera

Figura 12. Esquema básico de las partes de una caldera.



Fuente: www.estrucplan.com.ar/Producciones/entrega.asp?IdEntrega=2953 [consultado Junio 4 de 2016]

- Hogar (cámara de combustión): lugar en donde se produce la combustión.

Los hogares se pueden clasificar en:

Según su ubicación:

Hogar exterior

Hogar interior

Según el tipo de combustible:

Hogar para combustibles sólidos

Hogar para combustibles líquidos y gaseosos

Según su construcción:

Hogar liso

Hogar corrugado

Esta clasificación rige solamente cuando el hogar de la caldera lo compone uno o más tubos a los cuales se les da el nombre de Tubo Hogar.

- Puerta Hogar: Es una pieza metálica, abisagrada, revestida generalmente en su interior con ladrillo refractario o de doble pared, por donde se alimenta de combustible sólido al hogar y se hacen las operaciones de control de fuego. En las calderas que queman combustibles líquidos o gaseosos, esta puerta se reemplaza por el quemador.

- Emparrillado: son piezas metálicas en formas de rejillas, generalmente rectangulares o trapezoidales, que van en el interior del hogar y que sirven de soporte al combustible sólido. Debido a la forma de reja que tienen, permiten el paso del Aire primario que sirve para que se produzca la combustión.

Las parrillas deben adaptarse al combustible y cumplir los siguientes requisitos:

Deben permitir convenientemente el paso del aire, deben permitir que caigan las cenizas, deben permitir que se limpien con facilidad y rapidez, deben impedir que se junte escoria. Los barrotes de la parrilla deben ser de buena calidad para que no se quemen o deformen, deben ser durables. Algunos diseños de parrillas permiten que por su interior pase agua para refrigerarlas y evitar recalentamientos.

- Cenicero: es el espacio que queda bajo la parrilla y que sirve para recibir las cenizas que caen de ésta. Los residuos acumulados deben retirarse periódicamente para no obstaculizar el paso de aire necesario para la combustión. En algunas calderas el cenicero es un depósito de agua.
- Puerta del Cenicero: Accesorio que se utiliza para realizar las funciones de limpieza del cenicero. Mediante esta puerta regulable se puede controlar también la entrada del aire primario al hogar.
- Altar: es un pequeño muro de ladrillo refractario, ubicado en el hogar, en el extremo opuesto a la puerta del hogar y al final de la parrilla, debiendo sobrepasar a ésta en aproximadamente 30 cm. El objetivo del altar es impedir que al avivar, cargar o atizar los fuegos tiren partículas de combustibles o escoria al primer tiro de los gases. El altar forma también el cierre interior del cenicero. Imprimir a la corriente de aire de la combustión una distribución lo más uniforme posible y una dirección ascensional vertical en todo el largo y ancho de las parrillas. Restringir la sección de salida de los gases calientes aumentando su velocidad, lo cual facilita su mezcla y contacto íntimo con el aire, haciendo así que la combustión sea más completa.
- Mampostería: Se llama mampostería a la construcción de ladrillos refractarios o comunes que tiene como objeto: Cubrir la caldera para evitar pérdidas de calor al exterior. Guiar los gases y humos calientes en su recorrido.

Para mejorar el aislamiento la mampostería se dispone, a veces, en sus paredes de espacios huecos (capas de aire) que dificultan el paso de calor al exterior.

En algunos tipos de calderas, se ha eliminado totalmente la mampostería de ladrillo, colocándose solamente aislamiento térmico en el cuerpo principal y cajas de humo.

Para este objeto se utilizan materiales aislantes, tales como lana de vidrio recubierta con planchas metálicas.

- **Conductos de Humos:** es aquella parte de la caldera por donde circulan los humos y los gases calientes que se han producido en la combustión, en estos conductos se realiza la transmisión de calor al agua que contiene la caldera. En las calderas ígneo tubulares, estos conductos (tubos) deben instalarse de modo que su extremo superior quede a 10 cm (4 ") por debajo del nivel mínimo de agua de la caldera.
- **Caja de Humo:** Corresponde al espacio de la caldera en el cual se juntan los humos y gases después de haber entregado su calor y antes de salir por la chimenea.
- **Chimenea:** es el conducto de salida de los gases y humos de la combustión hacia la atmósfera, los cuales deben ser evacuados a una altura suficiente para evitar perjuicios o molestias a la comunidad. Además, tiene como función producir el tiraje necesario para obtener una adecuada combustión, esto es, haciendo pasar el aire necesario y suficiente para quemar el combustible, en caldera que usan combustibles sólidos. (Tiraje natural)
Las dimensiones de la chimenea en cuanto a su altura y diámetro estarán determinadas por el tiraje necesario y condiciones de instalación respecto a edificios vecinas. En las calderas modernas existe tiraje artificial en que el movimiento del aire se hace por ventiladores sin descartar, desde luego, los usos de la chimenea.
- **Regulador de Tiro o Templador:** Consiste en una compuerta metálica instalada en el conducto de humo que comunica con la chimenea o bien en la chimenea misma. Tiene por objeto dar mayor o menor paso a la salida de los gases y humos de la combustión.

Este accesorio es accionado por el operador de la caldera para regular la cantidad de aire en la combustión, al permitir aumentar (al abrir) o disminuir (al cerrar) el caudal. Generalmente se usa en combinación con la puerta del cenicero.

- **Tapas de Registro o Puertas de Inspección:** Son aperturas que permiten inspeccionar, limpiar y reparar la caldera. Existen dos tipos dependiendo de su tamaño:
Las puertas de hombres
Las tapas de registro

- Puertas de hombres: Como su nombre lo indica, estas puertas tienen el tamaño suficiente para permitir el paso de un hombre para inspeccionar interiormente la caldera y limpiarla.
- Tapas de Registro: todas las calderas tienen convenientemente distribuidas cierto número de tapas que tienen por objeto inspeccionar ocularmente el interior de las calderas o lavarlas, si es necesario extraer en forma mecánica o manual, los lodos que se hayan acumulado y que no hayan salido por las purgas.

Casi todas las tapas tienen forma ovalada para ajustar de adentro hacia fuera, llevan empaquetadura para su ajuste hermético y un perno central para su apriete. Algunas calderas tienen orificios cilíndricos los cuales se sellan con tapas tornillos.

- Puertas de Explosión: Son puertas metálicas con contrapeso o resortes, ubicadas generalmente en la caja de humos y que se abren en caso de exceso de presión en la cámara de combustión, permitiendo la salida de los gases y eliminando la presión. Solo son utilizables en calderas que trabajen con combustibles líquidos o gaseosos.
- Cámara de Agua: Es el volumen de la caldera que está ocupado por el agua que contiene y tiene como límite superior un cierto nivel mínimo del que no debe descender nunca el agua durante su funcionamiento. Es el comprendido del nivel mínimo visible en el tubo de nivel hacia abajo.
- Cámara de Vapor: es el espacio o volumen que queda sobre el nivel superior máximo de agua y en el cual se almacena el vapor generado por la caldera.

Mientras más variable sea el consumo de vapor, tanto mayor debe ser el volumen de esta cámara.

En este espacio o cámara, el vapor debe separarse de las partículas de agua que lleva en suspensión. Por esta razón, algunas calderas tienen un pequeño cilindro en la parte superior de esta cámara, llamado "domo" y que contribuye a mejorar la calidad del vapor.

- Cámara de Alimentación de Agua: Es el espacio comprendido entre los niveles máximos y mínimos de agua. Durante el funcionamiento de la caldera se encuentra ocupado por agua y/o vapor, según sea donde se encuentre el nivel de agua.

4.3.5 Sistemas y elementos auxiliares una caldera. Sistema de agua de alimentación: Los generadores de vapor (conjunto caldera y accesorios)¹⁶ además del sistema de combustión que es el que da energía para el intercambio de calor y lograr el cambio de estado del agua, requieren de un sistema de alimentación de agua para complementar este proceso.

El sistema de agua de alimentación en este proyecto es el que se modifica, ya que el objetivo es el análisis de la influencia del precalentamiento del agua de alimentación mediante energía solar en la eficiencia de una caldera piro-tubular, es decir que adicional a la planta de tratamiento de purificación hay un tratamiento térmico para precalentamiento.

Elementos del sistema de agua de alimentación

Tratamiento de agua: el agua de suministro para las calderas debe tener un tratamiento de purificación antes del ingreso, por el contenido de impurezas y los problemas que se dan por estas. Para la purificación existen diferentes procedimientos: físicos, químicos, eléctricos, térmicos y mixtos. Adicional, se implementan tratamientos térmicos con el fin de precalentar el agua antes del ingreso a la caldera, para mejoras del rendimiento.

Tratamiento térmico: el calentamiento del agua es posible apoyado en diferentes elementos. Calentadores de alta y baja presión, desgasificadores que además purifican, economizadores que hacen uso de los humos producto de la combustión.

En este caso el calentamiento del agua es con un Sistema térmico solar, el cual interviene después del tratamiento de purificación.

Los beneficios del calentamiento de agua de alimentación antes de su entrada a la caldera, se reduce el consumo de calor de alta temperatura producido por la combustión, ya que evita el calentamiento de agua fría (temperatura ambiente) hasta la temperatura de ebullición.

La caldera trabaja con mas equilibrio en las temperaturas de los elementos internos, disminuyendo tensiones termicas en estos.

Tanque de alimentación: el agua de alimentación tiene un lugar de llegada y acumulación antes del ingreso a la caldera. Se tiene como tanque de alimentación, el tanque de acumulación perteneciente al sistema térmico solar, de este se hace el suministro de agua a la caldera.

Bomba de alimentación: para la demanda de agua requerida por la caldera para la producción de vapor óptima está la bomba, encargada de la impulsión del agua con las características exigidas por la caldera.

Generalmente para el suministro de agua de alimentación de las calderas se usan bombas tipo centrifuga y tipo turbina. La selección correcta de la bomba

¹⁶ACHS. Descripción de calderas y Generadores de vapor. P.3

está sujeta a operaciones intermitentes o continuas de las calderas, siendo tipo turbina o tipo centrifuga correspondientemente.

La consideraciones para esta selección son:

- Operación continua o intermitente: para el proyecto se utiliza una caldera pirotubular, las bombas para el agua de alimentación de estas calderas operan de forma intermitente, ya que existe un control de nivel de agua de la caldera el cual enviará una señal de pare o arranque según la altura del agua.
- Temperatura del agua de la succión: el agua de alimentación de la caldera adicional al proceso de tratamiento tiene un precalentamiento, por tanto, la bomba debe operar en perfectas condiciones a la temperatura de 70°.
- Capacidad: es el caudal que la bomba provee.
- Presión de descarga: la presión de descarga es igual a la presión de operación de la caldera mas las perdidas de la tubería, ya que la conexión será directamente a la caldera.
Se debe asegurar que la presión de descarga sea siempre mayor que la presión de operación de la caldera.
- Carga neta de succión positiva requerida (NPSH): altura total absoluta de succión en cm (o pies) corregida al eje impulsor menos la presión de vapor líquido en cm (o pies) absolutos. La NPSH hace referencia a un análisis de las condiciones de succión de la bomba, para saber si el agua se vaporizara en el punto de menor presión de la bomba. Se debe evitar la cavitación¹⁷ manteniendo el fluido en estado líquido, de lo contrario el funcionamiento no es correcto y la presión, capacidad y eficiencia de la bomba se ven afectadas negativamente.

Válvula de retención entrada caldera: en las paradas se debe obstruir el paso de agua debido a la diferencia de presión hidrostática, lo anterior es la función de la válvula de retención, esta debe ser seleccionada específicamente para la entrada de agua a las calderas.

Nivel de agua: las calderas pirotubulares tienen un nivel máximo y mínimo permitido de agua para tener un funcionamiento óptimo, el cual se controla mediante sistemas de medición que dan señales para permitir o suspender la alimentación de agua según sea el caso.

Purgas: la eliminación de impurezas en el agua no se da en su totalidad, el tratamiento químico del agua altera el tipo de impurezas y se presenta un aumento del nivel de solidos disueltos.

En el proceso de evaporación del agua en la caldera, la concentración de solidos disueltos aumenta, como consecuencia el agua de la caldera tiene salida con el

¹⁷ "Formación de burbujas de vapor o de gas en el seno de un líquido, causada por las variaciones que éste experimenta en su presión."

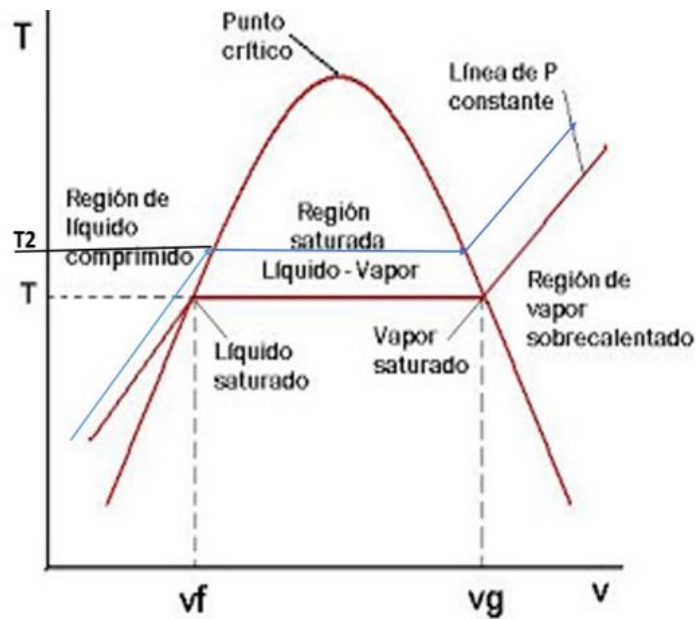
vapor y con ello problemas de corrosión y acumulación de depósitos en las superficies de transferencia de calor.

El drenaje (o purga) periódicamente del agua de la caldera, y reemplazo de esta por agua de alimentación "limpia" permite limitar el nivel de concentración de sólidos disueltos.

Para realizar esta tarea se implementan válvulas, equipos de control y transporte específicos, ya que un exceso de purgas también significa pérdida de energía en la caldera.

La alimentación de agua para la caldera con agua caliente logra menor uso de combustibles, puesto que es más fácil alcanzar una temperatura de ebullición del agua a la presión de trabajo de la caldera, como se muestra en la Figura 13, para una temperatura de sustancia T_2 la energía necesaria para llevarla al estado de vapor, es menor que la usada para una temperatura T .

Figura 13. Diagrama termodinámico T-V



Sistema de recolección de condensados: Los condensados fueron aguas residuales, pero el ahorro de combustible y la conservación del medio ambiente modificaron esto. Ahora, se implementa un sistema de recolección de condensados que permite la acumulación y el reintegro de estos al ciclo de producción de vapor de la caldera.

Combustibles de la caldera: Los combustibles de las calderas se pueden elegir de varios tipos, el carbón, el petróleo, el gas. Combustibles a partir de residuos vegetales llamados biomasa están siendo implementados, lo cual es un aporte a la conservación del medio ambiente, ya que en su combustión no generan agentes agresivos.

Tipos de Combustibles: Carbón, petróleo y gas son los tipos más comunes de combustibles usados para calderas de vapor. En la actualidad se implementan, residuos industriales o comerciales, como combustible.

- El Carbón: es un combustible orgánico formado por acumulación de restos vegetales. Es el combustible fósil al que se le dió mayor uso como fuente de energía, por su extensa disponibilidad y bajo costo, en la actualidad es lo contrario, el carbón es escaso y costoso.

La clasificación de los carbones se basa en propiedades como la composición, la capacidad calorífica, la estructura, criterios físicos como el tamaño, apariencia y reacción cuando se expone a condiciones específicas.

La categoría o rango designa el estado alcanzado por un carbón en el curso de la carbonificación: aumenta cuando incrementa la cantidad de carbono fijo y disminuye la cantidad de material volátil y humedad

Tabla 2. Clasificación de carbones según el rango.

CLASE	GRUPO	CARBONO FIJO ¹ %	PODER CALORÍFICO ² (cal/gr)
ANTRACITA	Meta-antracita	> 98	
	Antracita	92 - 98	
	Semi-Antracita	86 - 92	
BITUMINOSO	Bituminoso Bajo Volátil	78 - 86	
	Bituminoso Medio Volátil	69 - 78	
	Bituminoso Alto Volátil A	< 69	7780
	Bituminoso Alto Volátil B	< 69	7220 - 7780
	Bituminoso Alto Volátil C	< 69	6380 - 7220
SUB-BITUMINOSO	Sub-Bituminoso A	< 69	5380 - 6380
	Sub-Bituminoso B	< 69	5280 - 5830
	Sub-Bituminoso C	< 69	4610 - 5280
LIGNITO	Lignito A	< 69	3500 -4610
	Lignito B	< 69	3500

¹ Base seca libre de cenizas - ² Base húmeda libre de cenizas

Fuente: Calderas a carbón.

Los tipos de bituminoso y antracita tienden a ser utilizados como combustible de calderas, aunque su uso está en declive por el alza en los costos.

Carbón y medio ambiente: la explotación del carbón y el producto de su combustión, tiene consecuencias negativas para el medio ambiente y la salubridad humana. Actualmente, los países desarrollados, exigen a las compañías mineras restaurar la zona de explotación cuando finalice. El agua de lixiviación, es decir, el agua residual producto del recorrido por las acumulaciones de mineral, sale de la mina con materiales tóxicos y contaminantes, debe controlarse su retorno cuidadosamente a los ríos y alrededores.

El proceso de combustión del carbón, libera gases nocivos como la lluvia ácida, efecto invernadero, etc. Las emisiones producidas por el carbón contiene un promedio de 1,5% de azufre (S) en peso, pero puede llegar al 3%, dependiendo de donde se extraiga el carbón.

- Crudo de Petróleo: como combustible de calderas se crea a partir de los residuos producidos a partir de petróleo crudo después de que se ha destilado para producir aceites más ligeros como la gasolina, parafina, queroseno, diesel o gasoil. Diversos grados están disponibles, cada uno adecuado para diferentes clasificaciones de la caldera, los grados son los siguientes:

Clase D - diesel o gasóleo.

Clase E - aceite ligero.

Clase F - fuel oil medio.

Clase G - fuel oil pesado.

Las ventajas sobre el carbón incluyen:

Una respuesta más corta de tiempo entre la demanda y la cantidad necesaria de vapor que se genera.

El menor tamaño también significa que la caldera ocupa menos espacio de producción.

Eliminación de Alimentadores mecánicos, lo que reduce la carga de trabajo de mantenimiento.

Contiene sólo trazas de ceniza, lo que elimina el problema de manejo de cenizas

Eliminación. de las dificultades surgidas en la recepción, almacenamiento y manejo de carbón

- Gas: es una forma de combustible de la caldera que es fácil de usar, con muy poco exceso de aire.

Los Gases combustibles están disponibles en dos formas diferentes:

El gas natural: Se utiliza en su estado natural, (a excepción de la eliminación de impurezas), y contiene una alta proporción de metano.

Gas licuado del petróleo (GLP) - Estos son gases que se producen a partir de la refinación de petróleo y se almacenan bajo presión en estado líquido hasta su uso.

Las formas más comunes de GLP de propano y butano.

Las ventajas de la combustión a gas más de gasóleo son: El Almacenamiento del combustible no es un problema, el gas es conducido directo a la sala de calderas.

Sólo una pequeña cantidad de azufre está presente en el gas natural, lo que significa que la cantidad de ácido sulfúrico en los gases de combustión es prácticamente cero.

Aplicaciones

- Industria textil: secadores rotativos, teñido, balanceo y tejido.
- Farmacéuticas: fabricación de medicamentos y componentes, vacunas, vapor
- Industria alimentaria: panaderías industriales, carnicerías, procesos de rendering, fabricación de comida procesada y comida para bebés, bebidas y productos lácteos.
- Industria aceitera: distribución y almacenaje de aceites pesados.
- Industria maderera: procesos de melanina y madera contrachapada.
- Industria cementera: fabricación de piezas de cemento.
- Industria química: reactores y almacenaje.
- Industria automovilística y tratamiento de superficies: acabado del metal, electro depósitos.
- Industria papelera / de impresión: túneles de secado, secado de impresión, cartón ondulado.
- Hospitales / Hoteles: lavandería, cocina.

4.4 HERRAMIENTAS SOFTWARE DE SIMULACIÓN

Las herramientas fundamentales en el proyecto son software que permitirán el modelado y simulación en conjunto del sistema térmico solar y la caldera pirotubular. Estos, permiten el desarrollo del sistema de forma computacional facilitando cálculos, análisis, respuestas del sistema y el comportamiento de forma matemática y gráfica, en el estado transitorio.

4.4.1 Matlab y Simulink :MATLAB es un medio de computación técnica que hace posible la aplicación y realización del cálculo numérico y por medio de simbología de manera rápida y precisa, esta herramienta posee apoyo gráfico y sistemas de visualización con avances que son gran apoyo para el trabajo en el área de la ciencia y la ingeniería.

“MATLAB es un entorno interactivo para el análisis y el modelado que implementa más de 500 funciones para el trabajo en distintos campos de la ciencia”.

MATLAB tiene una aplicación llamada Simulink, la cual permite los diseños de sistemas dinámicos, de cualquier tipo, sencillos o complejos y el modelado y la simulación a través de diagramas de bloques que son un lenguaje de programación sencillo. Simulink permite el estudio de estos sistemas en estado transitorio, aplicación de controles, y aplicaciones de procesamiento de señal digital y telecomunicaciones.

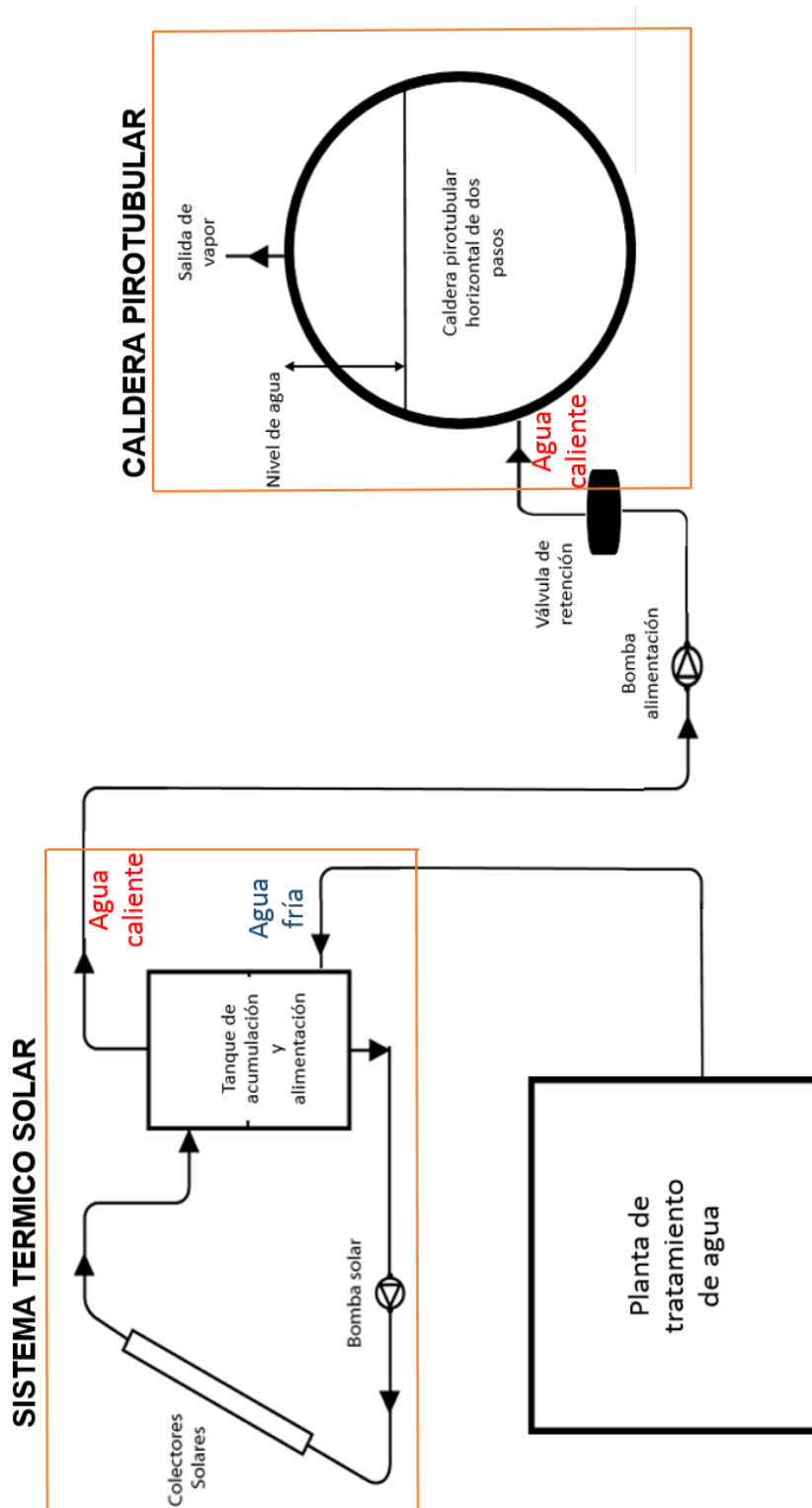
4.4.2 TRNSYS : Es un software que permite la simulación de sistemas en estado transitorio, basado en un entorno gráfico. Desarrollado por la Universidad de Wisconsin, con aportes importantes de TRANSSOLAR Energietechnik GMBH, Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) y Thermal Energy Systems Specialists (TESS).

Es una herramienta usada para la validación de proyectos referentes al área de energías renovables y sistemas alternativos de energía (eólica, fotovoltaica, solar térmica), por ello es usada masivamente por investigadores e ingenieros que proponen desarrollos energéticos y estudian las diversas aplicaciones. Este software permite el diseño, la optimización y el análisis detallado de cualquier sistema dependiente del tiempo.

TRNSYS se ejecuta por medio de cajas negras, llamadas *types*, que se interconectan por medio del interfaz visual *Simulation Studio*, y cada uno se comporta como un componente del sistema, que se caracteriza por medio del lenguaje de programación Fortran.

5. DESARROLLO FASE I: CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA.

Figura 14. Esquema general del Sistema térmico y caldera en conjunto.



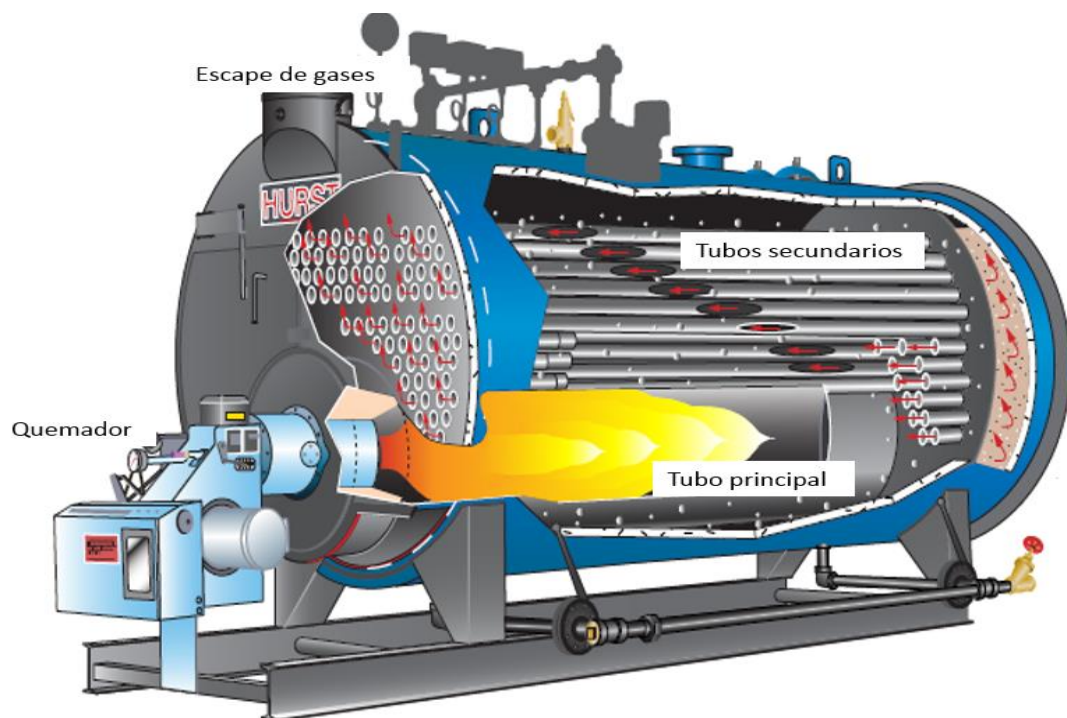
En la Figura 14 se muestra los dos sistemas que se planteó unificar para el desarrollo de este proyecto, señalados en recuadros rojos con sus respectivos nombres. Mostrándose que su punto de unión es la temperatura de salida del agua del sistema térmico que será la temperatura del agua de alimentación de la caldera.

5.1 CARACTERIZACIÓN DE LA CALDERA PIROTUBULAR

La caldera pirotubular horizontal de dos pasos se caracterizó a través de la selección de los catálogos del fabricante Hurst Boiler & Welding Company, INC series 200. La caldera seleccionada tiene las siguientes características principales:

- ✓ Potencia de caldera:20HP
- ✓ Salida de vapor(@212°F;100°C):690[Lb/H]
- ✓ Flujo de combustible,gas natural:840 [CFH]
- ✓ Diámetro del tubo principal[in]:16
- ✓ Diámetro del casco[in]:36
- ✓ Longitud total[in]:84
- ✓ Longitud efectiva tubos(80% long.total)[in]:67
- ✓ Número de tubos secundarios[in]: 26
- ✓ Diámetro de tubos secundarios[in]: 2,0
- ✓ Número de tubos calculado: 26,1

Figura 15. Caldera Pirotubular horizontal de dos pasos.



Fuente: Catálogo Hurst Boiler & Welding Company, INC series 200.

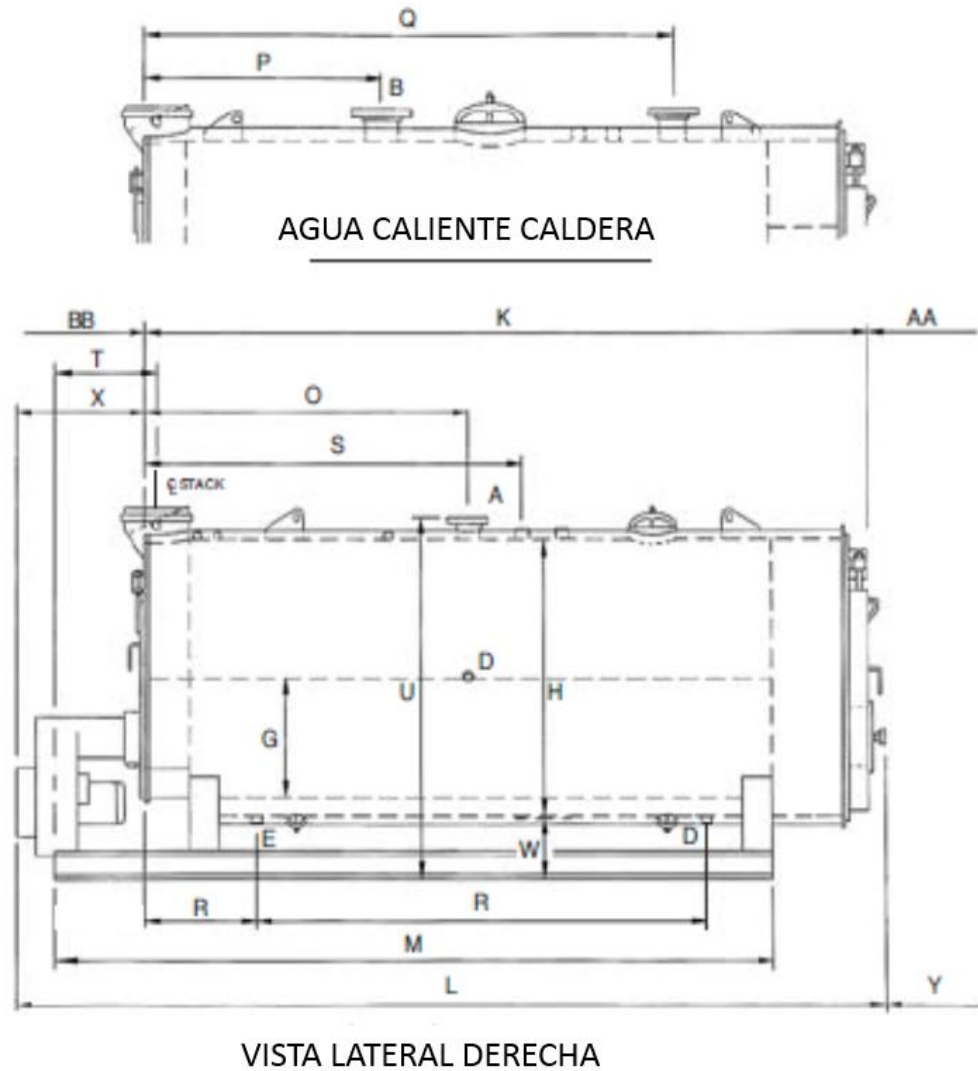
Tabla 3. Especificaciones de la caldera

	superficie de calentamiento	hogar		100
	salida de vapor		LB/H	690
	producción bruta		MBH	670
	tasa de disparo, gas	100 BTU	CFH	840
	tasa de disparo, LP gas	91500 BTU	GPH	9,2
	tasa de disparo, #2 OIL	140000 BTU	GPH	6
	tasa de disparo, #5 & #6 OIL	150000 BTU	GPH	5,6
A	*Nota: 1 tamaño de salida de vapor	150 PSI	IN	1 1/4
A	*Nota: 2 tamaño de salida de vapor	15 PSI	IN	3
B	*Nota: 2 tamaño del suministro de agua	30 PSI	IN	3
C	*Nota: 2 tamaño de retorno de agua	30 PSI	IN	2 1/2
D	conexión de agua de alimentación		IN	1
E	conexión de purga		IN	1
F	tamaño de la salida de la pila		IN	8
G	horno OD.		IN	16
H	Carcasa ID.		IN	36
I	anchura sin acabado		IN	44
J	anchura con acabado		IN	49
K	longitud, frente a la parte trasera		IN	84
L	longitud total		IN	118
M	longitud del patin		IN	90
N	ancho del patin		IN	30
O	ubicación del suministro de vapor		IN	26
P	ubicación del suministro de agua		IN	24
Q	ubicación del retorno de agua		IN	56
R	ubicación de purga	15 PSI Y MAS	IN	17
S	1 1/4"conexión de purga de superficie		IN	50
T	ubicación de la salida de la pila		IN	25
U	altura del suministro		IN	51
V	altura de la pila		IN	51 1/2
W	altura del cascaron al suelo		IN	12
X	proyección del quemador		IN	32
Y	columpio de la puerta		IN	23 1/4
AA	eliminación de tubos	ATRÁS	IN	47
BB	eliminación de tubos	FRENTE	IN	56
	capacidad de agua nwl		GAL.	165
	capacidad de agua inundada		GAL.	195
	peso aproximado de envío (alta presión)	150 PSI Y MAS	LBS.	3225
	peso aproximado de envío (baja presión)	15 Y 30 PSI	LBS.	3075

Fuente: Catálogo Hurst Boiler & Welding Company, INC series 200.

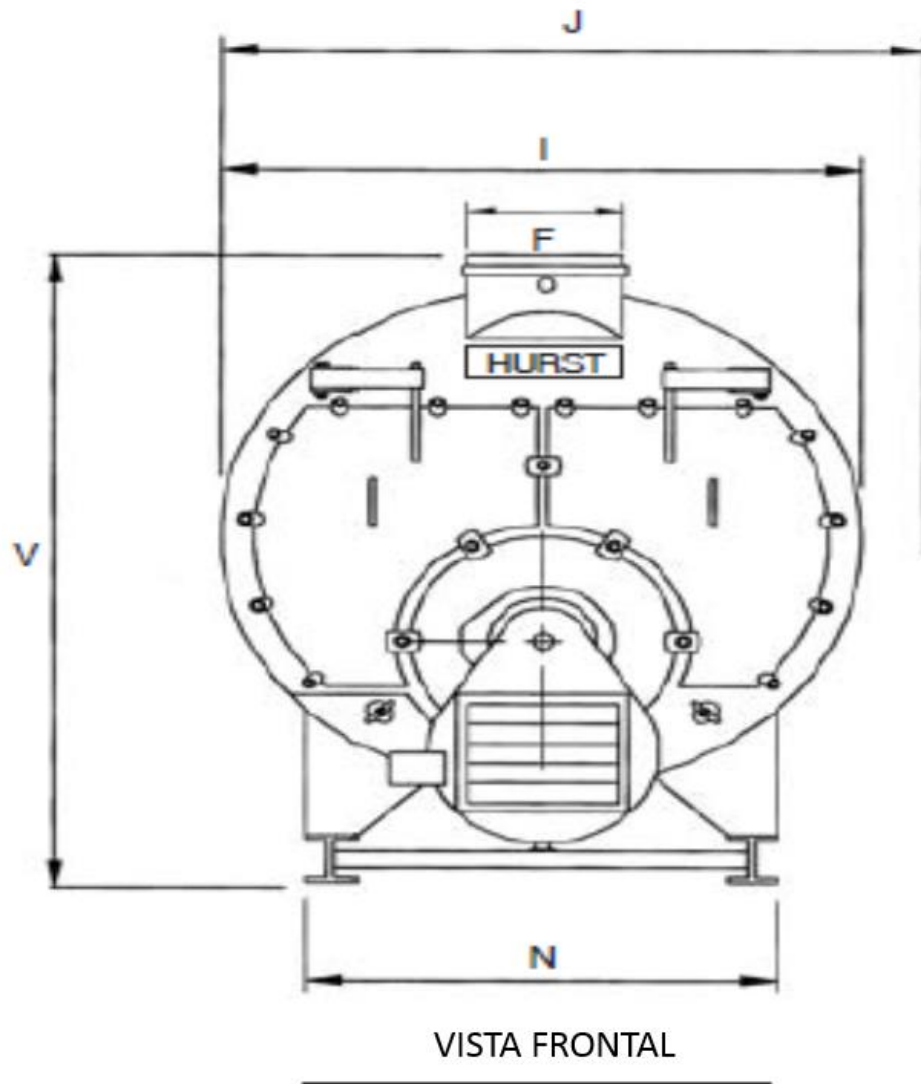
La tabla 3 muestra las especificaciones de la caldera seleccionada.

Figura 16. Vista lateral de la caldera (Acotación correspondiente a las especificaciones de la Tabla 3).



Fuente: Catálogo Hurst Boiler & Welding Company, INC series 200.

Figura 17. Vista frontal de la caldera (Acotación correspondiente a las especificaciones de la tabla 3).



Fuente: Catálogo Hurst Boiler & Welding Company, INC series 200.

5.2 CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA TÉRMICO SOLAR

La caracterización del sistema térmico solar se hizo a partir del catálogo de la empresa Chromagen, escogida por su experiencia en el área de aprovechamiento de energía del sol para calentamiento de agua, además de ofrecer productos de alta calidad y red de distribución a nivel mundial.

El sistema es de circulación forzada compuesto por los siguientes elementos, señalados en la Figura 18:

[1] Acumulador

[2] Captador: detallado en sección

[3] Estructura: Fabricadas en acero galvanizado en caliente, asegurando una larga duración.

[4] Estación solar: La componen una bomba solar de alta eficiencia y gran versatilidad y un sistema de control diferencial de fácil manejo. Posee funciones de protección como anti hielo, refrigeración del captador, desconexión de seguridad del sistema de captación y refrigeración del retorno.

Figura 18. Componentes del sistema térmico solar.



5.2.1 Tanque Acumulador : El tanque acumulador fue el primero en seleccionarse, que a su vez es el tanque de agua de alimentación y debe cumplir con la demanda de suministro de agua para el debido funcionamiento de la caldera.

La cantidad de vapor producido por la caldera depende directamente de la cantidad de agua que se suministra.

Capacidad de evaporación de una caldera esta dada por:

$$Cap_{eva} = 0,069 \text{ galones americanos por minuto por Caballos Caldera}$$

La potencia nominal de la caldera seleccionada es de 20HP, por lo tanto para la evaporación constante:

$$20CC * \frac{0,069GPM}{CC} = 1,38GPM$$

La cantidad de agua de reserva y la capacidad del tanque de alimentación, tenga una cantidad mínima de agua que sea suficiente para el sostenimiento de evaporación de la caldera durante 20min [28].

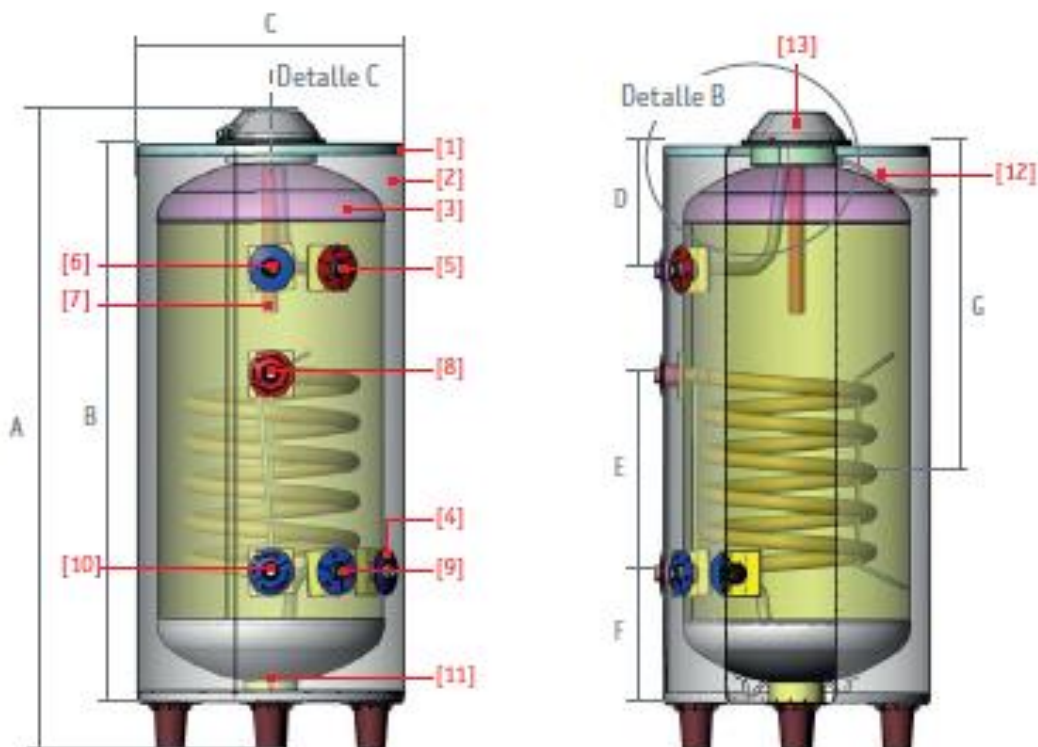
Por tanto, el acumulador tiene una reserva mínima total:

$$1,38GPM * 20min = 27,6 \text{ Galones} = 104,5 \text{ l}$$

El acumulador del catálogo Chromagen seleccionado es el interacumulador vertical de suelo de un solo serpentín (ya que no hay calentadores auxiliares, no es necesario un doble serpentín) de 200 L de capacidad, referencia AVES002.

- Especificaciones técnicas del Tanque Acumulador

Figura 19. Interacumulador de un serpentín Chromagen.



Fuente: Catalogo técnico Chromagen.

Correspondiendo a las partes señaladas en las especificaciones del tanque acumulador los siguientes nombres:

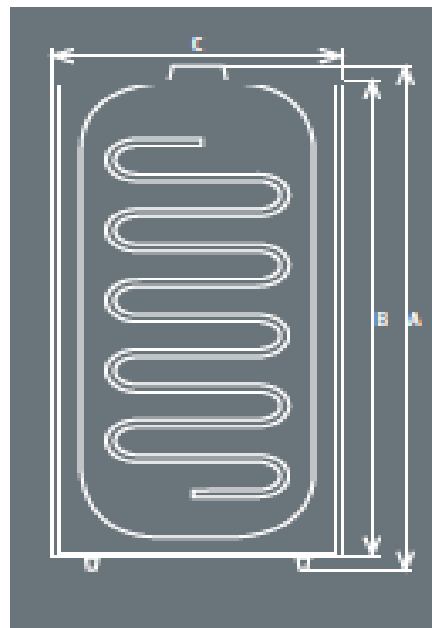
- [1] Cubierta de acero
- [2] Aislante de poliuretano de 40 mm
- [3] Vitrificado de esmalte
- [4] Vaina sonda
- [5] Salida de agua a consumo
- [6] Conexión de válvula de seguridad
- [7] Cátodo anticorrosión
- [8] Retorno de captadores
- [9] Entrada de agua fría
- [10] Salida hacia captadores
- [11] Vaciado
- [12] Tubo de drenaje
- [13] Tapa plástica acumulador

Tabla 4. Especificaciones técnicas del interacumulador.

Código	Capacidad (l)	Cotas (mm)							Peso (Kg)	Intercambiador	
		A	B	C	D	E	F	G		S (m ²)	V (l)
AVES001	150	1120	950	600	270	340	280	860	75	0,6	3,2
AVES002	200	1385	1210	600	270	440	285	860	93	0,6	3,2
AVES003	300	1540	1360	650	301	430	301	860	134	0,9	5

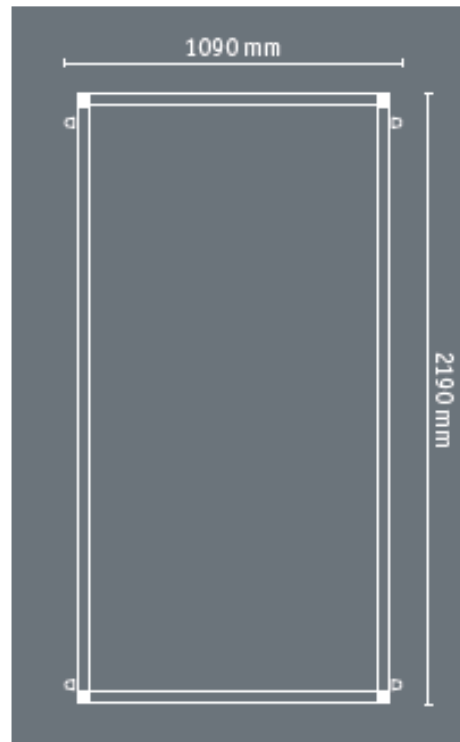
Fuente: Catalogo técnico Chromagen.

Figura 20. Interacumulador esquema básico acotada (correlacionada con las especificaciones de la tabla4).



Fuente: Catalogo técnico Chromagen.

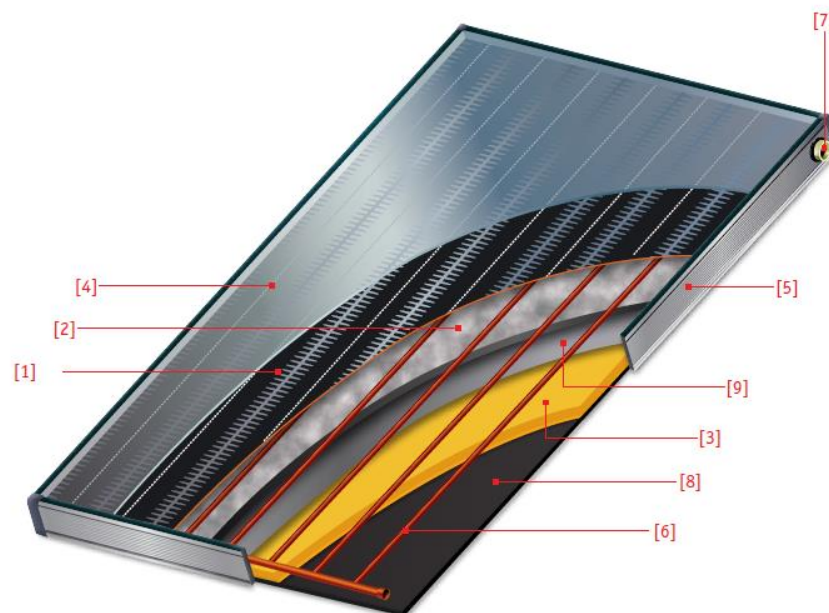
Figura 21. Vista superior del colector solar.



Fuente: Catálogo técnico Chromagen.

- Partes y Calidades de fabricación del colector solar.

Figura 22. Colector solar de placa plana Chromagen.



Fuente: Catálogo técnico Chromagen.

A continuación se nombran las partes que corresponden a la señalización de la Figura 22:

[1] Absorbedor: Aleta de aluminio soldada por láser a parrilla de conductos de cobre lo que proporciona una óptima transferencia de calor entre ambos. Recubrimiento selectivo de titanio de alta eficiencia. Absortividad 0,95 y emisividad 0,05

[2] Tratamiento del absorbedor: tratamientos de pintura selectiva o *sputtering* ultra selectivo que aseguran una excelente absortividad y una baja emisividad. Proporcionan los niveles mas altos de funcionamiento incluso en climas fríos.

[3] Aislamiento: capa de poliuretano rígido inyectado más capa adicional de lana mineral, ambas de 25mm de espesor. Esta capa extra proporciona un aislamiento adicional.

[4] Vidrio solar: panel único de vidrio solar de 3,2mm de espesor. Diseñado para reducir la reflexión y templado para aumentar su resistencia y duración. Su bajo contenido en óxido de hierro permite una alta transmisión solar (91%). Este vidrio está rodeado por una junta de goma de EPDM, altamente resistente a las variaciones de temperatura y a la radiación UV, que absorbe la expansión diferencial del marco y del vidrio.

[5] Carcasa: aluminio anodizado AL6063-T5.

[6] Parrilla de tubos: parrilla de tubos de cobre de 8mm de diámetro conectada a tuberías colectoras de 22mm.

[7] Conexiones roscadas: conexiones hembra roscadas de $\frac{3}{4}$ " de bronce.

[8] Dorso: polipropileno negro moldeado.

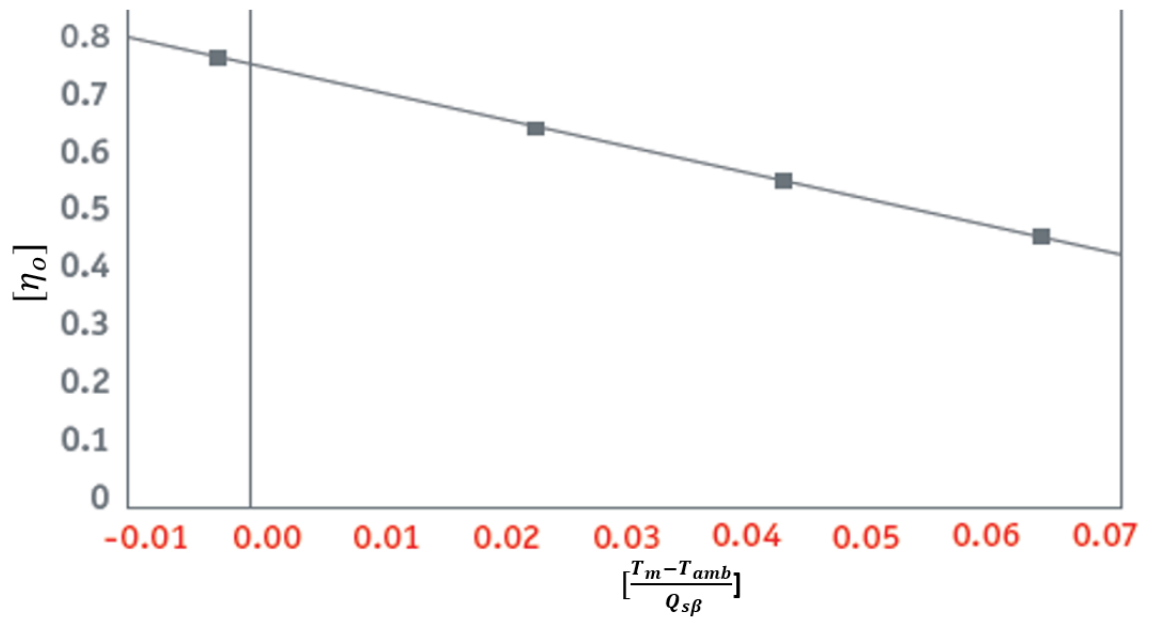
[9] Lámina de aluminio: adherida al aislamiento actúa como barrera contra pérdidas de calor por el dorso del captador.

Carcasa: aluminio anodizado AL6063-T5.

Conexiones roscadas: conexiones hembra roscadas de $\frac{3}{4}$ " de bronce.

En la Figura 23 se muestra la curva de rendimiento del colector solar dada por el fabricante para un valor de radiación total incidente de 850 W/m², la cual fue utilizada para la validación del modelo del colector solar realizado.

Figura 23. Curva de rendimiento del colector solar para $Q_{s\beta}=850 \text{ W/m}^2$



Fuente: Catálogo técnico Chromagen.

Ecuación de la curva de rendimiento del colector

$$\eta_{colector} = \eta_o - K1 * \frac{T_m - T_{amb}}{Q_{s\beta}} - K2 * \frac{(T_m - T_{amb})^2}{Q_{s\beta}}$$

Siendo

$\eta_o = 72,2\%$; Eficiencia óptica del colector

$K1 = 3,39 \frac{W}{m^2K}$ y $K2 = 0,014 \frac{W}{m^2K}$; Las constantes de la curva de eficiencia

T_m ; Temperatura media del fluido

$Q_{s\beta}$; Radiación total incidente

T_{amb} ; Temperatura ambiente

6. DESARROLLO FASE II: MODELADO MATEMÁTICO Y SIMULACIÓN DEL SISTEMA

6.1 MODELADO MATEMÁTICO

Se modeló el sistema Térmico Solar y la Caldera por separado, pero enlazándolos en la simulación por medio de la temperatura de agua de alimentación de la caldera que es equivalente a la temperatura de salida del agua del sistema térmico (precalentamiento).

Los modelos matemáticos planteados y desarrollados, son sencillos y comprensibles en el ámbito de la ingeniería, pero con el nivel para obtener el alcance que requiere el proyecto. Se tienen en cuenta hipótesis y consideraciones que en el progreso de la fase se mencionan.

6.1.1 Modelado matemático del Colector Solar Plano.

Este modelo, se tomó del documento Teoría para el diseño de calentadores solares de agua¹⁸.

- Balance de energía calentador :

$$q_{s\beta} * A_{efe} = Q_u + q_{cs} + q_a + q_{conexion} \quad (1)$$

El balance de energía permite encontrar el calor útil transmitido al fluido, con él, se determina la eficiencia del colector solar. Será la radiación global incidente $q_{s\beta} * A_{efe}$ sobre el colector, donde A_{efe} es el área efectiva del colector y el calor disipado al ambiente (q_{cs} : colector solar, q_a : acumulador, $q_{conexion}$: conexiones).

$$Q_u = \dot{m} * C_p (T_{fe} - T_{fs}) \quad (2)$$

El calor útil (Q_u), está representado por la masa del acumulador y las temperaturas de entrada y salida. Siendo C_p : capacidad calorífica del agua.

La eficiencia del colector solar se define, como el porcentaje de la radiación solar global incidente sobre la superficie efectiva del colector y que es aprovechado como calor útil.

$$\eta = \frac{\text{calor aprovechado}}{\text{radiacion solar incidente}} = \frac{Q_u}{q_{s\beta} * A} \quad (3)$$

¹⁸ GUEVARA V, Sixto. TEORIA PARA EL DISEÑO DE CALENTADORES SOLARES DE AGUA. Lima, 2003.

- Balance de energía en el colector solar:

La radiación global que incide sobre el colector solar, se ve afectada por las propiedades físicas de reflexión y absorción de la cubierta del colector, por ello se hace la corrección por un factor $\tau\alpha$ (descrito mas adelante). Lo que quiere decir, que este calor incidente se distribuye para calentamiento de agua q_{cal} y otra parte se almacena en el colector mismo dU/dt , que normalmente es un valor despreciable; así como, las pérdidas de calor hacia el ambiente por conducción, convección y radiación corresponden al término q_{pe} .

$$q_{s\beta} * A_{efe} * \tau\alpha = q_{cal} + q_{pe} + \frac{dU}{dt} \quad (4)$$

$$\frac{dU}{dt} \approx 0$$

Ecuación (4) quedaría

$$q_{s\beta} * A_{efe} * \tau\alpha = q_{cal} + q_{pe} \quad (5)$$

Relacionando Ecuaciones 5 y 1

$$q_{cs} * \tau\alpha = q_{pe} \quad (6)$$

$$\frac{q_{cal}}{\tau\alpha} = Q_u + q_a + q_{conexiones} \quad (7)$$

Para la determinación del calor de calentamiento del agua en el colector solar, es necesario determinar las pérdidas de calor en el colector mediante la siguiente ecuación:

$$q_{pe} = U_T * A(T_{placa} - T_{amb}) \quad (8)$$

U_T = Coeficiente total de transferencia de calor

A = Área total de colector

T_{placa} = Temperatura promedio de la placa de absorción

T_{amb} = Temperatura ambiental

Aclarando que las pérdidas por conexión $q_{conexiones}$ son despreciadas, puesto que no representan un valor relevante para los cálculos.

- Coeficiente total de transferencia de calor U_T

La Figura 24 muestra esquemáticamente las capas por las que está compuesto el colector solar de placa plana de una sola cubierta y explica de manera gráfica la forma en que se capta la radiación solar. El circuito térmico equivalente es la forma simplificada de verlo.

Siendo en la Figura 24:

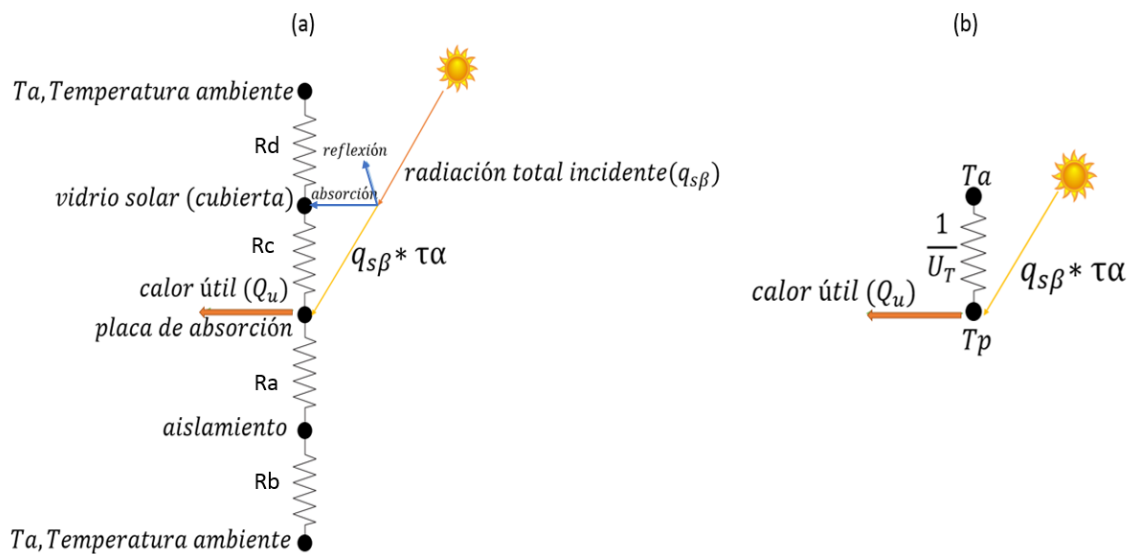
R_d = Resistencia de radiación y convección de la superficie del vidrio con el ambiente y los alrededores.

R_c = Resistencia de radiación entre cubierta y placa de absorción.

R_a =Resistencia de conducción entre placa de absorción y aislamiento.

R_b =Resistencia de convección entre superficie inferior y ambiente.

Figura 24. Circuito térmico de un colector solar placa plana de una sola cubierta: (a) Circuito térmico en detalle, (b) Circuito térmico equivalente.



Como muestra la Figura 24(b) la resistencia total del circuito térmico es el inverso del coeficiente total de transferencia de calor U_T , es un parámetro principal para efectuar el análisis del colector. La evaluación numérica de U_T requiere determinar las conductancias inferior, superior y lateral en el colector solar.

$$U_T = U_f + U_c + U_l \quad (9)$$

Siendo:

U_f : El coeficiente de transferencia del "fondo" o inferior, está dado por la resistencia por conducción del aislante y el coeficiente convectivo entre el absorbedor y el ambiente. Por tanto:

$$U_f = \frac{K_a}{L_a} \quad (10)$$

K_a ; Conductividad térmica del aislante

L_a ; Espesor del aislante

U_c : El coeficiente de transferencia de “cima” o superior, el calor se transfiere entre la placa de absorción y el vidrio solar por convección y radiación en forma paralela. Los mismos mecanismos de transferencia se deben analizar del vidrio solar hacia el ambiente.

Para el cálculo de U_c , se usa la ecuación propuesta por Klein para el cálculo de la conductancia por la parte superior, el cual simplifica el tener que usar métodos tediosos. Esta ecuación se utiliza para temperaturas de la placa de absorción entre 25 y 225 °C, con un margen de error aproximado de $\pm 0,3$ W/m².

Perdidas en la cima, usando u de Klein (1976)¹⁹

$$U_c = \left(\frac{N}{\frac{344}{T_p} * \left(\frac{T_p - T_{amb}}{N+f} \right)^{0,31}} + \frac{1}{h_w} \right)^{-1} + \frac{\sigma * (T_p + T_{amb}) * (T_p^2 + T_{amb}^2)}{\left(\varepsilon_p + 0,0425 * N * (1 - \varepsilon_p) \right)^{-1} + \frac{2 * N + f - 1}{\varepsilon_c} - N} \quad (11)$$

Donde:

h_w = coeficiente de transferencia de calor por convección entre vidrio solar y ambiente

$$h_w = 5,7 + 3,8 * V$$

V ; Velocidad del viento

f = parámetro de pérdidas en la cima

$$f = (1 - 0,04h_w + 0,0005h_w^2) * (1 + 0,058 * N)$$

N = número de cubiertas

ε_c = emitancia de cubiertas en el infrarrojo

T_p = temperatura promedio de la placa de absorción

U_l : el coeficiente de transferencia de calor lateral

En el caso del colector Chromagen, se desprecian las pérdidas laterales puesto que es un colector bien aislado y hecho con materiales de alta calidad, así que, su influencia en el modelo no es notable.

- Temperatura a lo largo del tubo y factor de eficiencia del colector

Balance de energía en la placa de absorción, para un plano perpendicular al flujo

$$(q''\delta(1))_x - (q''\delta(1))_{x+\Delta x} + U_T(T - T_{amb})\Delta x(1) = 0 \quad (12)$$

¹⁹ Klein, S. A., Beckman y Duffie. (1976). «A Desing Procedure for Solar Heating Systems», en Solar Energy, vol. 18, No. 2

Donde:

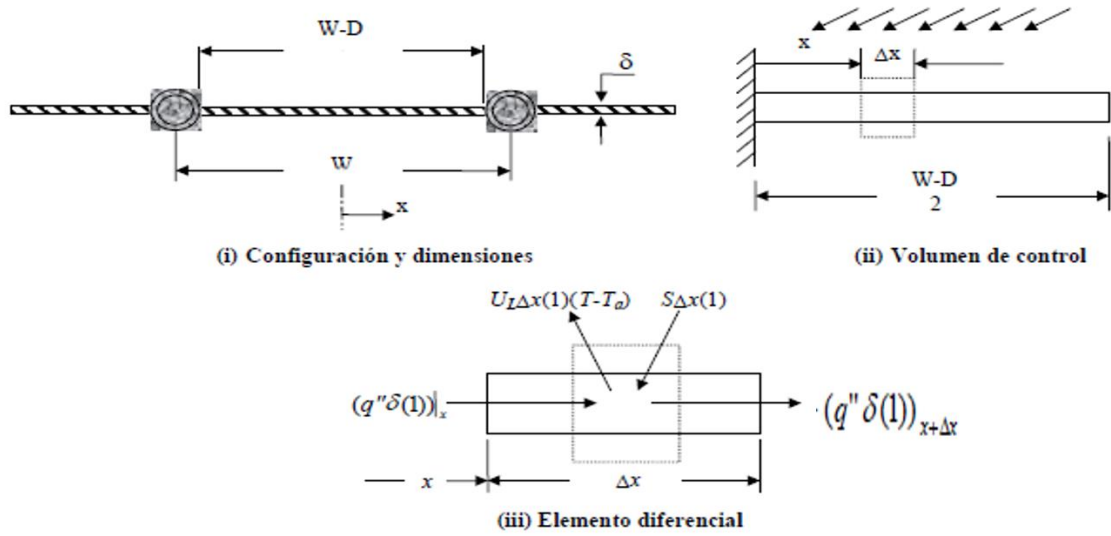
$$S = q_s \beta * \tau \alpha$$

δ = Espesor de la placa de absorción

Δx = elemento del ancho de la placa de absorción

T = temperatura del elemento (Δx)

Figura 25. Balance de energía en la placa de absorción.



Fuente: Teoría para el diseño de calentadores solares de agua.

Dividiendo la Ecuación 12 entre Δx y haciendo $\Delta x \rightarrow 0$, se obtiene que:

$$-\delta \frac{dq''}{dx} + S - U_T(T - T_{amb}) = 0 \quad (13)$$

Donde:

$q'' = -k \frac{dT}{dx}$ Calor por unidad de área que fluye por conducción de la placa de absorción hacia el tubo.

k = Coeficiente de conductividad térmica de la placa de absorción.

Se reemplaza el valor de q'' en la Ecuación 13

$$\frac{d^2 T}{dx^2} = \frac{U_T}{k\delta} \left(T - T_{amb} - \frac{S}{U_T} \right) \quad (14)$$

La ecuación diferencial requiere dos condiciones de frontera

$$\frac{dT}{dx} = 0 \Big|_{x=0}$$

Si la temperatura de la placa en la venciad del tubo es T_b

$$T = T_b \Big|_{x=\frac{W-D}{2}}$$

Se resuelve la Ecuación 14 con las condiciones de frontera dadas

$$\frac{T - T_{amb} - \frac{S}{U_T}}{T_b - T_{amb} - \frac{S}{U_T}} = \frac{\cosh(mx)}{\cosh(m*\frac{W-D}{2})} \quad (15)$$

Donde

$$m^2 = \frac{U_T}{K_p * \delta_p}$$

La Ecuación 15 permite conocer la temperatura T en la placa de absorción a lo largo de x para cualquier posición y a lo largo del flujo.

Figura 26. Distribución de la temperatura en la placa de absorción.



Fuente: Teoría para el diseño de calentadores solares de agua.

De la Ecuación 13 se deduce el calor por unidad de longitud que fluye por conducción a lo largo de la placa de absorción hacia uno de los tubos q'_{cond} esto es:

$$q'_{cond} = q''\delta \Big|_{\frac{W-D}{2}} - (-q''\delta) \Big|_{\frac{W-D}{2}} = -2k \frac{dT}{dx} \Big|_{\frac{W-D}{2}} \quad (16)$$

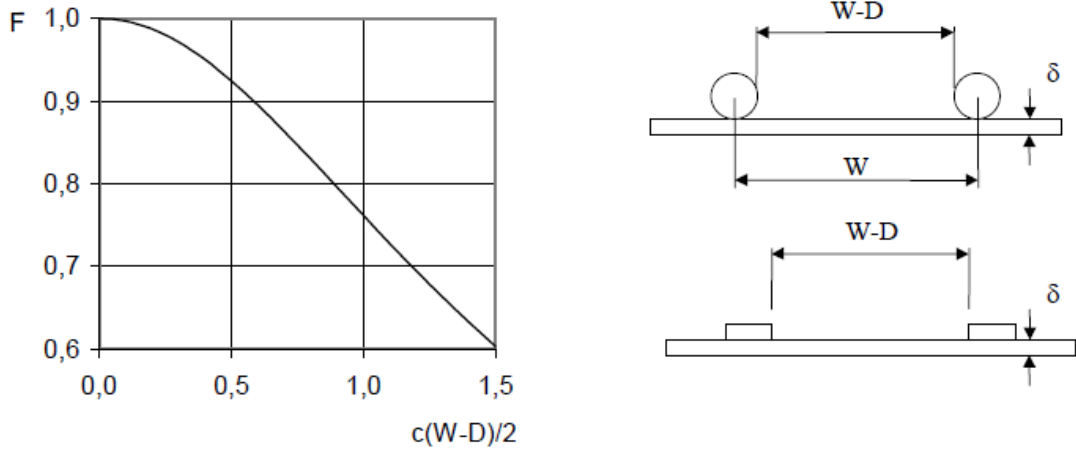
Derivando la Ecuación 15 se obtiene el $\frac{dT}{dx}$, con lo cual se obtiene

$$q'_{cond} = (W - D)(S - U_T(T_b - T_{amb})) \frac{\tanh(m*\frac{W-D}{2})}{m*\frac{W-D}{2}} \quad (17)$$

Se define F como la eficiencia geométrica de una superficie plana[43]

$$F = \frac{\tanh(m*\frac{W-D}{2})}{m*\frac{W-D}{2}} \quad (18)$$

Figura 27. Variación de la eficiencia geométrica en función del parámetro $m * \frac{W-D}{2}$



Fuente: Teoría para el diseño de calentadores solares de agua.

La eficiencia geométrica F varía de acuerdo al parámetro $m * \frac{W-D}{2}$, según se muestra en la Figura 27.

Reemplazando la Ecuación 18 en la Ecuación 17 queda

$$q'_{cond} = (W - D)F(S - U_T(T_b - T_{amb})) \quad (19)$$

El tubo recibe radiación solar en la parte superior

$$q'_{rad} = D(S - U_T(T_b - T_{amb})) \quad (20)$$

Sumando las Ecuaciones 19 y 20

$$q'_{cal} = q'_{cond} + q'_{rad} = ((W - D)F + D)(S - U_T(T_b - T_{amb})) \quad (21)$$

Este calor de calentamiento por unidad de longitud q'_{cal} , es transferido al agua, transferido por convección tubo-agua:

$$q'_{cal} = \pi D h_{fi}(T_b - T_f) \quad (22)$$

Donde:

T_f =Temperatura del fluido en cualquier posición

D = Diámetro de tubos

h_{fi} = Coeficiente de transferencia de calor por convección tubo-fluido

Despejando T_b en la ecuación 21 y sustituyendo en la ecuación 22 se obtiene que:

$$q'_{cal} = WF'((S - U_T (T_f - T_{amb}))) \quad (23)$$

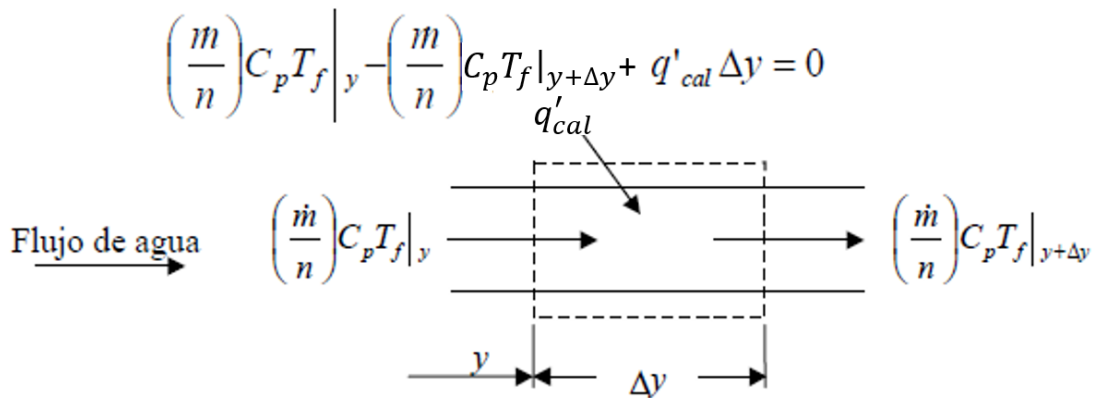
Dejando el calor de calentamiento de agua, en términos de temperatura ambiente y temperatura del agua.

Siendo F' , Factor de eficiencia del colector

$$F' = \frac{\frac{1}{U_T}}{W \left[\frac{1}{\pi D h_{fi}} + \frac{1}{C_b} + \frac{1}{U_T (D + (W - D) * F_{aleta})} \right]} \quad (24)$$

- Distribución de la temperatura del agua a lo largo del tubo

Figura 28. Balance de energía en un elemento diferencial de agua dentro del tubo.



Fuente: Teoría para el diseño de calentadores solares de agua.

En la Figura 28 se observa el balance energético en un elemento diferencial de agua dentro del tubo donde m/n es el flujo de masa de agua por cada tubo, haciendo $\Delta y \rightarrow 0$ se obtiene

$$m C_p \frac{dT_f}{dy} - n W F' (S - U_T (T_f - T_{amb})) = 0 \quad (25)$$

Condición de frontera

$$T_f|_{y=0} = T_{fe}$$

Donde:

T_{fe} = Temperatura del fluido a la entrada del colector

C_p = Capacidad calorífica del agua

\dot{m} = Flujo de masa de agua en el colector

Resolviendo la ecuación 25 con la condición de frontera dada y tomando el valor de "y" como la longitud de los tubos del colector L queda

$$\frac{T_{fs} - T_{amb} - \frac{S}{U_T}}{T_{fe} - T_{amb} - \frac{S}{U_T}} = e^{-\frac{U_T n W F' L}{m C_p}} \quad (26)$$

- Factor de remoción de calor

Es la relación entre el calor de calentamiento que se obtiene efectivamente en el colector, es decir, si toda la superficie del colector estuviese a la temperatura del fluido a la entrada T_{fe} . Conociendo la distribución de la temperatura en el fluido el factor de remoción F_r es:

$$F_r = G * \frac{C_p}{U_T} * \left(1 - e^{-\frac{U_T * F'}{G * C_p}}\right) \quad (27)$$

$$G = \frac{\dot{m}}{A}$$

El calor útil expresado en términos del factor de remoción de calor es:

$$Q_u = A * F_r * \left(q_{s\beta} * \tau\alpha - U_T * (T_{ent} - T_{amb}) \right)$$

$$Q_u = A * F_r * \left(S - U_T * (T_{ent} - T_{amb}) \right) \quad (29)$$

- Cálculo coeficiente de transferencia de calor por convección entre fluido y pared tubo, nombrado en la Ecuación 22

$$h_{fi} = \frac{Nu * K_a}{D} \quad (30)$$

Siendo

K_a , la conductividad del agua

Re , el número de Reynolds define el régimen de flujo

$$Re = \frac{Ve * D}{\vartheta} \quad (31)$$

Para condiciones prácticas , el flujo en un tubo es laminar para $Re < 2300$, turbulento para valores mayores a 4000

ν , viscosidad cinemática del agua

Nu =Nusselt. Su equivalencia depende del régimen del flujo hallado por medio del Reynolds. Considerando el caso de temperatura superficial constante, para tubo circular, en régimen de flujo laminar totalmente desarrollado

$$Nu = \frac{hD}{K_a} = 3,66 \quad (32)$$

Flujo laminar en desarrollo

$$Nu = 3,66 + \frac{0,065 * (\frac{D}{L_T}) Re * Pr}{1 + 0,055 * ((\frac{D}{L_T}) Re * Pr)^{\frac{2}{3}}} \quad (33)$$

Flujo turbulento totalmente desarrollado asumiendo superficies lisas

$$Nu = 0.023 R_e^{0,8} P_r^n \quad (34)$$

con $n = 0,4$ para calentamiento, ya que, en este caso es calentamiento del fluido

V_e , Velocidad del agua en los tubos

$$V_e = \frac{\text{caudal}}{A_{tubo} * Num_{tubos}}$$

caudal, es el flujo de agua que pasa por el colector

A_{tubo} , área de transferencia de calor

$$A_{tubo} = \pi * \frac{D^2}{4}$$

- Cálculo de la transmisividad y absorptividad efectiva $\tau\alpha$

Como se menciona en el apartado de radiación solar el sol tiene diferentes posiciones en el transcurso del año y el día, de ello depende la dirección de los rayos solares incidentes en el colector junto con la posición geográfica de la ciudad de instalación del mismo.

Los datos recolectados son de la ciudad de Bucaramanga, por tanto:

Latitud de Bucaramanga

$$\phi = 7,25$$

Declinación

$$\delta = 23,45 * \text{sen} \left(\frac{284 + \text{dia}}{365} * 360 \right)$$

Coseno del ángulo zenital

$$\cos\theta_z = \text{sen}\phi * \text{sen}\delta + \text{cs}\phi * \text{cos}\delta * \text{cos}\omega$$

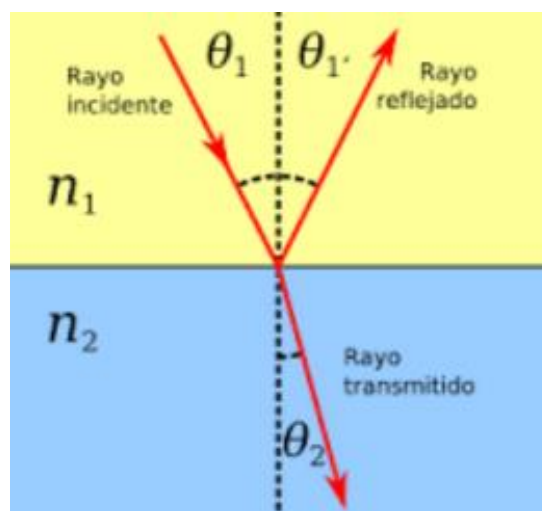
$R_b = 1$. Se toma este valor igual a uno(1) por la posición geográfica de la ciudad.

Cociente entre la radiación que incide sobre una superficie inclinada y la que incide sobre una superficie horizontal

El colector solar plano posee un vidrio solar (cubierta), el cual es el que recibe la radiación solar incidente, las propiedades físicas de este conllevan al siguiente fenómeno cuando los rayos solares llegan al colector:

La **ley de Snell**²⁰ (también llamada **ley de Snell-Descartes**) es una fórmula utilizada para calcular el ángulo de refracción de la luz al atravesar la superficie de separación entre dos medios de propagación de la luz (o cualquier onda electromagnética) con índice de refracción distinto.

Figura 29. Representación gráfica de la Ley de Snell.



Fuente: ingenieroz.blogspot.com

Donde :

Índice de refracción²¹ del aire

$$n_1 = n_{\text{aire}}$$

Índice de refracción del vidrio

$$n_2 = n_{\text{vidrio}}$$

Angulo incidencia rayos solares, son las direcciones que toma la energía solar

$$\theta_1 = \theta_z$$

$$n_1 * \text{sen}\theta_1 = n_2 * \text{sen}\theta_2$$

²⁰ Willebrord Snel van Royen. Astrónomo y matemático. Leiden, 1580 – 1626.

²¹ Se denomina índice de refracción al cociente de la velocidad de la luz en el vacío y la velocidad de la luz en el medio.

Con los ángulos de incidencia se determina (tomado de Solar Engineering of Thermal Processes[9]:

Reflectividad perpendicular ρ_L

$$\rho_L = \frac{\text{sen}^2(\theta_2 - \theta_1)}{\text{sen}^2(\theta_2 + \theta_1)}$$

Reflectividad paralela ρ_Z

$$\rho_Z = \frac{\text{tan}^2(\theta_2 - \theta_1)}{\text{tan}^2(\theta_2 + \theta_1)}$$

Transmisividad perpendicular τ_L

$$\tau_L = \frac{1 - \rho_L}{1 + (2N - 1)\rho_L}$$

Transmisividad paralela τ_Z

$$\tau_Z = \frac{1 - \rho_Z}{1 + (2N - 1)\rho_Z}$$

Transmisividad reflectiva τ_{rN}

$$\tau_{rN} = \frac{1}{2} * (\tau_L + \tau_Z) \quad (35)$$

Transmisividad absorbiva

$$\tau_a = e^{-K_{ext} * \frac{\delta_v}{\cos \theta_2}} \quad (36)$$

Siendo:

K_{ext} = Coeficiente de extinción

δ_v = Espesor del vidrio solar

La transmisividad total de vidrio τ , se halla con la Ecuación 35 y 36

$$\tau = \tau_a * \tau_{rN} \quad (37)$$

Con τ se procede a calcular la transmisividad y absorbividad efectiva

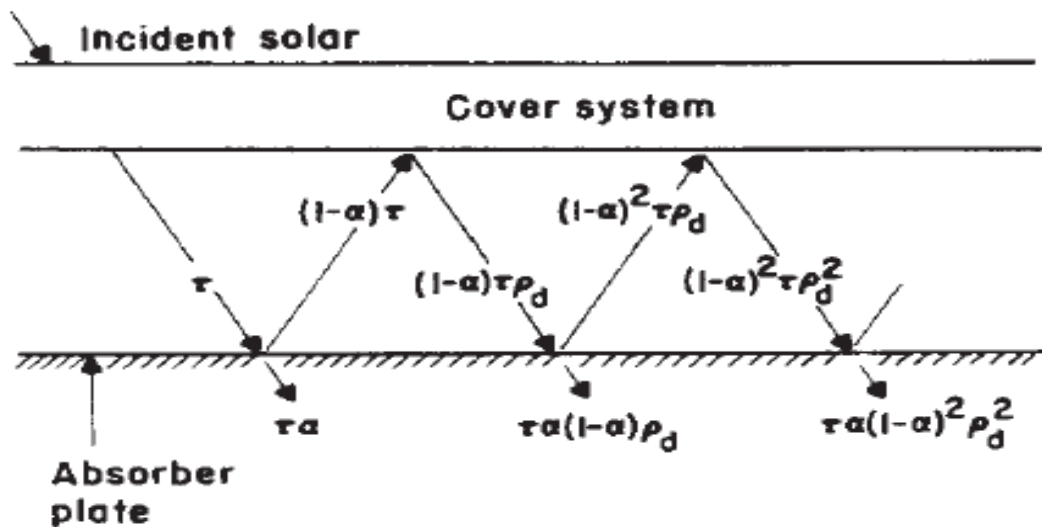
Como se muestra en la Figura 30, la reflexión múltiple de la radiación difusa continúa de modo que la fracción de la energía incidente absorbida en última instancia es:

$$\tau\alpha = \tau\alpha \sum_{n=0}^{\infty} ((1 - \alpha_v)\rho_d)^n = \frac{\tau\alpha_v}{1 - (1 - \alpha_v)\rho_d} \quad (38)$$

α_v =absortividad del vidrio

ρ_d =reflectividad difusa

Figura 30. Absorción de radiación solar por placa absorbente bajo un sistema de cubierta.



Fuente: Solar Engineering of Thermal Processes-

Para el Tanque de acumulación

El tanque de acumulación del sistema térmico es el mismo para el del agua de alimentación de la caldera, con estos requerimientos se hizo la caracterización de este en la Fase I.

A continuación se muestra el balance de energías tomando como volumen de control el interacumulador para obtener el valor final de la temperatura del fluido

$$dTf = (mw_{cole} * C_p * (T_{sal} - T_{ent}) + mw * C_p * (T_o - T_{tanque}) - Qp_{tanque}) / (Mf * Cv) \quad (39)$$

$$Qp_{tanque} = U_{tanque} * A_{tanque} * (T_{ent} - T_{amb}) \quad (40)$$

En donde

mw_{cole} ; Es el flujo másico que circula por el colector

mw ; Es el flujo másico que se restituye en el acumulador con respecto a la solicitud de agua de alimentación de la caldera. Teniendo en cuenta que la caldera debe tener un nivel establecido de agua (se ve en el siguiente apartado) cada que solicite aumento de nivel, el sistema responde con agua de alimentación la cual proviene del tanque acumulador.

T_o ; Temperatura del agua de restitución

6.1.2 Modelado matemático de la Caldera Piro-tubular. Análisis de Combustión
 El combustible para el funcionamiento de la caldera es el Gas Natural. El metano es el componente con mas alto porcentaje en la composición del combustible, por condiciones de simplicidad se tomará este en representación para el modelo matemático.

Combustible: Metano

$$PCI = 49978.452 [kJ/Kg]^{22}$$

Flujo volumétrico de combustible

$$\dot{v}_{combustible} = 840 [CFH] = 23.786 \left[\frac{m^3}{h} \right]$$

Densidad de combustible

$$\delta_{combustible} = 0.656 \left[\frac{Kg}{m^3} \right]$$

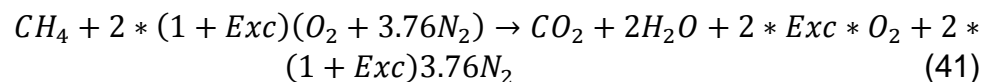
Flujo másico de combustible

$$\begin{aligned} \dot{m}_{combustible} &= \delta_{combustible} * \dot{v}_{combustible} \\ \dot{m}_{combustible} &= 0.656 * 23.786 = 15.604 \left[\frac{Kg}{h} \right] \end{aligned}$$

Análisis estequiometrico

El aire tiene una relación de 21% de O_2 y 79% de N_2

Balance



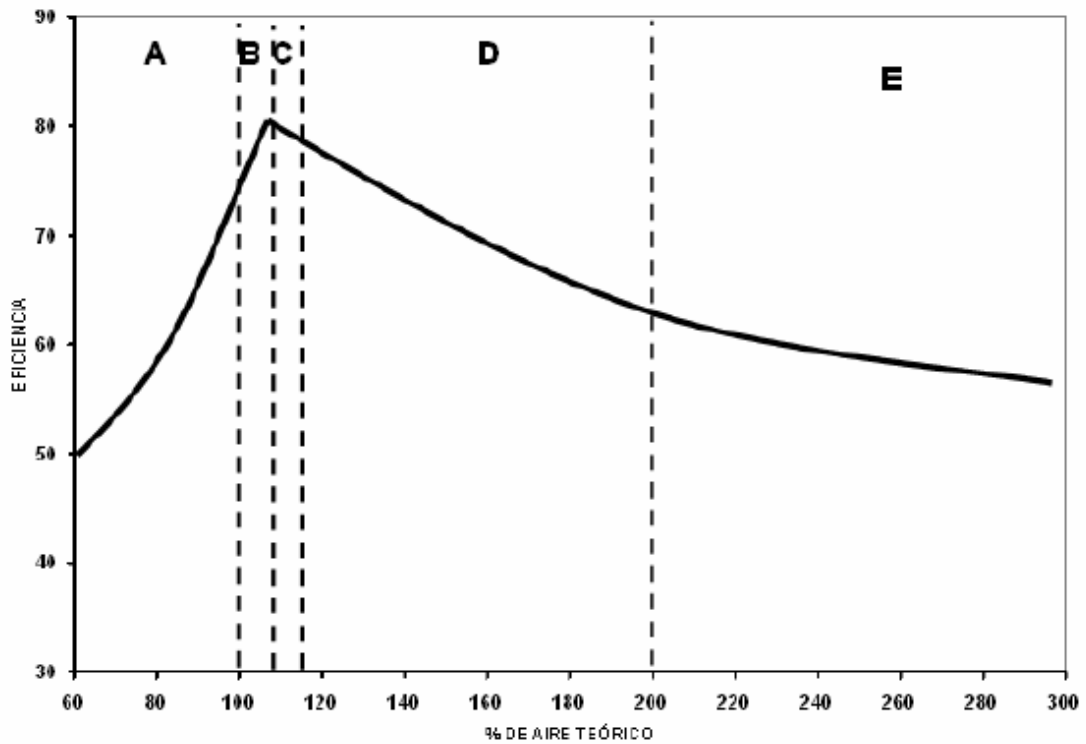
Donde

Exc ; Exceso de aire

En la figura 31 se observa el rendimiento de la combustión con respecto al porcentaje de aire teórico, donde la franja mas alta de eficiencia es 10-20% de exceso de aire. En este ejercicio se tomará el valor de 20% de exceso para condiciones normales de combustión del metano.

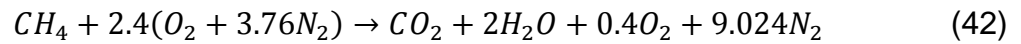
²² Garcia Lima, Antonio Guilherme. Generación térmica. Consultado el 20 de noviembre de 2016. Disponible en [<http://www.antoniolima.web.br.com/arquivos/podercalorifico.htm>]

Figura 31. Efecto del porcentaje de aire sobre la eficiencia de combustión.



Fuente: escuela Politecnica del Litoral. Cap.3.Combustión.

Ecuación de combustión final:



Se halla la fracción molar de los productos, que es los moles de cada producto dividido en la totalidad de los moles de los productos

$$X_i = \frac{n_i}{n_T} = \frac{\text{moles de cada producto}}{\text{moles totales del producto}} \quad (43)$$

Tabla 6. Moles y fracciones molares de los productos de la combustión.

PRODUCTO	n_i	X_i
CO_2	1	0,080
H_2O	2	0,161
O_2	0.4	0,032
N_2	9,024	0,726
$n_T = \sum n_i$	12,424	

Cálculo de presiones parciales

La presión atmosférica para Bucaramanga

$$P_{atm} = 90,659[kPa] = 0,895[atm]$$

La presión parcial de cada producto será la fracción molar multiplicada por la presión atmosférica como se muestra en la siguiente ecuación

$$P_i = X_i * P_{atm} \quad (44)$$

Tabla 7. Fracciones molares y presiones parciales de los productos de la combustión.

PRODUCTO	X_i	$P_i[atm]$
CO_2	0,080	0,072
H_2O	0,161	0,144
O_2	0,032	0,029
N_2	0,726	0,650

El flujo másico de los gases será igual a la suma del flujo másico de aire mas el flujo másico de combustible

$$\dot{m}_{gases} = \dot{m}_{aire} + \dot{m}_{combustible} \quad (45)$$

Tabla 8. Masa total de aire.

COMPONENTE	PESO MOLECULAR	MOLES	PESO gr
O_2	32	2,4	76,8
N_2	28	9,024	252,672
masa de aire			329,472

Masa del metano en gramos es equivalente a 16.

Relación aire-combustible

$$AC = \frac{m_{aire}}{m_{combustible}} = \frac{329,472}{16}$$

$$AC = 20,592 \left[\frac{Kg \text{ aire}}{Kg \text{ combustible}} \right]$$

Conociendo el flujo másico del combustible y la relación AC

$$\dot{m}_{aire} = AC * \dot{m}_{combustible} = 20,592 * 15,604$$

$$\dot{m}_{aire} = 321,317$$

Luego se procede a hallar el flujo másico de gases

$$\dot{m}_{gases} = 321,317 + 15,604 = 326,921 \left[\frac{Kg}{h} \right]$$

Temperatura de llama adiabática

$$Q - W = H_p - H_r \quad (46)$$

$$H_p = \sum n_i * (h_i(T) - h_{ref} + h_{for})_{productos} \quad (47)$$

$$H_R = \sum n_i * (h_i(T) - h_{ref} + h_{for})_{reactivos} \quad (48)$$

Siendo:

$h_i(T)$ =entalpia del producto o reactivo a la temperatura que se encuentra

h_{ref} =entalpia de referencia del producto o reactivo (T=25°C)

h_{for} =entalpia de formación del producto o reactivo

n_i =numero de moles del producto o reactivo

Considerando Q=0 Y W=0 queda:

$$H_p = H_r$$

$$H_r = PCI$$

Se realizó un proceso iterativo el cual deberá cumplir la condición que se muestra a continuación, de este se obtiene la temperatura de llama adiabática, que para esta ocasión es la Temperatura de los gases a la entrada en el proceso de la transferencia de calor:

$$PCI = \sum n_i * (h_i(T) - h_{ref} + h_{for})_{productos}$$

Tabla 9. Tabla de resultados del proceso iterativo para el cálculo de la temperatura de llama adiabática.

PCI(kJ)	H_p (kJ)	T_{LLAMA} (K)
799655	799289	2064
799655	799340	2064.1
799655	799391	2064.2
799655	799441	2064.3
799655	799492	2064.4
799655	799543	2064.5
799655	799593	2064.6
799655	799644	2064.7
799655	799695	2064.8
799655	799745	2064.9

La iteración se realizó usando la herramienta EES, la cual da el valor

$$T_{LLAMA}(K) = T_{gases} = 2064,7 [K].$$

- Transferencia de calor de los gases de combustión

Calor total Q_{total} es el calor neto producido por los gases de combustión Q_g .

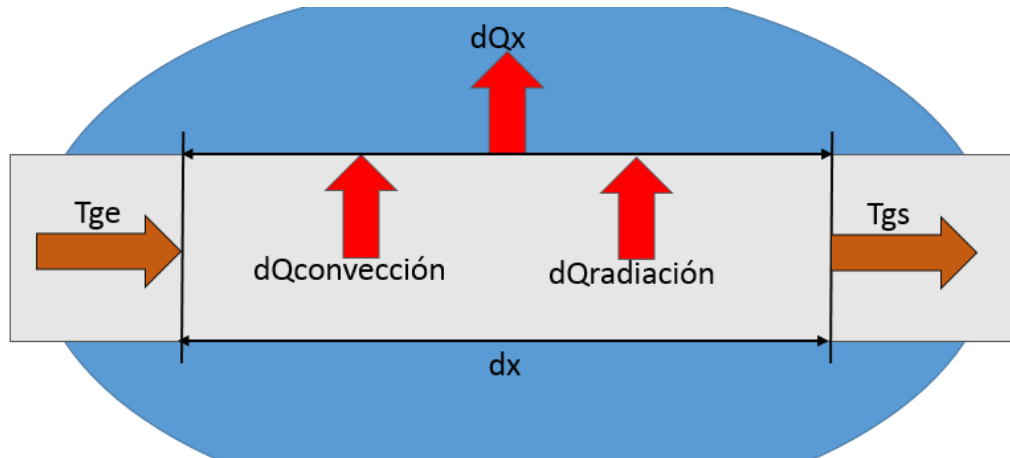
$$Q_{total} = Q_{\acute{u}til} + Q_{perdidas} \quad (49)$$

$Q_{perdidas}$ = calor perdido por convección natural de la caldera hacia el ambiente(Q_{pp}) y el calor perdido por los gases de combustión(Q_{pg})

$$Q_{perdidas} = Q_{pp} + Q_{pg} \quad (50)$$

En la Figura 32 se muestra un diferencial de tubo secundario con su respectivo balance de transferencia de calor. Donde el $dQ_{convección}$ mas el $dQ_{Radiación}$ es la energía cedida por los gases, la cual es obtenida del proceso de combustión. También se observa los términos T_{ge} y T_{gs} , siendo correspondientemente la temperatura de gases a la entrada y temperatura de gases a la salida. Se supone temperatura superficial constante y tubos lisos, también se considera Temperatura interna y externa del tubo aproximadamente igual, debido a la conductividad del material, además transferencia de calor unidimensional en dirección radial.

Figura 32. Balance diferencial de Trasanferencia de Calor en tubo secundario de la caldera.



$$dQ_x = dQ_g = dQ_{convección} + dQ_{Radiación} \quad (51)$$

Integrando dQ_x a lo largo del tubo se obtiene el Q_g , el cual es el calor de gases, este debe proporcionar la energía necesaria para la vaporización del agua mas las pérdidas que se dan de la superficie de la caldera al exterior y las pérdidas por los humos, por tanto, Q_g a su vez es:

$$Q_g = Q_{\text{útil}} + Q_{\text{perdidas}}$$

En seguida se indican las correlaciones usadas en este modelo para $dQ_{convección}$ y $dQ_{Radiación}$.

Calor por conveccion:

$$dQ_{convección} = h_{gas} * (T_m - T_{sup}) * dA_{int} \quad (52)$$

T_m = Temperatura media de los gases de combustión

T_{sup} =Temperatura superficial de los tubos

Área interna de los tubos

$$A_{int} = \pi * D_{int} * dx$$

Para el cálculo del coeficiente de calor de los gases de combustión se tiene,

$$h_{gas} = \frac{Nu * K_{gas}}{D_{int}}$$

K_{gas} = Conductividad termica de los gases de combustión

El cálculo del coeficiente de transferencia de calor h_{gas} se realiza con el mismo proceso explicado en las Ecuaciones 31, 32, 33 y 34.

Calor por radiación:

$$dQ_{Radiación} = \frac{\varepsilon_s(\varepsilon_g E_{bg} - \alpha_g E_{bs})}{\varepsilon_s + \alpha_g - \varepsilon_s \alpha_g} \quad (53)$$

Donde

ε_s = Emisividad de la superficie

ε_g = Emisividad de gases

α_g = Absortividad de gases

$E_{bs} = T_{sup}^4 * \sigma$; poder emisivo de la superficie del tubo

$E_{bg} = T_m^4 * \sigma$; poder emisivo de la mezcla de gases

$$\sigma = 5,67 * 10^{-8} \left[\frac{W}{m^2 K^4} \right]$$

- Cálculo de las propiedades de los gases (emisividad y absortividad)[36].

Para este apartado se usará el Análisis de Michel Modest (2003) ²³. Los gases CO_2 y H_2O existen juntos, así que, debe determinarse una emisividad y absortividad total de gases como se muestra a continuación:

$$\varepsilon_g = \varepsilon_{H_2O} + \varepsilon_{CO_2} - \Delta\varepsilon \quad (54)$$

$$\alpha_g = \alpha_{H_2O} + \alpha_{CO_2} - \Delta\alpha \quad (55)$$

Donde:

La emisividad total ε_g , es la suma de la emisividad de cada gas menos el factor $\Delta\varepsilon$ de corrección.

²³ Presentó por primera vez diagramas para las emisividades totales de gases y se han usado con amplitud en los cálculos referentes a la radiación, con exactitud razonable.

El factor de corrección para la emisividad y la absorptividad, se hallan del mismo modo, distinguiéndose $\Delta\alpha$, factor de corrección de la emisividad, porque debe ser multiplicado por un parámetro que relaciona la temperatura de los gases y la temperatura de superficie.

Se hace el análisis de los gases bajo la presión de 1bar, lo cual da la referencia del comportamiento de la emisividad.

$$\varepsilon_0(p_a L, p = 1\text{bar}, T_g) = \exp \left[\sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^N C_{ij} \left(\frac{T}{T_0} \right)^i \left(\log_{10} \frac{P_a L_e}{(P_a L)_0} \right)^j \right] \quad (56)$$

Con el valor anterior, es posible calcular la emisividad que corresponde a cada gas, para cualquier valor de presión parcial.

$$\frac{\varepsilon(p_a L, p, T_g)}{\varepsilon_0(p_a L, p = 1\text{bar}, T_g)} = 1 - \frac{(a-1)(1-P_E)}{a+b-1+P_E} \exp \left[-C \left[\log_{10} \frac{(P_a L)_m}{P_a L_e} \right]^2 \right] \quad (57)$$

Siendo:

P_E ; Presión efectiva

a, b, c ; son parámetros constantes

$P_{H_2O}L$ ó $P_{CO_2}L$; Presión parcial por la longitud del haz

Valores que se hallan con las Tablas 10 y 11, las cuales presentan las correlaciones necesarias para hacerlo.

Luego se calcula el factor de corrección, el cual tiene en cuenta la reducción de la emisividad referente con la parte de energía por radiación que se absorbe entre los mismos gases.

$$\Delta\varepsilon = \left(\left(\frac{Z}{10,7+101*Z} \right) - 0,0089 * Z^{10,4} \right) * \left(\log_{10}((P_{H_2O} + P_{CO_2}) * L) \right)^{2,76} \quad (58)$$

$$\Delta\alpha = \left(\left(\frac{Z}{10,7+101*Z} \right) - 0,0089 * Z^{10,4} \right) * \left(\log_{10} \left((P_{H_2O} + P_{CO_2}) * L * \frac{T_{sup}}{T_g} \right) \right)^{2,76} \quad (59)$$

$$\text{Siendo } Z = \frac{P_{H_2O}}{P_{H_2O} + P_{CO_2}}$$

Para evaluar la absorptividad de la mezcla de gases, se usa el mismo procedimiento de cálculo de la emisividad, descartando el parámetro de referencia ε_0 ; ($\varepsilon_0 = 1$). Se aplica un parámetro de relación entre T_g y T_{sup} .

$$\alpha(P, P, T_g, T_{sup}) = \left(\frac{T_g}{T_{sup}} \right)^{\frac{1}{2}} * \varepsilon \left(pL, \frac{T_{sup}}{T_g}, p, T_{sup} \right) \quad (60)$$

Tabla 10. Correlaciones de Leckner para emisividad (que se usan igualmente para absorptividad) del CO₂.

M,N	2,3			
$\begin{bmatrix} C_{00} & \dots & C_{0M} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{N0} & \dots & C_{NM} \end{bmatrix}$	-3.9893	2.7669	-2.1081	-0.39163
	1.2710	-1.1090	1.0195	-0.21897
	-0.23678	0.19731	-0.19544	0.044644
P_E	$\frac{(p + 0.28p_a)}{p_0}$			
$\frac{(p_a L)_m}{(p_a L)_a}$	$0.54/t^2$		$t < 0.7$	
	$0.225t$		$t > 0.7$	
a	$1 + 0.1/t^{1.45}$			
b	0.23			
c	1.47			
$T_0 = 1000K \quad p_0 = 1bar \quad t = T/T_0 \quad (p_a L)_0 = 1bar - cm$				

Fuente: Determinación de la emisividad de llama y el calor de radiación por combustión en el hogar de una caldera[36].

Tabla 11. Correlaciones de Leckner para emisividad (que se usan igualmente para absorptividad) del H₂O.

M,N	2,2		
$\begin{bmatrix} C_{00} & \dots & C_{0M} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{N0} & \dots & C_{NM} \end{bmatrix}$	-2.2118	-1.1987	0.035596
	0.85667	0.93048	-0.045915
	-0.10838	-0.17156	0.045915
P_E	$\frac{((p + 0.56p_a)/\sqrt{t})}{p_0}$		
$\frac{(p_a L)_m}{(p_a L)_a}$	$13.2t^2$		
a	2.479	$t < 0.75$	
	$1.88 - 2.053 \log_{10} t$	$t > 0.754$	
b	$1.10/t^{1.4}$		
c	0.5		
$T_0 = 1000K \quad p_0 = 1bar \quad t = T/T_0 \quad (p_a L)_0 = 1bar - cm$			

Fuente: de la emisividad de llama y el calor de radiación por combustión en el hogar de una caldera[36].

El balance de transferencia de calor en el diferencial de tubo, permite ver también que la suma de los calores producidos internamente por los gases de combustión es igual al dQ_x , que corresponde a la transferencia de calor por convección externa. Esta convección externa pertenece a la ebullición en la *interfase sólido-líquido* cuando un líquido se pone en contacto con una superficie mantenida a una temperatura T_{sup} suficientemente por arriba de la de saturación T_{sat} de ese líquido, situación que ocurre en la caldera, por tanto:

$$dQ_x = dQ_{ebu} = \mu_l * h_{fg} * \left[\frac{g * (\rho_l - \rho_v)}{\sigma_T} \right]^{\frac{1}{2}} * \left[\frac{C_p * (T_{sup} - T_{vapor})}{C_{sf} * h_{fg} * Pr_l^n} \right]^3 \quad (61)$$

Siendo,

μ_l ; Viscosidad del líquido

h_{fg} ; Entalpia de vaporización

$g = 9.10 \frac{m}{s^2}$; Aceleración gravitacional

ρ_l ; Densidad del líquido

ρ_v ; Densidad del vapor

σ_T ; Tensión superficial de la interfase líquido-vapor

C_p ; Calor específico del líquido

C_{sf} ; Constante experimental dependiente combinación superficie-fluido

Pr_l ; Número de Prandtl del líquido

n ; Constante experimental que depende del fluido

- Pérdida de calor en la superficie de la caldera (convección natural)

$$Q_p = h_{ext} * \pi * L_{total} * D_{ext} * (T_{supcal} - T_{amb}) \quad (62)$$

Siendo:

L_{total} ; Longitud total de la caldera [in]

D_{ext} ; Diametro exterior carcasa [in]

T_{supcal} ; Temperatura de la superficie exterior de la caldera

h_{ext} ; Coeficiente de transferencia de calor por convección natural externa, el cual se obtiene de la siguiente manera:

$$h_{ext} = \frac{K_{air} * Nu}{D_{ext}}$$

Se considera la caldera como un cilindro horizontal isotérmico, obteniendo el número de Nusselt de la siguiente ecuación

$$Nu = \left\{ 0,6 + \frac{0.387 Ra_D^{\frac{1}{4}}}{\left(1 + \left(\frac{0.559}{Pr}\right)^{\frac{9}{16}}\right)^{\frac{8}{27}}}\right\}^2 \quad (63)$$

Ra ; es el número de Rayleigh

$$Ra = \frac{g \cdot \beta \cdot D_{ext}^3 \cdot (T_{supcal} - T_{amb})}{\nu^2} \cdot Pr_{air} \quad (64)$$

ν ; Viscosidad dinámica del aire a la temperatura media

Pr_{air} ; Prantl a la temperatura media

K_{air} ; Conductividad del aire a la temperatura media

β ; coeficiente de expansión volumétrica

- Análisis energético

Balance de masa de líquido en la caldera

$$\frac{dMl}{dt} = \frac{(-Ml \cdot dvl - Mv \cdot dvv) \cdot dTv - vv \cdot dMv}{vl} \quad (65)$$

Siendo

Tv ; Temperatura del vapor [°c]

vv ; Volumen específico del vapor [m^3/kg]

vl ; Volumen específico del líquido [m^3/kg]

Ml ; masa de líquido [kg]

Mv ; masa de vapor [kg]

dTv ; derivada de la función 'Tv' respecto al tiempo

dvv ; derivada de la función 'vv' respecto a la temperatura del vapor

dvl ; derivada de la función 'vl' respecto a la temperatura del vapor

dMl ; derivada de la función 'Ml' respecto al tiempo

dMv ; derivada de la función 'Mv' respecto al tiempo

Balance de masa de vapor

$$\frac{dMv}{dt} = mw - mv - \frac{dMl}{dt} \quad (66)$$

Siendo

mv ; Flujo másico de vapor [kg/s]

mw ; Flujo másico de líquido [kg/s]

dMv : Variación de la masa de vapor en la caldera respecto al tiempo [kg/s]
 dMl : Variación de la masa de líquido en la caldera respecto al tiempo [kg/s]

La función de calidad para el agua dentro de la caldera

$$x = \frac{Mv}{Ml+Mv} \quad (67)$$

Balance de Energía

$$\frac{dTv}{dt} = \frac{Q_{util} + mw * hw - mv * hv}{(Vt * a)} \quad (68)$$

$$a = \frac{(x * duv + (1 - x) * dul) * (x * vv + (1 - x) * vl) - (x * uv + (1 - x) * ul) * (x * dvv + (1 - x) * dvl)}{(x * vv + (1 - x) * vl)^2}$$

Donde

mw ; Flujo másico de agua de alimentación

hw ; Entalpía del agua de alimentación

mv ; Flujo másico de vapor

hv ; Entalpía del vapor

duv ; Derivada de la energía interna del vapor

dul ; Derivada de la energía interna del líquido

Donde x es la calidad del agua en la caldera y se halla con la Ecuación 67

- Rendimiento de la caldera

$$\eta_{caldera} = \frac{Q_{\acute{u}til}}{Q_{total}} = \frac{Q_g - Q_p}{Q_g} \quad (69)$$

- Controles implementados para la operación de la caldera

Control PI para la regulación de la presión de operación de la caldera

$$\begin{aligned} error &= Pref - Pc; \\ Cp &= (Kp) * error; \\ ci &= Cia + ((Ki) * error); \\ mc &= (Cp + ci); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{if } mc > mcmax \\ & \quad mc = mcmax; \\ & \quad \text{end} \\ & \text{if } mc < 0 \\ & \quad mc = mcminimo; \\ & \quad \text{end} \end{aligned} \quad (70)$$

Donde

Kp ; Constante proporcional

Ki ; Constante integral

mc ; Masa de combustible

Control ON-OFF para el nivel de líquido en la caldera

```
if  $Vl > Vmax$ 
     $mw = 0;$ 
else
     $mw = mwa;$ 
end
if  $Vl < Vmin$ 
     $mw = mwmax;$ 
end
```

(71)

mw ; Flujo másico de agua de alimentación de la caldera

Vl ; Volumen de agua en la caldera

6.2 SIMULACIÓN DEL SISTEMA

Condiciones para la simulación del sistema en conjunto:

Temperatura inicial de agua de alimentación del sistema térmico solar de 20°C

Flujo másico de circulación del colector solar de 0,03Kg/s

Flujo másico de alimentación de agua de la caldera, será la misma cantidad de flujo másico de restitución en tanque de acumulación de 0,17 Kg/s

Temperatura de agua de restitución en tanque acumulación igual a Temperatura ambiente.

Presión de trabajo de caldera de 20HP igual a 150PSI.

Demanda de vapor constante en todo el lapso de funcionamiento igual a 0,086Kg/s.

- Datos meteorológicos:

La Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander cuenta con una estación meteorológica que ha monitoreado las condiciones climáticas desde el mes de Junio de 2016 hasta el presente día, la cual ha sido usada como herramienta para la adquisición de datos necesarios para la simulación.

Los datos obtenidos son del mes de Junio al mes de diciembre de 2016, registrados en intervalos de 15 minutos. Analizando cada mes, el promedio de radiación mas baja lo arrojó el mes de Julio.

Para la simulación en Matlab- Simulink, se tomó este mes y se promedió la radiación solar diaria, el día con menor valor fué el 16 de julio de 2016. Se usan los datos de este día específico, para analizar el sistema en conjunto sistema térmico solar y caldera pirotubular en condiciones críticas de operación entre las 6:00 y 18:00 horas.

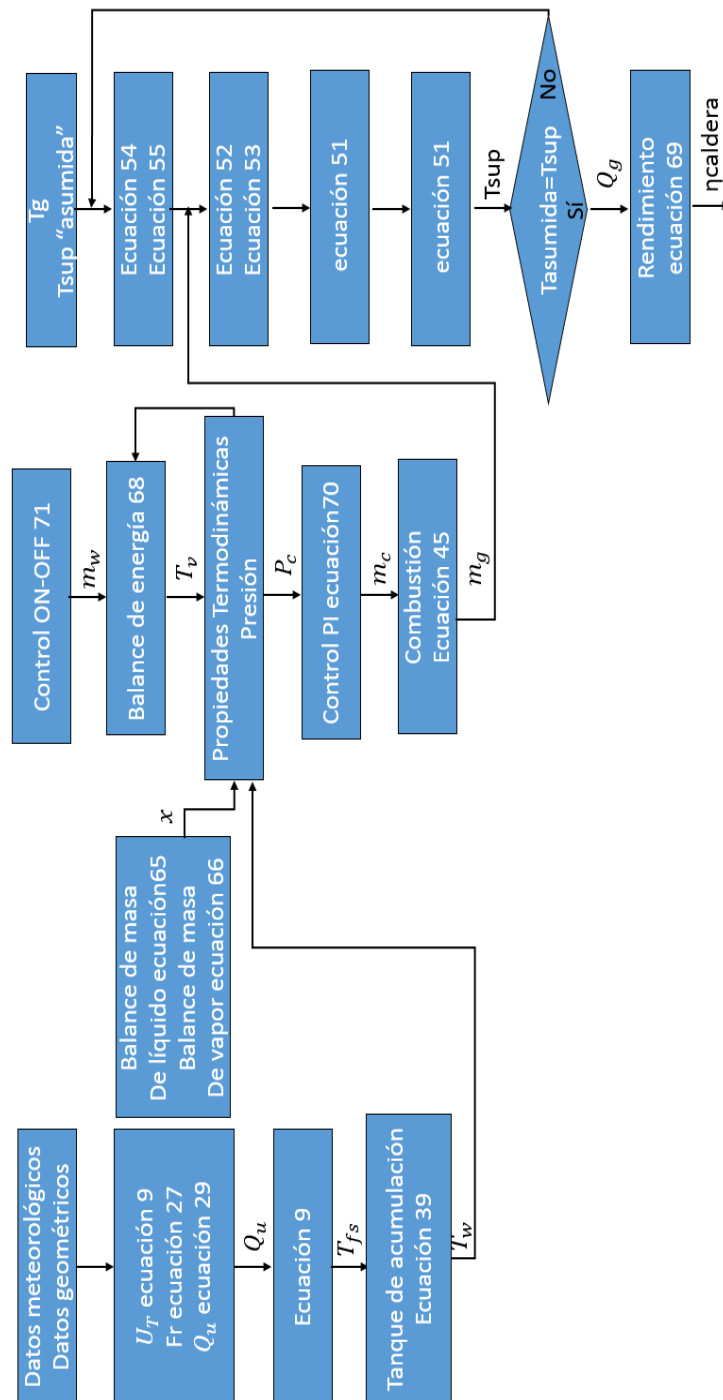
En el caso de TRNSYS, se simula con los datos completos del mes de Julio de 2016, para tener una perspectiva global de comportamiento del sistema.

6.2.1 Simulación en Matlab-Simulink: La simulación está compuesta por el sistema térmico solar y la caldera pirotubular, los cuales están relacionados mediante el agua de alimentación de la caldera que es el agua caliente proporcionada por el colector, como se menciona anteriormente, funcionando así como un solo sistema en conjunto permitiendo analizar su interacción. Aunque las simulaciones son del mismo sistema, cada herramienta software abarca un rango diferente. En el caso del Matlab simulink se toma solo un día de simulación que está entre las 6 y las 18h.

En la sección 6.1 se especifica el modelado matemático, con base en las ecuaciones que se muestran allí, se crean los diagramas de bloques en Matlab-Simulink, que dependiendo de sus entradas y salidas van conformando el funcionamiento del sistema.

En la figura 33 se puede ver el proceso mediante el cual se obtiene la temperatura del agua de alimentación de la caldera y posteriormente se presentan los diagramas de bloques usados par la simulación de forma mas especifica.

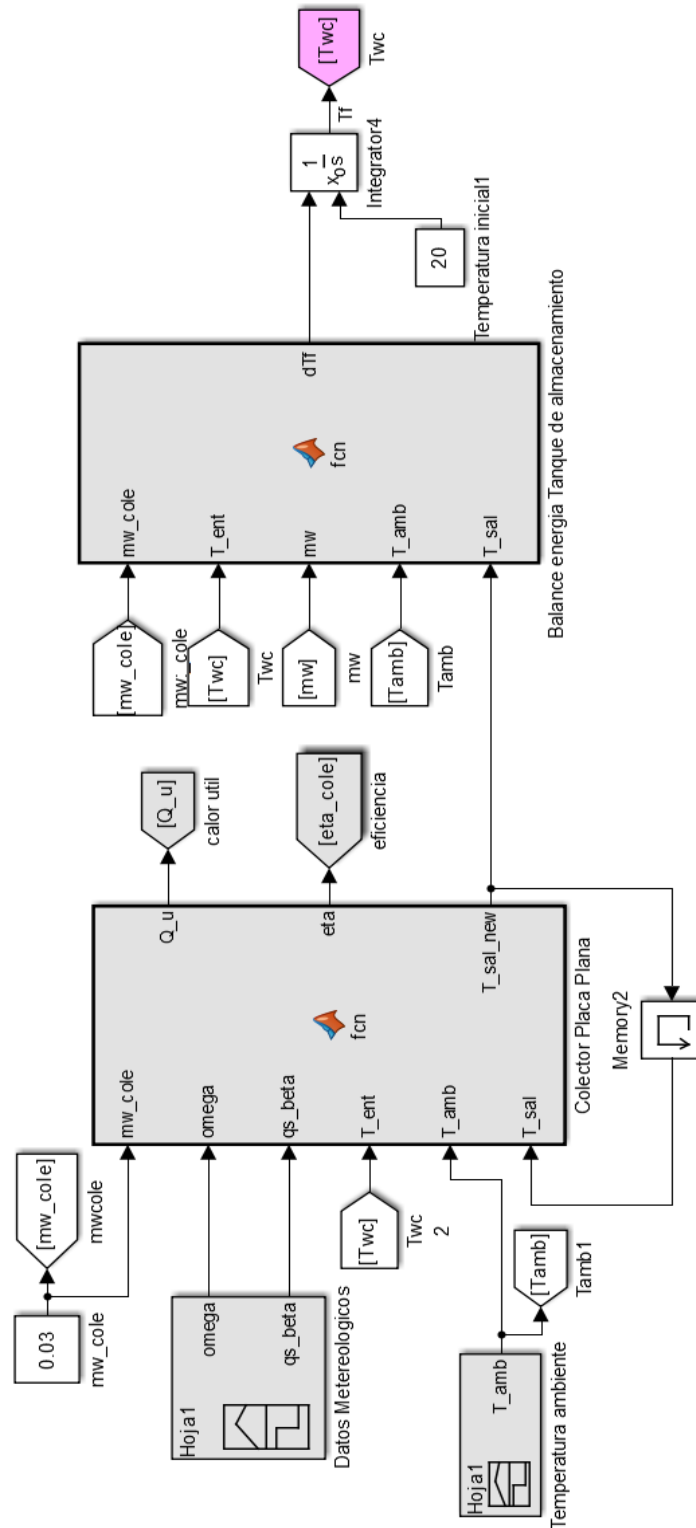
Figura 33. Diagrama de flujo para la simulación en MATLAB-SIMULINK.



En la Figura 34 se muestra la forma en la que se implementa el modelado del sistema térmico solar hecho en la sección 6.1.1. El parámetro de salida importante en este, es la denotada con el color rosa T_{wc} , siendo la temperatura de salida del agua del calentador y que a su vez se convierte en la temperatura de entrada de agua de alimentación de la caldera.

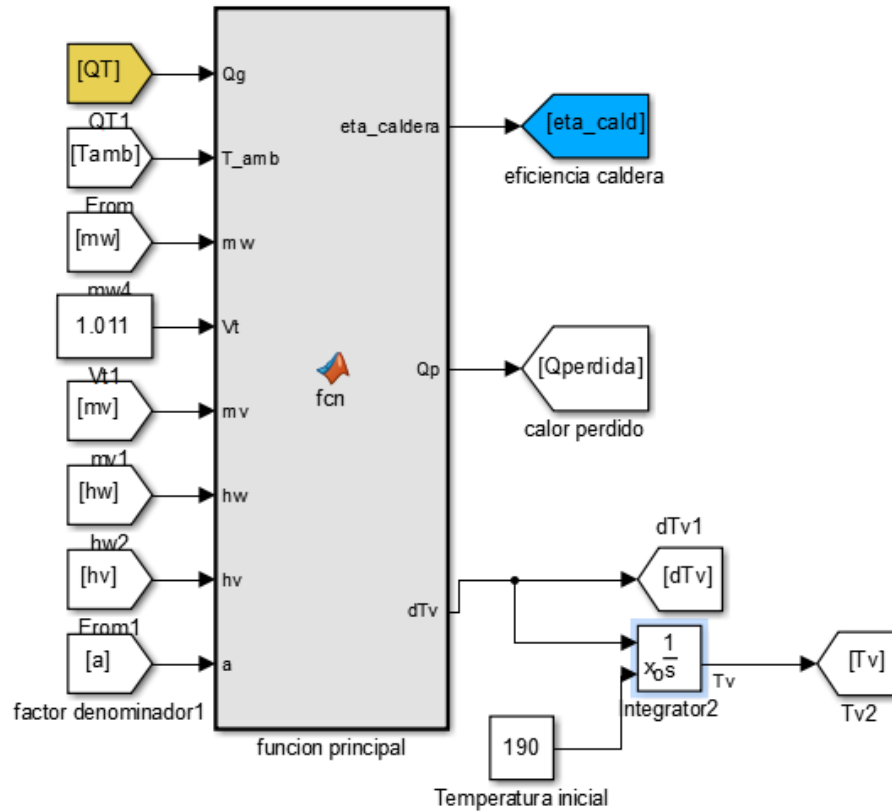
En donde las Ecuaciones 2,3 y 29 del colector solar y 71,72 del tanque acumulador son el eje principal para el cálculo de T_{wc} .

Figura 34. Diagrama de bloques del Sistema térmico solar.



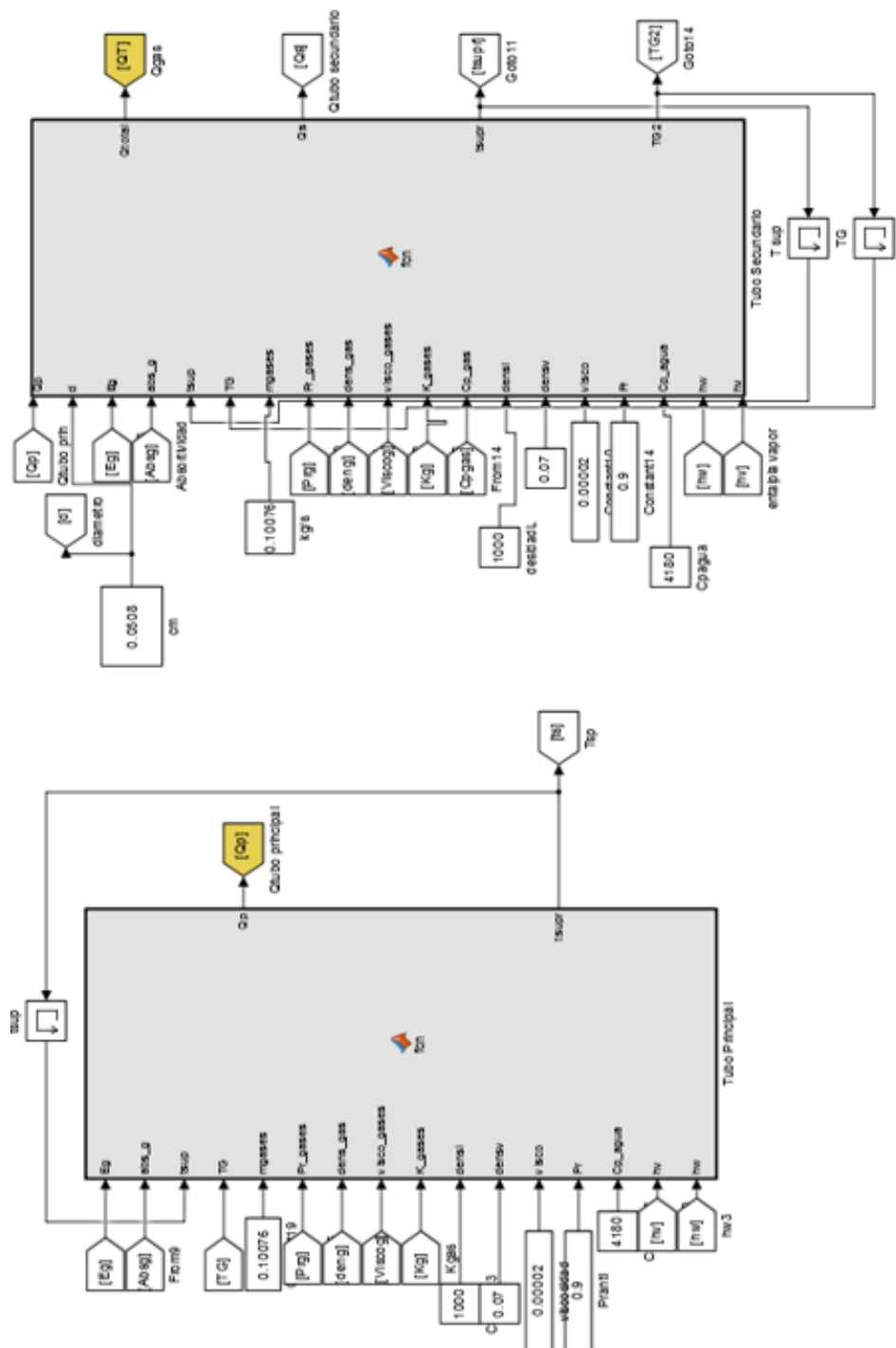
La Figura 35 muestra la Función Principal de la caldera pirotubular, la cual se desarrolla con base en las Ecuaciones 41, 61, 62 y 65. En este diagrama de bloques, se halla la eficiencia de la caldera (viñeta azul) que es el punto principal de estudio del proyecto.

Figura 35. Diagrama de bloques de la Función principal de la caldera.



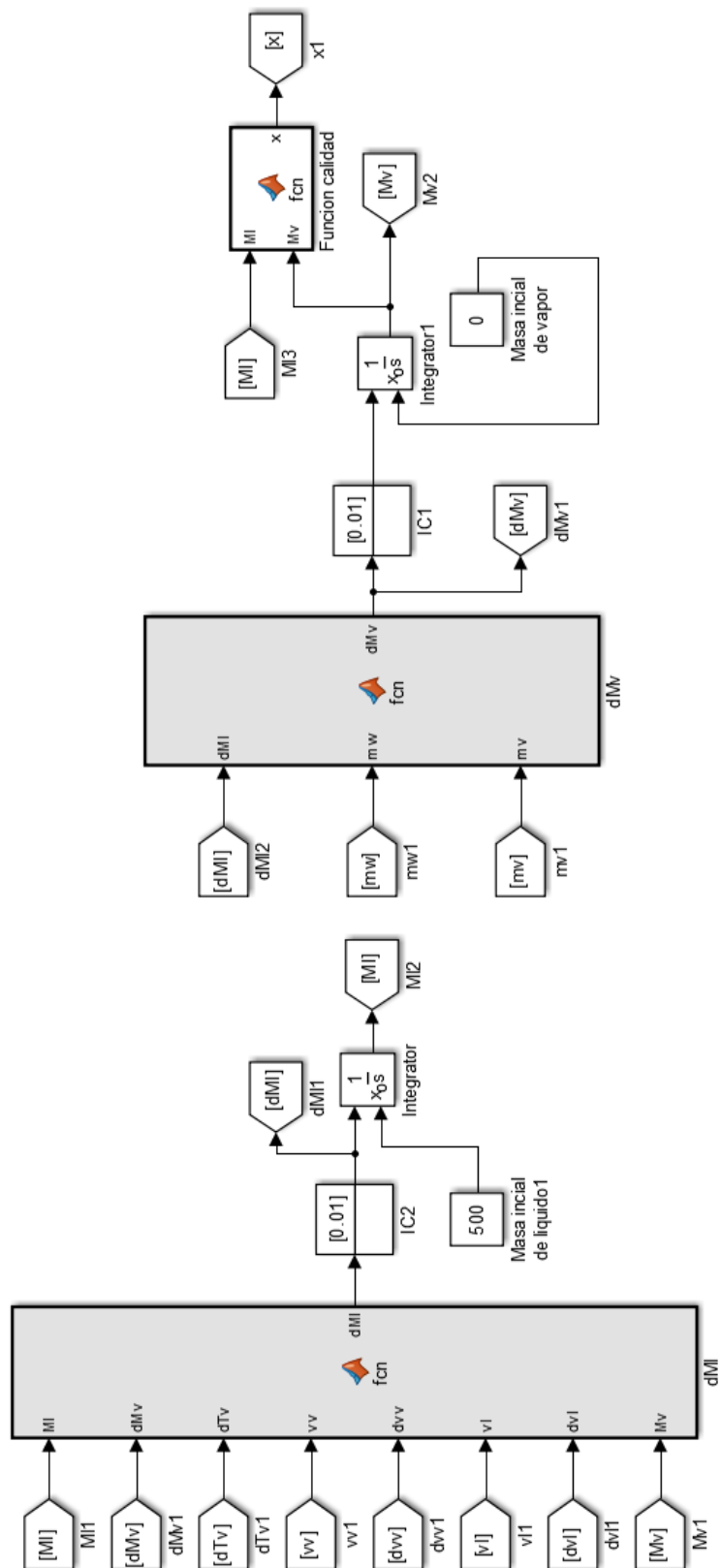
En la Figura 35, aparece un término en color amarillo denominado “QT” que anteriormente se denomina, Q_g , calculado en la Figura 36, siendo el resultado de la suma del calor en el tubo principal y el calor en los tubos secundarios de la caldera. Para este cálculo son usadas las Ecuaciones 51, 52, 53 y 61. La Figura 36.a representa la transferencia de calor en tubo principal y la Figura 36.b la transferencia de calor en los tubos secundarios.

Figura 36. Diagrama de bloques para el Cálculo del calor total, a) Calor tubo principal y b) calor Tubo Secundarios.



La Figura 37 representa en Simulink el uso de las Ecuaciones 66, 67 y 68, representación del balance de masa de líquido y de vapor, para la obtención de la calidad de la sustancia dentro de la caldera.

Figura 37. Diagrama de bloques Balance de líquido y masa de vapor de la caldera.



Las propiedades termodinámicas (presión, entalpía y volumen específico del agua saturada) necesarias para el estudio del sistema, como se muestra en la figura 38.a interactúan con sus derivadas y la calidad del fluido para dar como resultado un factor denominado en esta ocasión a , el cual hace parte de la Ecuación 65. Las propiedades se evalúan en función del rango de temperatura a la cual trabaja la caldera, por tanto se toma de 25 a 200 °C, y bajo una regresión polinomial, a través de la herramienta EES se obtienen las ecuaciones para cada propiedad presentadas a continuación:

Energía interna del líquido

$$ul = 1.47931948E + 03 + 4.11199215E + 03 * Tv + 6.29205546E - 01 * Tv^2$$

$$dul = 4.11199215E + 03 + 2 * 6.29205546E - 01 * Tv$$

Energía interna del vapor

$$uv = 2.37486886E + 06 + 1.34604208E + 03 * Tv + 5.87123656E - 01 * Tv^2 - 9.06539223E - 03 * Tv^3$$

$$duv = 1.34604208E + 03 + 2 * 5.87123656E - 01 * Tv - 3 * 9.06539223E - 03 * Tv^2;$$

Volumen específico del líquido

$$vl = 9.99849346E - 04 - 3.96315038E - 09 * Tv + 5.78590794E - 09 * Tv^2 - 1.84847804E - 11 * Tv^3 + 4.61844044E - 14 * Tv^4$$

$$dvl = -3.96315038E - 09 + 2 * 5.78590794E - 09 * Tv - 3 * 1.84847804E - 11 * Tv^2 + 4 * 4.61844044E - 14 * Tv^3$$

Volumen específico del vapor

$$vv = 1.97747826E + 02 - 1.13004855E + 01 * Tv + 2.80443580E - 01 * Tv^2 - 3.64772215E - 03 * Tv^3 + 2.56452915E - 05 * Tv^4 - 9.19211633E - 08 * Tv^5 + 1.31436121E - 10 * Tv^6$$

$$dvv = -1.13004855E + 01 + 2 * 2.80443580E - 01 * Tv - 3 * 3.64772215E - 03 * Tv^2 + 4 * 2.56452915E - 05 * Tv^3 - 5 * 9.19211633E - 08 * Tv^4 + 6 * 1.31436121E - 10 * Tv^5;$$

Entalpía del vapor

$$hv = 2.50098207E + 06 + 1.79283818E + 03 * Tv + 7.90372265E - 01 * Tv^2 - 1.22786077E - 02 * Tv^3$$

Entalpía del líquido

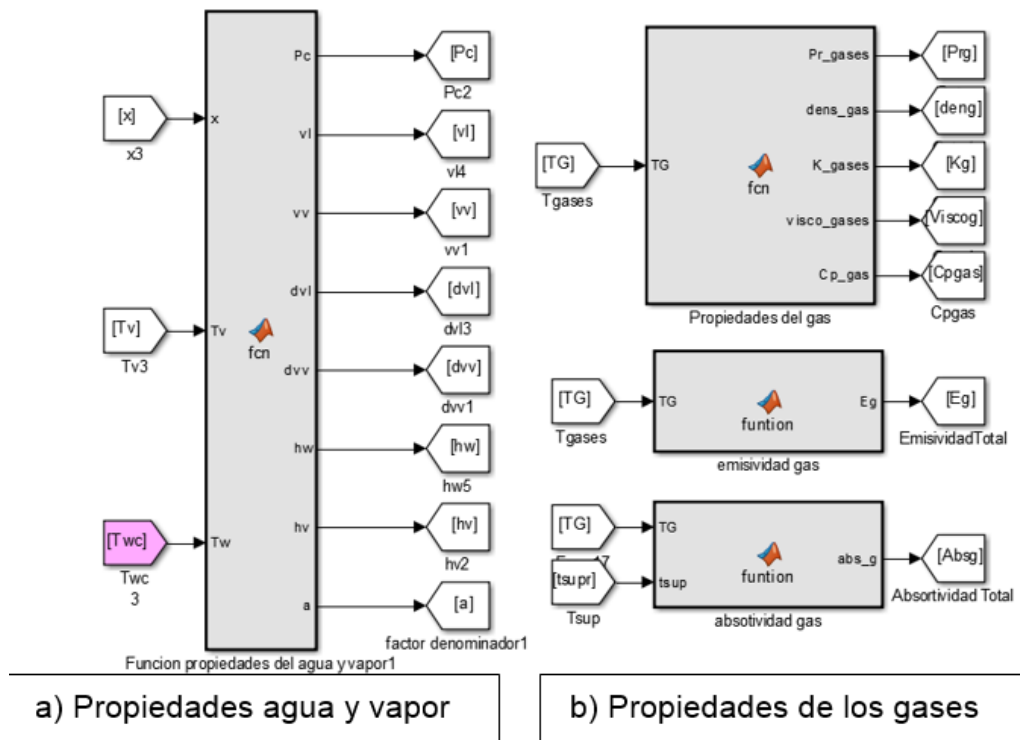
$$hw = 1.88796428E + 02 + 4.17816663E + 03 * Tw + 8.67784202E - 02 * Tw^2$$

Presión de saturación

$$P_c = 2.33866001E + 03 - 2.38040530E + 02 * Tv + 1.24286180E + 01 * Tv^2 - 1.40873455E - 01 * Tv^3 + 1.39240287E - 03 * Tv^4$$

$$a = ((x * d_{uv} + (1 - x) * d_{ul}) * (x * v_v + (1 - x) * v_l) - (x * u_v + (1 - x) * u_l) * (x * d_{vv} + (1 - x) * d_{vl})) / (x * v_v + (1 - x) * v_l)^2$$

Figura 38. Diagrama de bloques de la Función de propiedades termodinámicas.



En la figura 38.b se observa el diagrama de bloques para la emisividad y la absortividad del gas, propiedades que se hallan con las Ecuaciones 54 y 55.

Para el diagrama de bloques denominado propiedades del gas, se usan las siguientes correlaciones dependientes de la Temperatura de los gases

Cálculo de Pr_{gases}

$$Pr_{CO_2} = 7.25636854E - 01 - 1.98743914E - 05 * TG - 7.29203994E - 08 * TG^2 + 1.16037578E - 10 * TG^3 - 6.33805215E - 14 * TG^4 + 1.46384576E - 17 * TG^5 - 1.27232027E - 21 * TG^6$$

$$Pr_{H_2O} = 1.14824374E + 00 - 6.22980406E - 04 * TG + 5.98467063E - 07 * TG^2 - 2.82003531E - 10 * TG^3 + 3.86318596E - 14 * TG^4 + 9.75713284E - 18 * TG^5 - 2.54158186E - 21 * TG^6;$$

$$Pr_{N_2} = 7.25478391E - 01 - 2.81888086E - 04 * TG + 7.81621033E - 07 * TG^2 - 7.33540442E - 10 * TG^3 + 2.76604842E - 13 * TG^4 - 4.67912212E - 17 * TG^5 + 2.86608544E - 21 * TG^6;$$

$$Pr_{O_2} = 7.25636854E - 01 - 1.98743914E - 05 * TG - 7.29203994E - 08 * TG^2 + 1.16037578E - 10 * TG^3 - 6.33805215E - 14 * TG^4 + 1.46384576E - 17 * TG^5 - 1.27232027E - 21 * TG^6$$

$$Pr_{gases} = ((X_{h_2o} * Pr_{H_2O}) + (X_{co_2} * Pr_{CO_2}) + (X_{n_2} * Pr_{N_2}) + (X_{o_2} * Pr_{O_2}))$$

Cálculo de la densidad del gas

$$rho_{co_2} = 5.95651391E - 02 - 1.25245337E - 04 * TG + 1.44946213E - 07 * TG^2 - 9.97227955E - 11 * TG^3 + 4.07929947E - 14 * TG^4 - 9.18828057E - 18 * TG^5 + 8.79280789E - 22 * TG^6$$

$$rho_{h_2o} = 5.98483275E - 02 - 1.26225016E - 04 * TG + 1.46386199E - 07 * TG^2 - 1.00867175E - 10 * TG^3 + 4.13089345E - 14 * TG^4 - 9.31294444E - 18 * TG^5 + 8.91861046E - 22 * TG^6$$

$$rho_{n_2} = 5.95335190E - 02 - 1.25176178E - 04 * TG + 1.44872510E - 07 * TG^2 - 9.96769619E - 11 * TG^3 + 4.07760173E - 14 * TG^4 - 9.18479413E - 18 * TG^5 + 8.78974223E - 22 * TG^6$$

$$rho_{o_2} = 5.95651391E - 02 - 1.25245337E - 04 * TG + 1.44946213E - 07 * TG^2 - 9.97227955E - 11 * TG^3 + 4.07929947E - 14 * TG^4 - 9.18828057E - 18 * TG^5 + 8.79280789E - 22 * TG^6$$

Peso molecular de cada producto

$$Mm_{CO_2} = 44$$

$$Mm_{H_2O} = 18$$

$$Mm_{O_2} = 32$$

$$Mm_{N_2} = 28$$

Moles de cada producto

$$N_{CO_2} = 1$$

$$N_{H_2O} = 2$$

$$N_{N_2} = 9,024$$

$$N_{O_2} = 0,4$$

$$N_{totales} = N_{CO_2} + N_{H_2O} + N_{N_2} + N_{O_2}$$

Masa de cada producto

$$m_{CO_2} = N_{CO_2} * Mm_{CO_2}$$

$$m_{H_2O} = N_{H_2O} * Mm_{H_2O}$$

$$m_{O_2} = N_{O_2} * Mm_{O_2}$$

$$m_{N_2} = N_{N_2} * Mm_{N_2}$$

$$m_{total} = m_{CO_2} + m_{H_2O} + m_{O_2} + m_{N_2}$$

Volumen de cada producto

$$v_{CO_2} = \frac{m_{CO_2}}{rho_{co_2}}$$

$$v_{H_2O} = \frac{m_{H_2O}}{rho_{h_2o}}$$

$$v_{O_2} = \frac{m_{O_2}}{rho_{o_2}}$$

$$v_{N_2} = \frac{m_{N_2}}{rho_{n_2}}$$

$$v_{total} = v_{CO_2} + v_{H_2O} + v_{O_2} + v_{N_2}$$

La densidad del gas quedaría:

$$dens_{gas} = \frac{m_{total}}{v_{total}}$$

Cálculo del calor específico del gas

$$Cp_{h2o} = 47.52 + 0.003085 * TG - 3.0043e - 7 * TG^2 + 5.8055e - 12 * TG^3 + 1.1741727e - 15 * TG^4 - 2.2818e - 19 * TG^5 + 1.617e - 23 * TG^6$$

$$Cp_{co2} = 5.87747509E1 + 1.69378690E - 3 * TG - 4.10871235E - 7 * TG^2 + 7.05593844E - 11 * TG^3 - 8.32045444E - 15 * TG^4 + 8.31301123E - 19 * TG^5 - 4.62437735E - 23 * TG^6$$

$$Cp_{n2} = 3.49586547E + 1 + 9.11541491E - 4 * TG - 1.65241239E - 7 * TG^2 + 2.61350248E - 11 * TG^3 - 3.45622253E - 15 * TG^4 + 3.34620828E - 19 * TG^5 - 1.71323646E - 23 * TG^6$$

$$Cp_{o2} = 3.67749156E + 1 + 9.03531759E - 4 * TG - 9.03901171E - 8 * TG^2 + 2.13236048E - 11 * TG^3 - 3.63578634E - 15 * TG^4 + 4.39677364E - 19 * TG^5 - 2.69753077E - 23 * TG^6;$$

$$Cp_{molar_{gas}} = (X_{h2o} * Cp_{h2o}) + (X_{co2} * Cp_{co2}) + (X_{n2} * Cp_{n2}) + (X_{o2} * Cp_{o2});$$

$$PM_{h2o} = 18$$

$$PM_{co2} = 44$$

$$PM_{n2} = 28$$

$$PM_{o2} = 32$$

$$PM_{gas} = (X_{h2o} * PM_{h2o}) + (X_{co2} * PM_{co2}) + (X_{n2} * PM_{n2}) + (X_{o2} * PM_{o2});$$

$$Cp_{gas} = \frac{Cp_{molar_{gas}}}{PM_{gas}}$$

Cálculo de la conductividad del gas

$$k_{co2} = -7.80744600E - 03 + 8.26716900E - 05 * TG - 1.59463197E - 09 * TG^2 - 4.82341902E - 12 * TG^3 + 8.71889144E - 24 * TG^4 - 2.01668489E - 27 * TG^5 + 1.90906154E - 31 * TG^6$$

$$k_{h2o} = 4.13288550E - 05 + 2.73704329E - 05 * TG + 1.08322753E - 07 * TG^2 - 5.13982915E - 11 * TG^3 + 1.51467052E - 14 * TG^4 - 2.60696590E - 18 * TG^5 + 1.97477301E - 22 * TG^6$$

$$k_{n2} = -4.36238086E - 05 + 1.02003199E - 04 * TG - 5.94157699E - 08 * TG^2 + 2.22278299E - 11 * TG^3 + 4.43305421E - 23 * TG^4 - 1.02778336E - 26 * TG^5 + 9.75128673E - 31 * TG^6$$

$$k_{o2} = -2.71096800E - 05 + 9.09042944E - 05 * TG - 1.09474415E - 08 * TG^2 - 9.04864481E - 12 * TG^3 + 6.38509762E - 15 * TG^4 - 1.36640864E - 18 * TG^5 + 1.14114622E - 22 * TG^6$$

$$K_{gases} = ((X_{h2o} * k_{h2o}) + (X_{co2} * k_{co2}) + (X_{n2} * k_{n2}) + (X_{o2} * k_{o2}))$$

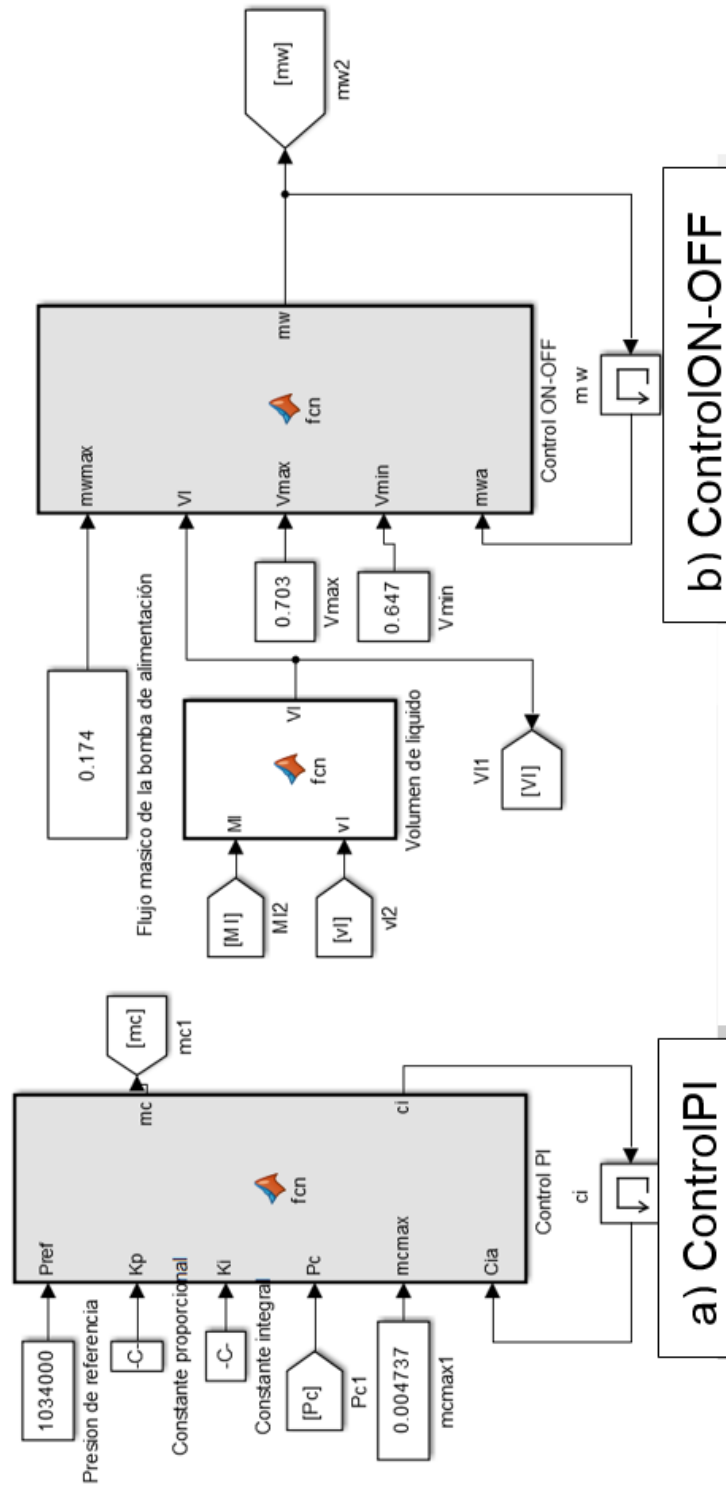
Cálculo de la viscosidad del gas

$$\begin{aligned}\mu_{CO_2} &= -7.70240907E - 07 + 5.83226600E - 08 * TG - 1.99275000E - 11 * TG^2 \\ &\quad + 3.77875403E - 15 * TG^3 - 1.37302805E - 26 * TG^4 + 3.18030854E - 30 \\ &\quad * TG^5 - 3.01744116E - 34 * TG^6 \\ \mu_{H_2O} &= -5.30283739E - 06 + 4.33611008E - 08 * TG + 6.51349869E - 12 * TG^2 \\ &\quad - 1.09101074E - 14 * TG^3 + 4.88647482E - 18 * TG^4 - 1.04798928E - 21 \\ &\quad * TG^5 + 9.05784151E - 26 * TG^6 \\ \mu_{N_2} &= 5.67672064E - 07 + 6.88725101E - 08 * TG - 4.46410002E - 11 * TG^2 + 1.81565202E \\ &\quad - 14 * TG^3 - 2.82637607E - 18 * TG^4 + 1.67269536E - 29 * TG^5 \\ &\quad - 1.58551395E - 33 * TG^6 \\ \mu_{O_2} &= 4.96360743E - 06 + 6.35840951E - 08 * TG - 3.14236292E - 11 * TG^2 + 1.60988490E \\ &\quad - 14 * TG^3 - 5.25241139E - 18 * TG^4 + 9.68355329E - 22 * TG^5 \\ &\quad - 7.66944024E - 26 * TG^6\end{aligned}$$

$$visco_{gases} = ((X_{h_2o} * \mu_{H_2O}) + (X_{co_2} * \mu_{CO_2}) + (X_{n_2} * \mu_{N_2}) + (X_{o_2} * \mu_{O_2}))$$

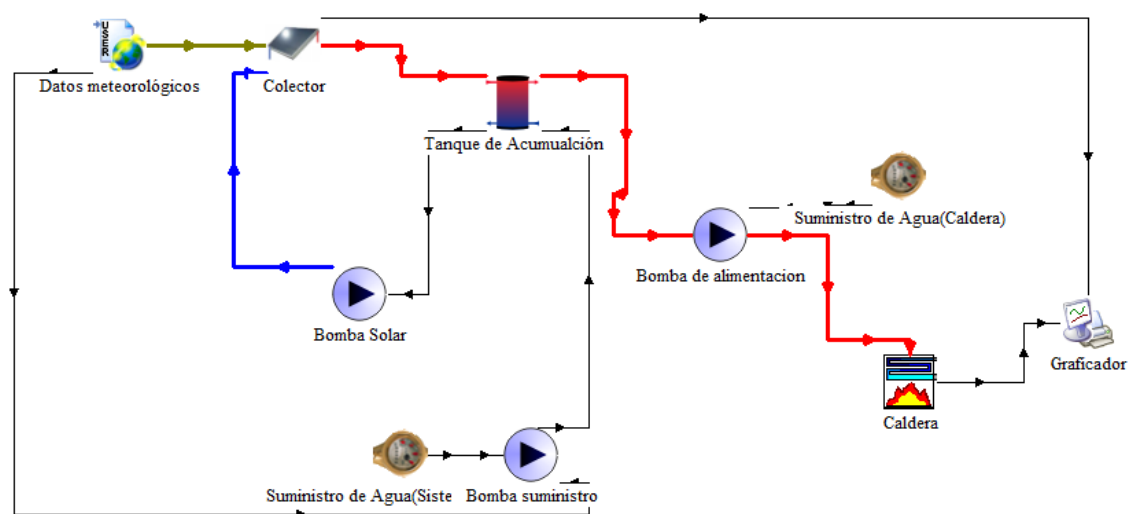
La Figura 39 muestra el diagrama de bloques de los respectivos Controles de la caldera: en la Figura 39.a se observa el control PI, el cual es el encargado para la regulación de la presión de trabajo de la caldera Ecuación 69. En la Figura 39.b se observa el control ON-OFF que es el inspector del volumen de agua en la caldera Ecuación 70.

Figura 39. Diagrama de bloques de control a) Control PI y b) Control ON-OFF.



6.2.2 Simulación en TRNSYS : Este software no requiere de un modelo, puesto que una de las ventajas es esa, su contenido ofrece una serie de componentes de sistemas térmicos ya establecidos llamados *Types*. El procedimiento que se sigue, es la selección de cada uno de ellos con base en los requerimientos y características del sistema a simular. Cada *Type* cuenta con parámetros de entrada que son los que permiten la identificación y personalización del sistema. Haciendo énfasis en que esta simulación, recopila el comportamiento mensual en Julio, abarcando un rango mucho mayor al de Matlab, siendo el mes con mas baja radiación, dando así unos resultados mas generales .

Figura 40. Esquema general de la simulación en TRNSYS.



En la figura 40 se muestra el esquema general de los componentes que forman el sistema, como se ve se tienen específicamente los siguientes *types*:

Colector solar: El software cuenta con diferentes tipos de colector solar, lo cual permite elegir el del sistema propuesto, colector solar de placa plana identificado *Type73*.

Bombas (alimentación y colector): La simulación cuenta con dos bombas, una es la bomba solar, que como su nombre lo dice en la encargada de proveer el flujo de agua al sistema térmico solar con 238.099Lb/h, y la segunda es la bomba de alimentación de la caldera, trabajando un caudal 690 Lb/h correspondiente al agua de ingreso a la caldera, seleccionando el *Type114*.

Suministro de agua: *Type 14b*, el cual es donde se controla la circulación de agua con un lapso de 24 horas en este caso.

Acumulador: El tanque de acumulación corresponde al *Type4a*, posee las características necesarias semejantes al caracterizado.

Caldera: *Type639* , es la caldera productora de vapor con una eficiencia común del 85%.

Las impresoras: Este *Type65c* es el encargado de recibir las salidas elegidas y graficarlas, del modo como lo haga depende de la configuración que el usuario le asigne.

La hoja de datos meteorológicos: Se eligió este *Type99* entre las opciones de ingreso de datos, debido a que los datos usados son reales sensados en una ciudad específica, lo cual implica una ubicación geográfica puntual. Este elemento inicialmente contiene la hoja de datos la cual se visualiza en el Anexo 4 (archivo Txt. Ver anexo3) ,el permite su edición admitiendo la entrada de las características del sitio de estudio.

Los cambios realizados se observan en la Figura 41 donde se evidencia el antes y después de la hoja de datos meteorológicos. Longitud, latitud, GTM

Figura 41. Señalización de los cambios realizados a la hoja original del *Type99*.

```

<longitude> -73.12      ! east of greenwich: negative
<latitude>   7.11      ! Bucaramanga, Colombia
<gmt>       -5        ! time shift from GMT - if solar time-> write "solar"
<interval>  1/4       ! Data file time interval between consecutive lines
<firsttime>  0        ! Time corresponding to first data line (hours)
<var>  IBEAM_H <col>  0 <interp> 0 <add>  0 <mult> 1    <samp> -1    !...to get radiation in W/m²
<var>  IBEAM_N <col>  0 <interp> 0 <add>  0 <mult> 1    <samp>  0    !...to get radiation in W/m²
<var>  IDIFF_H <col>  6 <interp> 0 <add>  0 <mult> 1    <samp> -1    !...to get radiation in W/m²
<var>  IGLOB_H <col>  5 <interp> 0 <add>  0 <mult> 1    <samp>  0    !...to get radiation in W/m²
<var>  TAMB    <col>  3 <interp> 2 <add>  0 <mult> 1    <samp>  0    !...to get °C
<var>  RHUM    <col>  4 <interp> 1 <add>  0 <mult> 100 <samp>  0 !...to get relative humidity in %
<var>  WSPEED  <col>  2 <interp> 1 <add>  0 <mult> 1    <samp>  0    !...to get wind speed in m/s
<var>  WDIR    <col>  1 <interp> 1 <add>  0 <mult> 1    <samp>  0    !...to get wind direction in degree
<var>  udef1   <col>  0 <interp> 0 <add>  0 <mult> 1    <samp>  0    !...to get ... in ...
<var>  udef2   <col>  0 <interp> 1 <add>  0 <mult> 1    <samp>  0    !...to get ... in ...
<var>  udef3   <col>  0 <interp> 1 <add>  0 <mult> 1    <samp>  0    !...to get ... in ...
<var>  udef4   <col>  0 <interp> 0 <add>  0 <mult> 1    <samp>  0    !...to get ... in ...
<data>
230  0.4  21.9  0.89  0  0

```

7. DESARROLLO FASE III: VALIDACION DE RESULTADOS

La utilidad de una simulación se basa en la confiabilidad de sus resultados. Como se presenta desde el inicio, la simulación realizada para este trabajo de grado corresponde a un sistema térmico solar y una caldera pirotubular funcionando en conjunto. En la presente fase, se hace la validación por separado para cada sistema con base en los datos proporcionados por los catálogos de los fabricantes y trabajos realizados en la asignatura de Sistemas Térmicos para corroborar la veracidad del comportamiento y los resultados arrojados.

A continuación se describe el proceso que se realizará para llevar a cabo la Fase III:

Paso 1. Es necesario determinar el comportamiento del modelo bajo diferentes circunstancias, dejando sus parámetros de interés en la forma más simple, es decir valores constantes, sin incluir las características más complejas del modelo. Se imprimirán las gráficas correspondientes a las respuestas, con el objetivo de obtener información que permita observar si el programa se comporta como se espera que lo haga.

Paso 2. Se debe hacer la verificación de chequear el modelo y el programa para asegurarse de que se comporta como se espera, esta revisión con base en el paso 1.

Paso 3. Después de chequear un comportamiento coherente, se introducirán los datos meteorológicos reales y corroborar la compilación correcta del programa.

Paso 4. Existen dos formas de validar un modelo:

- a) Permitir que el usuario chequee que la simulación se desarrolla como debe. El usuario no tiene por qué entender el código, pero sí debe poder entender el diagrama de actividades y debe participar activamente en el planteo de los objetivos del trabajo y por ende en la lógica y detalles de la simulación.
- b) Brindar estadísticas que confirmen que la simulación produce resultados similares a los del sistema real.

Paso 5. Análisis de sensibilidad

Se analiza la conducta y respuesta del modelo cuando se testean distintas hipótesis y niveles de factores.

En el proceso de validación se utiliza análisis de sensibilidad para:

- a. Asegurarse que el modelo produce resultados razonables cuando los factores e hipótesis son cambiados.
- b. Simplificar la estructura del modelo. Si el cambio en los niveles de algunos factores no implica cambios en las respuestas del modelo, entonces

podríamos pensar en omitir algún recurso o actividad implicada en esos cambios.

El análisis de sensibilidad se utiliza también en el propio proceso de experimentación, para estudiar los efectos causados en los resultados del modelo, al cambiar algunos factores.

Se aclara que esta fase se realiza con el modelo ya terminado y simulado no hubo cambios luego del estudio de validación.

7.1 VALIDACION MATLAB-SIMULINK

- Pruebas para Sistema térmico solar

Unas de las variables de entrada del sistema térmico solar son el ángulo de la hora (ω), Energía Total incidente ($Q_{S_{beta}}$) y la Temperatura ambiente (T_{amb}). Para la validación de resultados se considera dejar el ángulo de la hora variable, de 6 a las 18 horas que es el lapso de comienzo y fin de la radiación, que también es el tiempo correspondiente para los datos meteorológicos reales que se emplearon en la simulación. Las variables con las que se emplearán los pasos descritos anteriormente son $Q_{S_{beta}}$ y T_{amb} .

Paso1. Se elige dos valores constantes aleatoriamente para evaluar el comportamiento del modelo.

Para la Figura 42, la Figura 43 y la Figura 44 $Q_{S_{beta}} = 500 \frac{W}{m^2}$ y $T_{amb} = 20^\circ C$

Para la Figura 45, la Figura 46 y la Figura 47 $Q_{S_{beta}} = 250 \frac{W}{m^2}$ y $T_{amb} = 20^\circ C$

Para la Figura 48 $Q_{S_{beta}} = 500 \frac{W}{m^2}$ y $T_{amb} = variable$ (datos meteorológicos)

Figura 42. Gráfica eficiencia colector, Tamb y Tm vs Tiempo, con valor de Temperatura ambiente constante equivalente a 20°C y Qsbeta=500 W/m2. Matlab-Simulink(Colector).

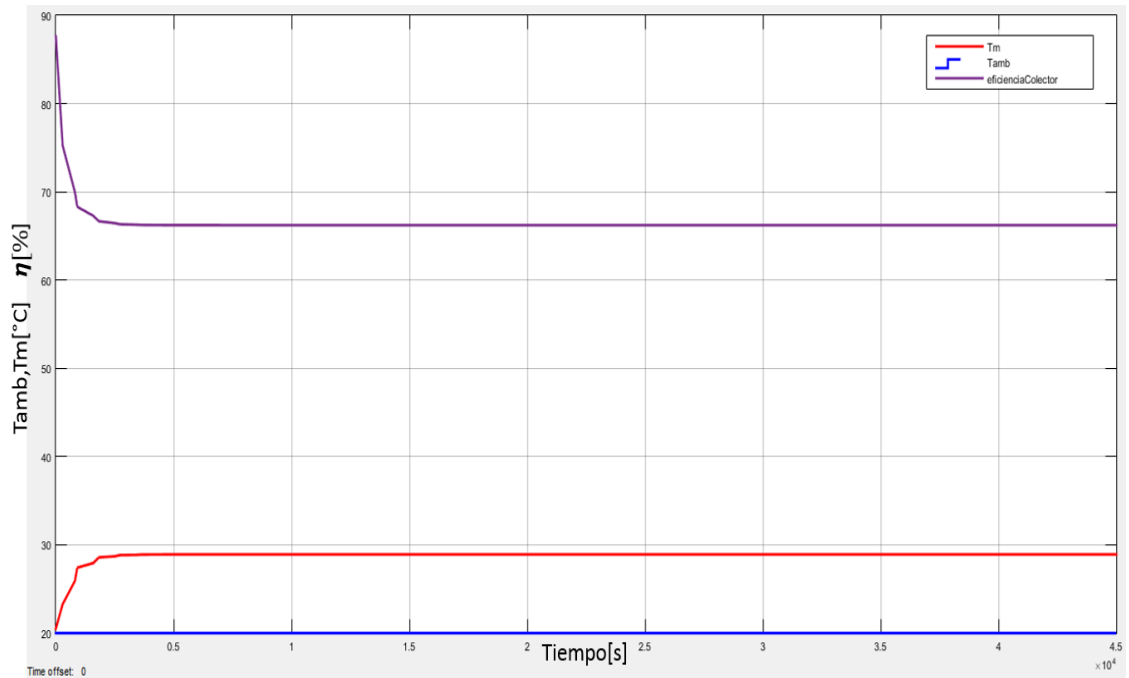


Figura 43. Gráfica Calor Total Incidente y Calor útil vs Tiempo, con valor de Temperatura ambiente constante equivalente a 20°C y Qsbeta=500 W/m2. Matlab-Simulink(Colector).

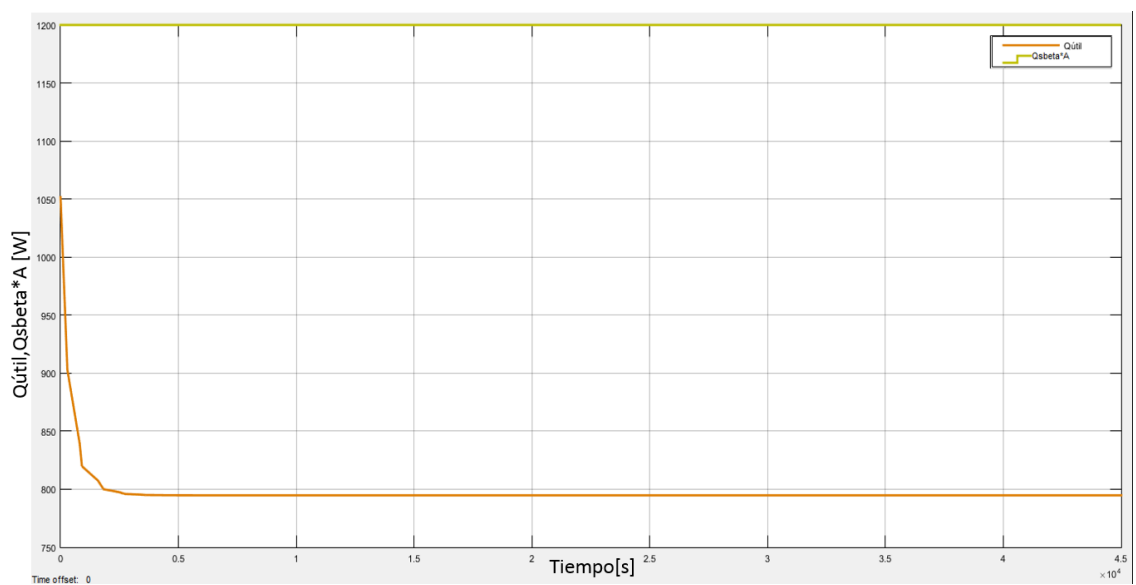


Figura 44. Gráfica Temperatura Ambiente y Temperatura del agua de salida del colector vs Tiempo, con valor de Temperatura ambiente constante equivalente a 20°C y $Q_{s\beta}=500 \text{ W/m}^2$. Matlab-Simulink(Colector).

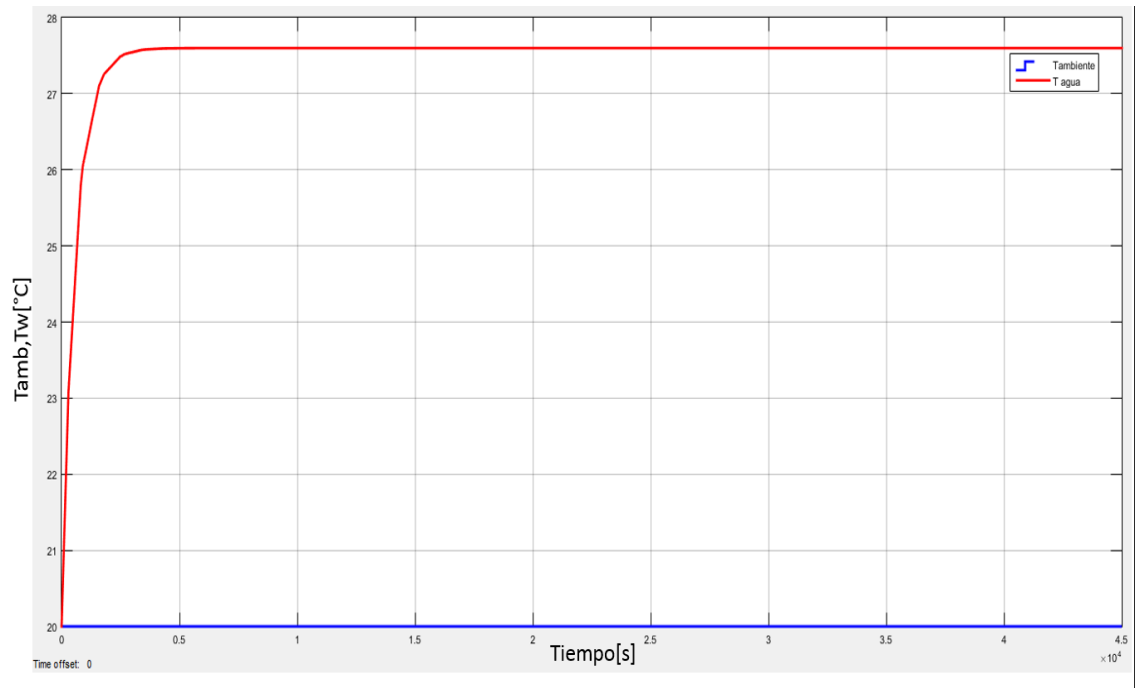


Figura 45. Gráfica eficiencia colector, T_{amb} y T_{agua} de salida del colector vs Tiempo, con valor de Temperatura ambiente constante equivalente a 20°C y $Q_{s\beta}=250 \text{ W/m}^2$. Matlab-Simulink(Colector).

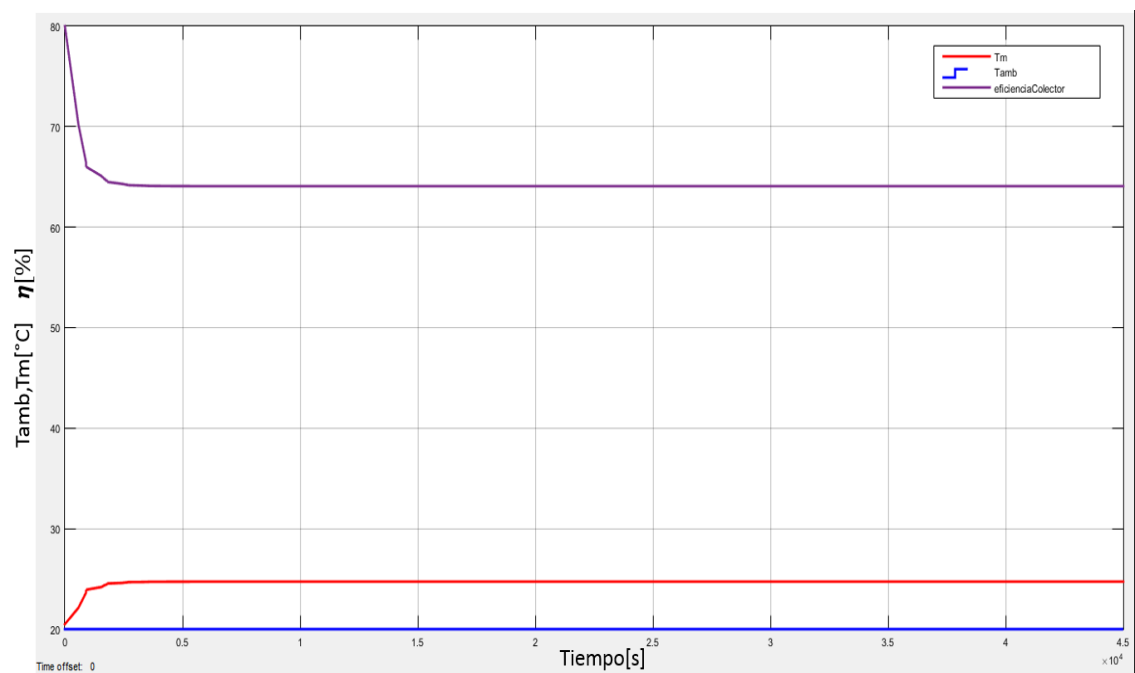


Figura 46. Gráfica Calor Total Incidente y Calor útil vs Tiempo, con valor de Temperatura ambiente constante equivalente a 20°C y $Q_{\beta}=250 \text{ W/m}^2$. Matlab-Simulink(Colector).

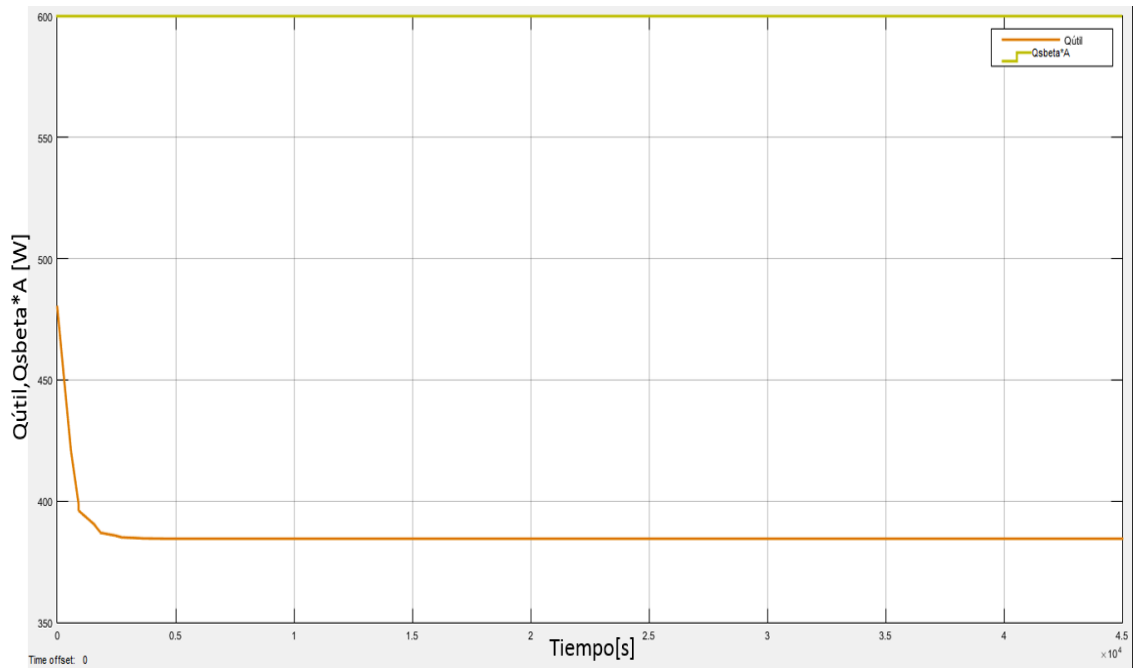


Figura 47. Gráfica Temperatura Ambiente y Temperatura del agua de salida del colector vs Tiempo, con valor de Temperatura ambiente constante equivalente a 20°C y $Q_{\beta}=250 \text{ W/m}^2$. Matlab-Simulink(Colector).

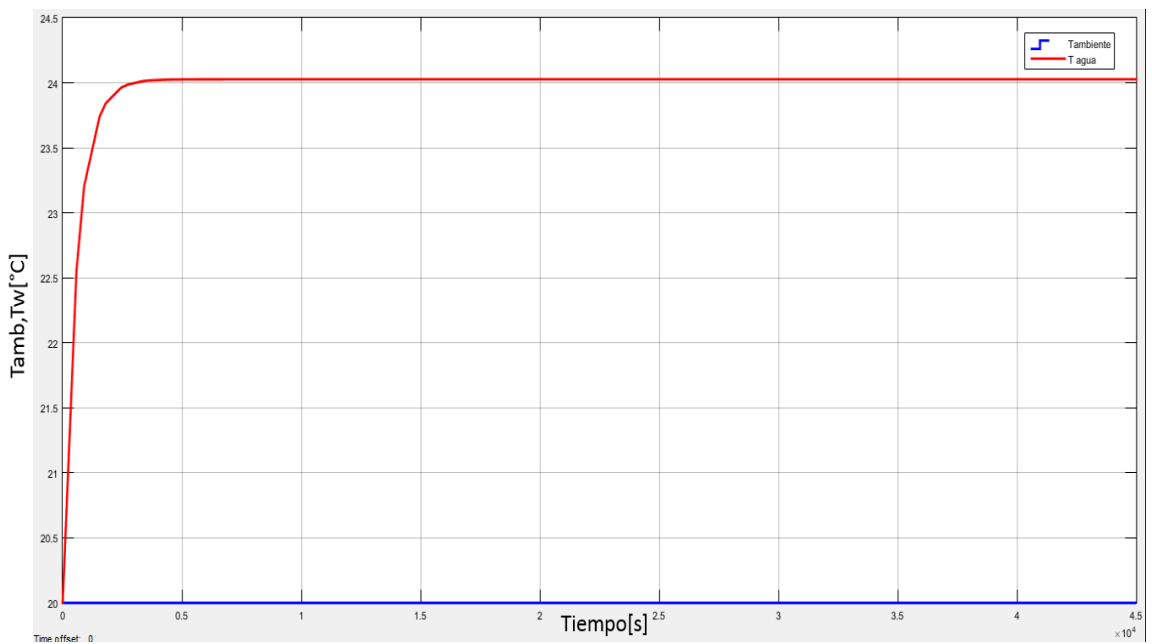
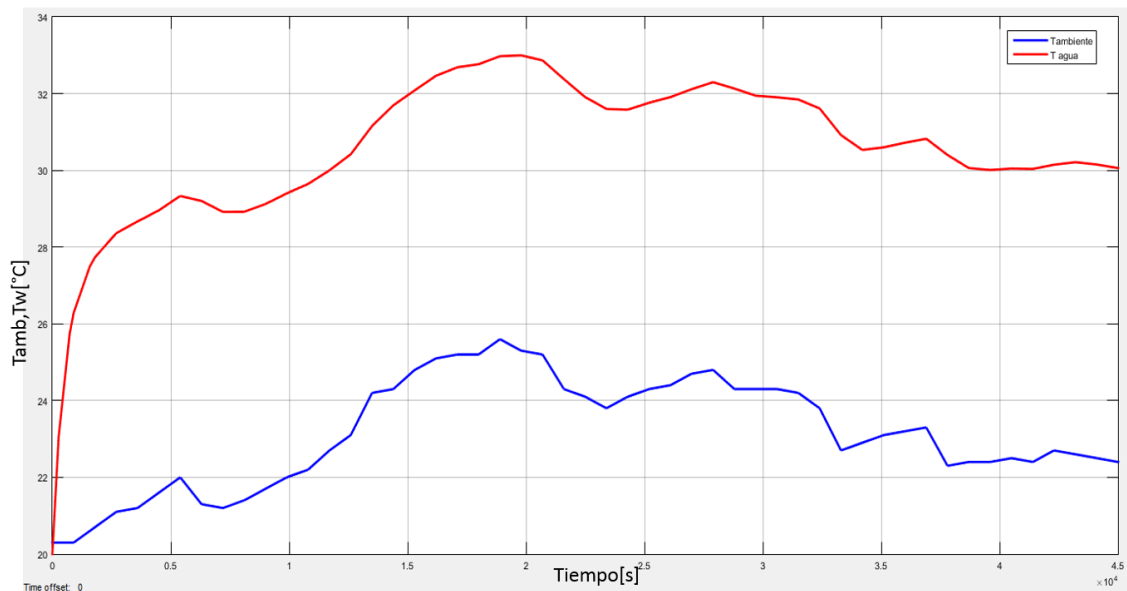


Figura 48. Gráfica Temperatura Ambiente-Temperatura del agua de salida del colector vs Tiempo, con valor de $Q_{s\beta}= 500$ y Temperatura ambiente variable (Datos meteorológicos reales). Matlab-Simulink(Colector).



Paso 2. Se hizo la compilación del modelo con valores constantes de Temperatura ambiente y Calor total incidente.

Para un valor de $T_{amb} = 20^{\circ}\text{C}$ y un $Q_{s\beta}=500\text{W m}^2$: La Figura 42 muestra Eficiencia de colector (η Línea morada) alrededor de 66%, Temperatura ambiente (Tamb Línea azul), Temperatura media del agua (Tm Línea roja) de $28,7^{\circ}\text{C}$. La Figura 43 muestra $Q_{\acute{u}til}$ (Línea café) y $Q_{s\beta}$ (Línea verde). Para la Figura 44 muestra Temperatura del agua (T_w Línea roja) y Temperatura ambiente (Tamb Línea azul).

Para un valor de $T_{amb} = 20^{\circ}\text{C}$ y un $Q_{s\beta}=250\text{W m}^2$: La Figura 45 muestra Eficiencia de colector (η Línea morada) más baja con respecto a la de la Figura 42, aún cuando Temperatura media del agua (Tm Línea roja) disminuye tomando el valor de 24°C , esto se da, porque la eficiencia del colector depende también de la radiación incidente, que para este caso disminuyó en mayor proporción que la temperatura del agua. Temperatura ambiente (Tamb Línea azul),. La Figura 46 muestra $Q_{\acute{u}til}$ (Línea café) y $Q_{s\beta}$ (Línea verde). Para la Figura 47 muestra Temperatura del agua (T_w Línea roja) y Temperatura ambiente (Tamb Línea azul).

Comparando la Figura 42 con la Figura 45, se puede deducir que con mayor $Q_{\acute{u}til}$ (valores se muestran en la Figura 43 y 46) se obtiene un calentamiento de agua mas alto. En la Figura 44 se muestra una Temperatura de agua

En la Figura 42 se muestra que con mayor $Q_{\acute{u}til}$ se obtiene una temperatura media de agua mayor, con respecto En la Figura El calor útil es directamente

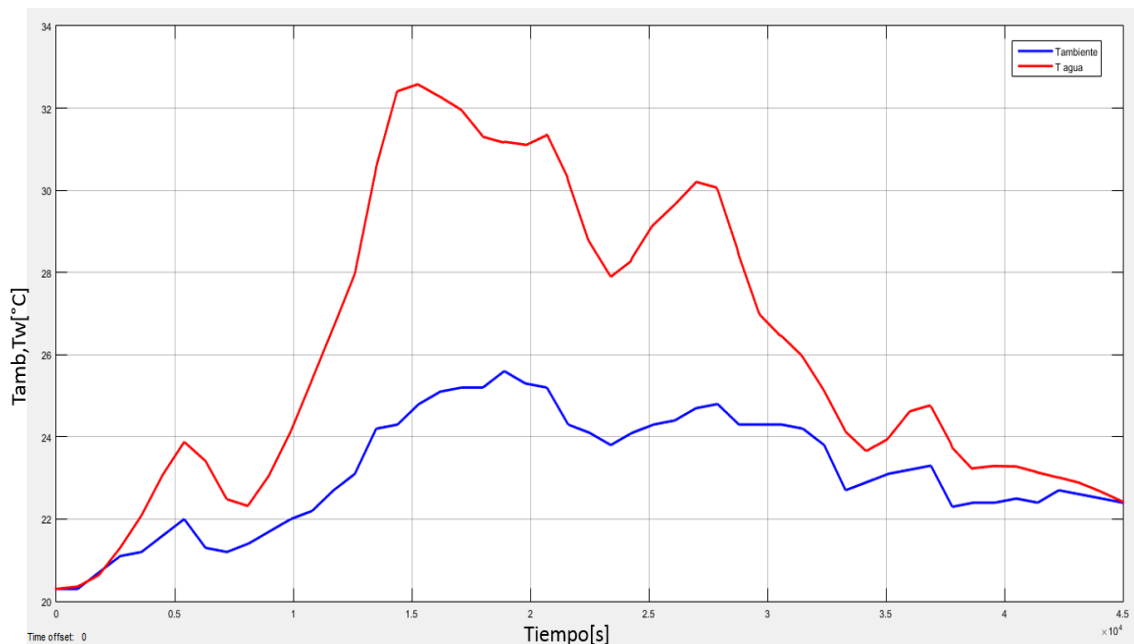
dependiente del Q_{β} como se muestra en la Fase del modelado y debe ser un valor más bajo.

En la Figura 48 se deja el valor de $Q_{\beta}=500\text{W}/\text{m}^2$ y se introducen los valores meteorológicos reales correspondientes a la temperatura ambiente, teniendo en cuenta que $T_{\text{agua}}=T_{\text{amb}}$ en tiempo=0 segundo. Se puede observar que el comportamiento de la temperatura del agua varia conforme lo hace la temperatura ambiente, se ve un aumento de la temperatura del agua de 6.5°C y alcanzando su pico mas alto a los 20000 segundos llegando a un valor de 33°C .

Aun, cuando los comportamientos registrados en las gráficas pueden llegar a ser evidentes, ese es el fin de esta fase, corroborar que el modelo se comporte como se espera.

Paso 3. Comportamiento del modelo bajo Q_{β} y Temperatura ambiente variable (Datos meteorológicos reales).

Figura 49. Gráfica Temperatura Ambiente-Temperatura del agua de salida del colector vs Tiempo, con Q_{β} y Temperatura ambiente variable (Datos meteorológicos reales). Matlab-Simulink(Colector).

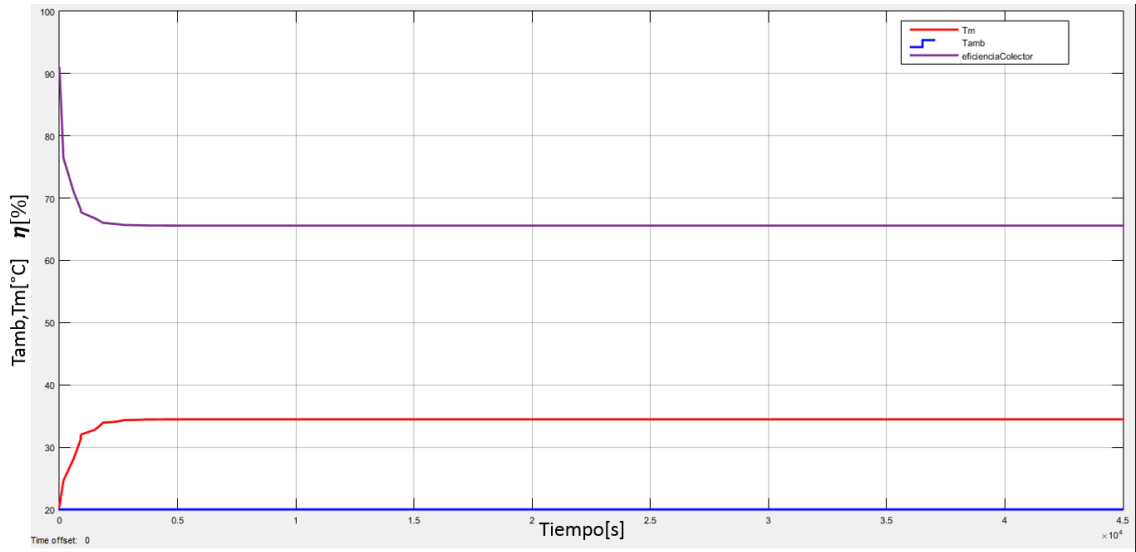


En este paso ya se evalúa el comportamiento del sistema con los datos meteorológicos reales. Esto somete el modelo a condiciones mas críticas que el paso 2, puesto que hay variaciones de Q_{β} y T_{amb} durante el lapso del día, como se menciona anteriormente está comprendido desde las 6 hasta las 18horas.

En la Figura 49 se muestra el cambio de temperatura del agua con respecto al tiempo en contraste con la temperatura ambiente a lo largo del día. En el tiempo poco mas de 15000 segundos se refleja su temperatura mas alta siendo equivalente a 32.4 °C.

Paso 4. Validación

Figura 50 .Gráfica de eficiencia colector, Tambiente y Tmedia del agua del colector vs Tiempo, para una Radiación solar incidente de 850 W/m2. Matlab-Simulink.



En la Figura 50 se grafica la curva del modelo para 850 W/m2, de la eficiencia (Línea morada) del colector, la temperatura media Tm (Línea roja) y la Temperatura ambiente (Línea azul), arrojando valores equivalentes a:

$$T_m = 34,4^{\circ}C$$

$$T_{amb} = 20^{\circ}C$$

$$\eta_{modelo} = 65,5\%$$

En la figura 20 mostrada en el apartado de la caracterización del sistema térmico solar se muestra la curva del rendimiento del colector, para una radiación incidente de 850 W/m2, siendo la ecuación de la eficiencia dada por Chromagen:

$$\eta_{catalogo} = \eta_o - \frac{k1(T_m - T_{amb})}{\frac{Q_{s\beta} W}{m^2}} - \frac{k2(T_m - T_{amb})^2}{\frac{Q_{s\beta} W}{m^2}}$$

$$\eta_o = 72,2\%$$

$$k1 = 3,39 \frac{W}{m^2 K}$$

$$k2 = 0,014 \frac{W}{m^2 K}$$

Ahora, reemplazando los valores de temperatura de la Figura 46 en la ecuación de eficiencia del colector dada por el fabricante se obtiene el siguiente valor

$$\eta_{catalogo} = 66,7\%$$

Con el valor obtenido del modelo y del catálogo, se calcula el porcentaje de error, el cual permite comparar la veracidad del modelo con respecto al valor real.

$$\%error = \left| \frac{ValorCatalogo - ValorModelo}{ValorCatalogo} \right| * 100\% = 1,79\%$$

El porcentaje de error se puede catalogar bajo, ya que su equivalencia no afectará significativamente los resultados finales de la simulación, además, los test presentados anteriormente, también son base para la ratificación de la validez del modelo.

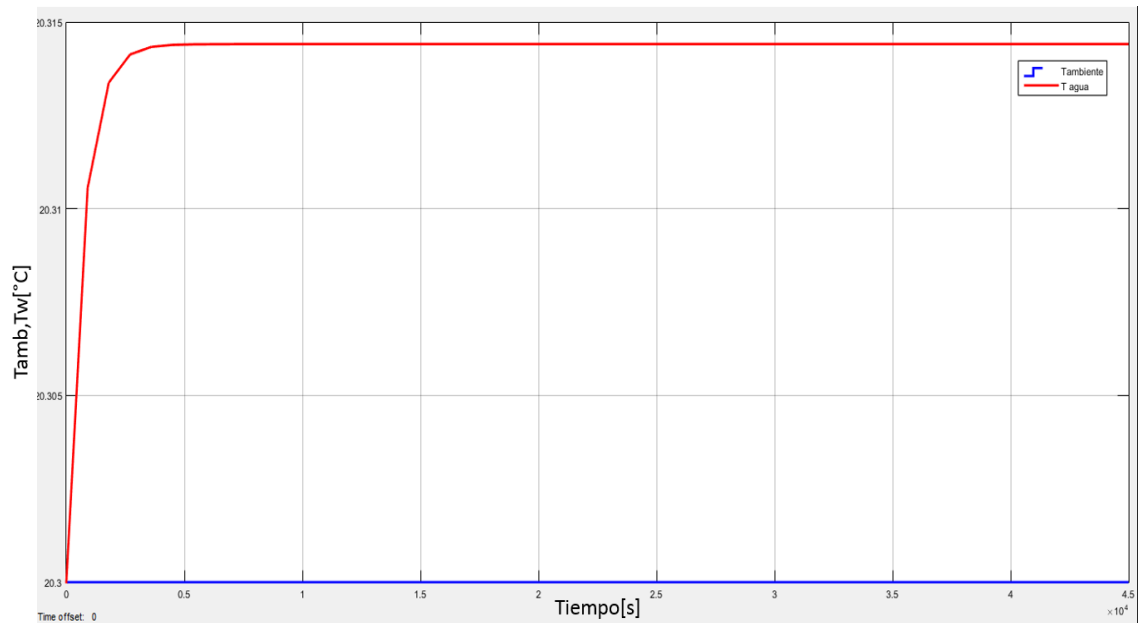
Paso 5. Análisis de sensibilidad

El número de factores serán tres, los cuales son tomados de los valores reales meteorológicos correspondiendo al mas bajo, al medio y al valor mas alto de Q_{Sbeta} y T_{amb} .

Tabla 12. Factores de nivel para el análisis de sensibilidad del modelo.

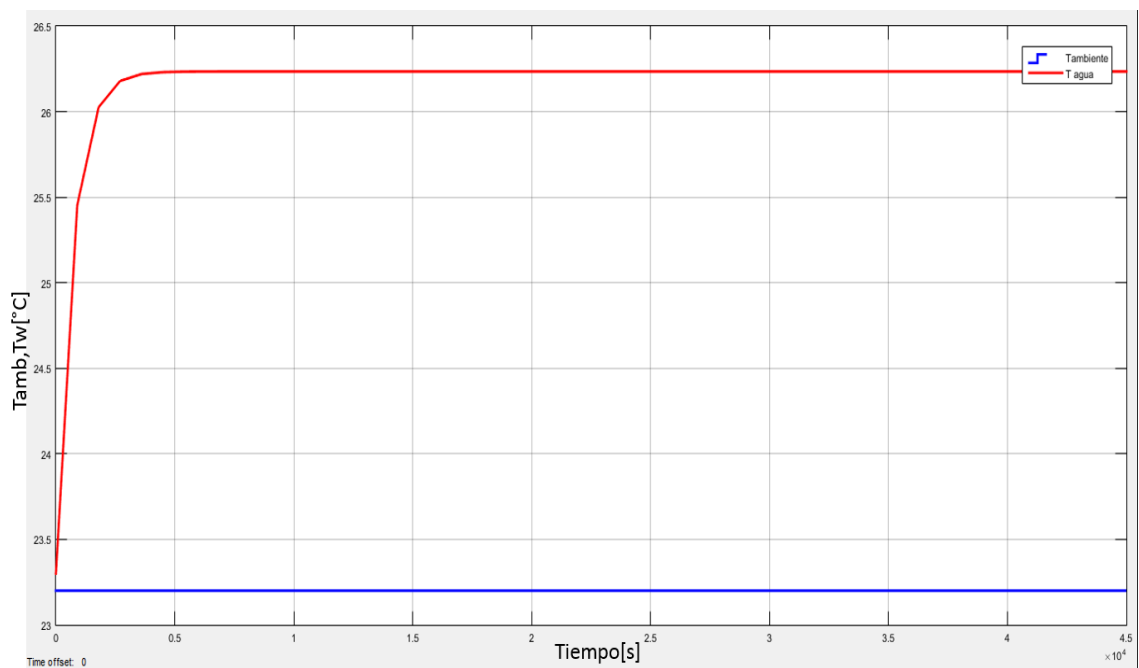
Nivel	Factor	
	$Q_{Sbeta} [\frac{W}{m^2}]$	$T_{amb} [^{\circ}C]$
Bajo	1	20,3
Medio	211,5	23,2
Alto	620	25,6

Figura 51. Gráfica Temperatura Ambiente-Temperatura del agua del colector vs Tiempo, con $Q_{s\beta}$ y Temperatura ambiente constantes equivalentes al nivel bajo. Matlab-Simulink.



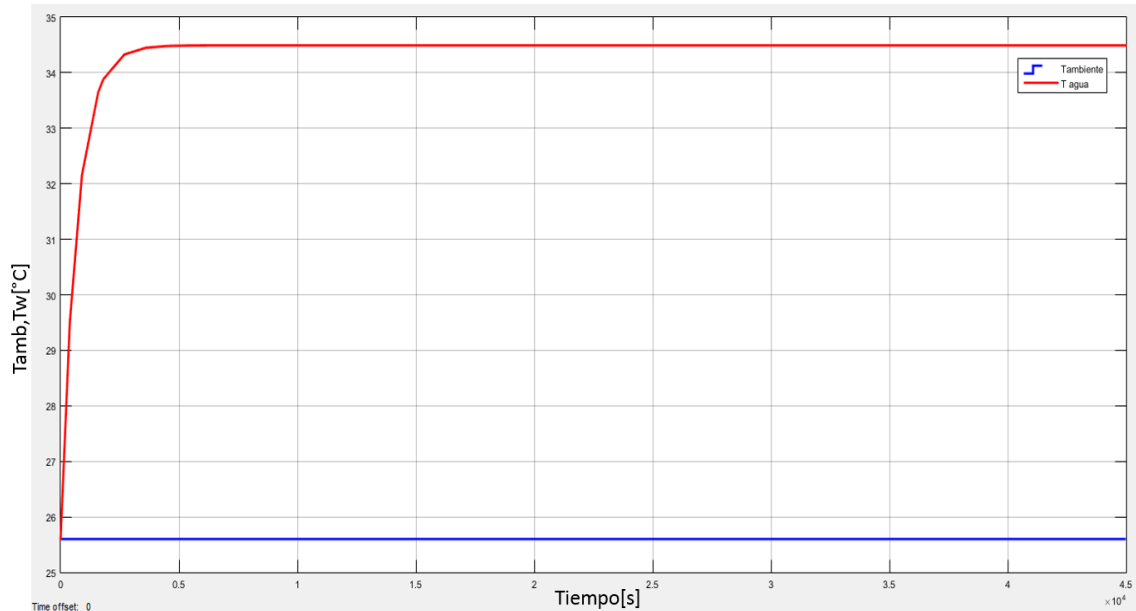
En la Figura 51 se ve un aumento de 0.012°C en la temperatura del agua, siendo coherente este ΔT con respecto al calor incidente, ya que como se observa en la Tabla 12 $Q_{s\beta}$ en el presente nivel es de $1\text{W}/\text{m}^2$.

Figura 52. Gráfica Temperatura Ambiente-Temperatura del agua de salida del colector vs Tiempo, con $Q_{s\beta}$ y Temperatura ambiente constantes equivalentes al nivel medio. Matlab-Simulink.



En la Figura 52 se traza la gráfica obtenida ingresando como valores de entrada de $Q_{s\beta}$ y T_{amb} los correspondientes a los factores del nivel medio, la cual no muestra ningún tipo de alteración en el comportamiento de la simulación.

Figura 53. Gráfica Temperatura Ambiente-Temperatura del agua de salida del colector vs Tiempo, con $Q_{s\beta}$ y Temperatura ambiente constantes equivalentes al nivel alto. Matlab-Simulink.



La figura 53 no evidencia ninguna perturbación en el sistema frente a los factores de nivel alto que se ingresaron al sistema.

Con el valor de $Q_{s\beta}$ y T_{amb} de nivel alto, el cambio de la temperatura está alrededor de 10°C como se ve en la Figura 53, iniciando desde el *set point* establecido y culminando en un valor cercano al de T_{amb} , reflejando así un funcionamiento del sistema dentro de los parámetros normales.

Después de las pruebas realizadas con los factores de nivel, no se considera ningún cambio en el modelo del sistema, puesto que cada cambio es influyente en las respuestas de la simulación, aun, cuando estas sean coherentes con respecto a sus entradas.

Este análisis de sensibilidad permite dar un voto de confianza en cuanto al funcionamiento del sistema con los datos reales en cada instante, dado que las gráficas obtenidas en cada nivel demuestran que el modelo es capaz de procesar adecuadamente la información para un resultado certero.

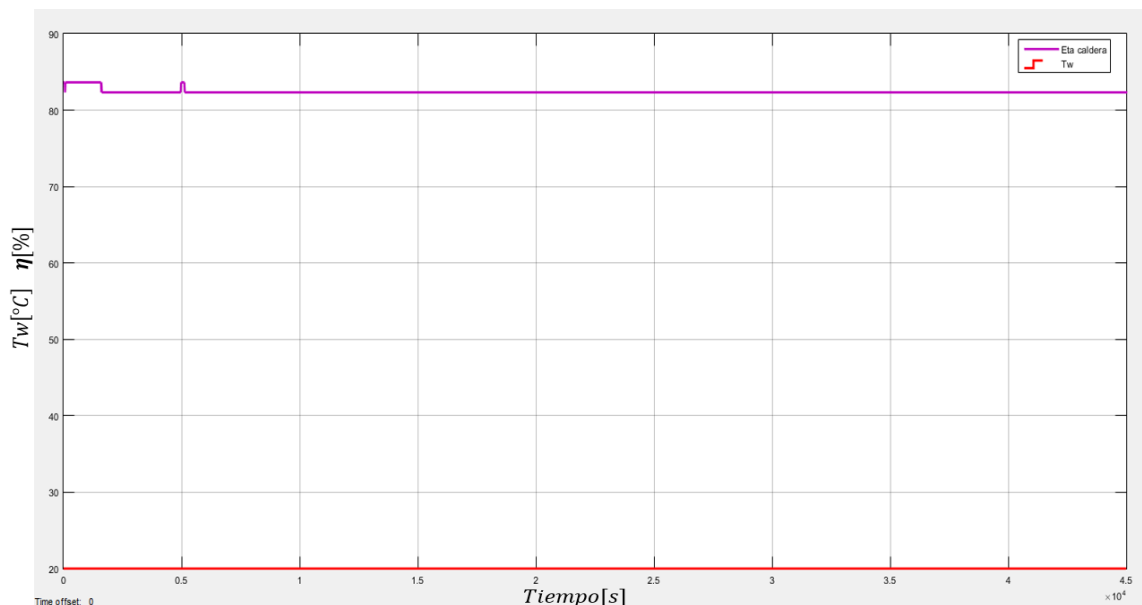
- Pruebas para Caldera pirotubular horizontal

Como antecedente se tiene el trabajo *Programación para el cálculo de una caldera pirotubular*, presentado en Bucaramanga, Colombia por el Ing. Omar Armando Gelvez Arocha en la Universidad Industrial de Santander, como parte del proceso de aprendizaje de la asignatura Sistemas Térmicos. Esta

programación permite hacer el cálculo de la potencia y ver el comportamiento de una caldera pirotubular de dos pasos, con diferentes tipos de combustible haciendo el ingreso de otros datos. Con base en este trabajo se plantea el modelo de la caldera pirotubular y además se toma para la validación, siendo este un programa trabajado durante cada semestre y mejorado, por el Ingeniero Omar Gelves y los estudiantes, los resultados obtenidos en la simulación hecha para este proyecto de grado referente a la caldera, se validan y aceptan, con el criterio de confianza brindado al usuario del programa.

En la simulación de la caldera pirotubular de dos pasos, se hace el ensayo con una Temperatura de agua de alimentación constante igual a 20°C, tomándolo como un valor de referencia con respecto a la temperatura ambiente. En la figura 50 se puede ver el resultado para el valor de la eficiencia de la caldera para este parámetro.

Figura 54. Gráfica Eficiencia caldera y Temperatura de agua de alimentación Constante=20°C. Matlab-Simulink.



En la Figura 54 se muestra el valor de la eficiencia de la caldera, en el punto mas bajo 82.6% y en el punto mas alto 83.6%. Valor que para las condiciones presentadas es aceptado, ya que, como se menciona anteriormente, estas calderas tienen una eficiencia alrededor del 85%.

Figura 55. Grafica Eficiencia de caldera-Temperatura de agua de alimentación variable (proveniente colector). Matlab-Simulink.

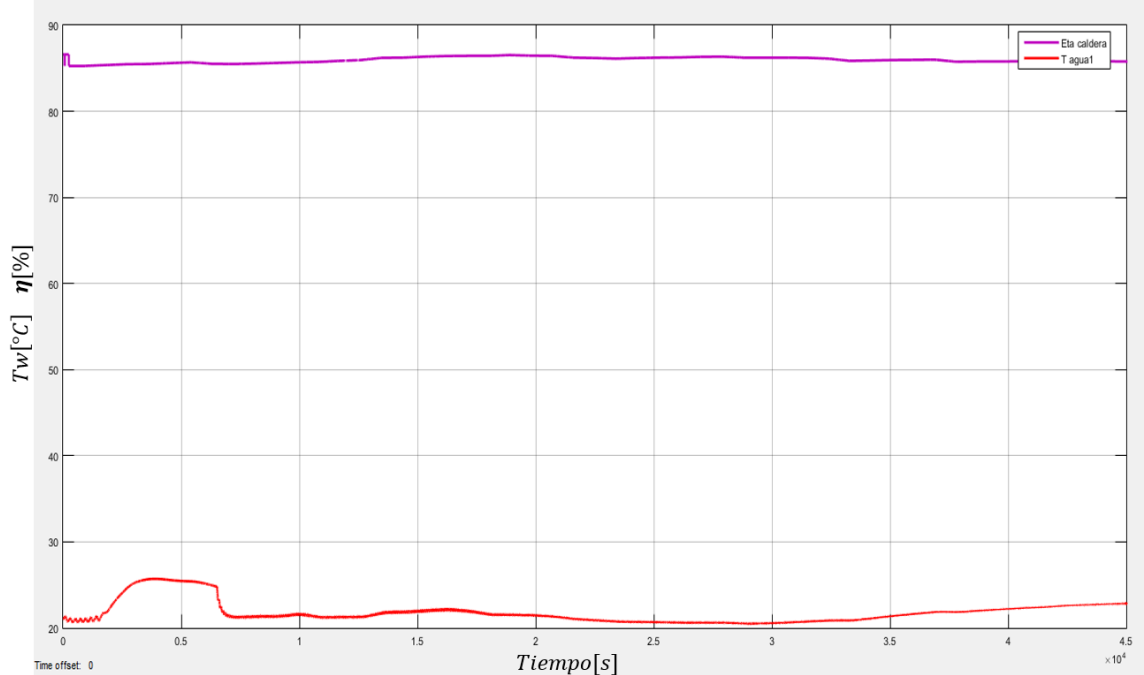
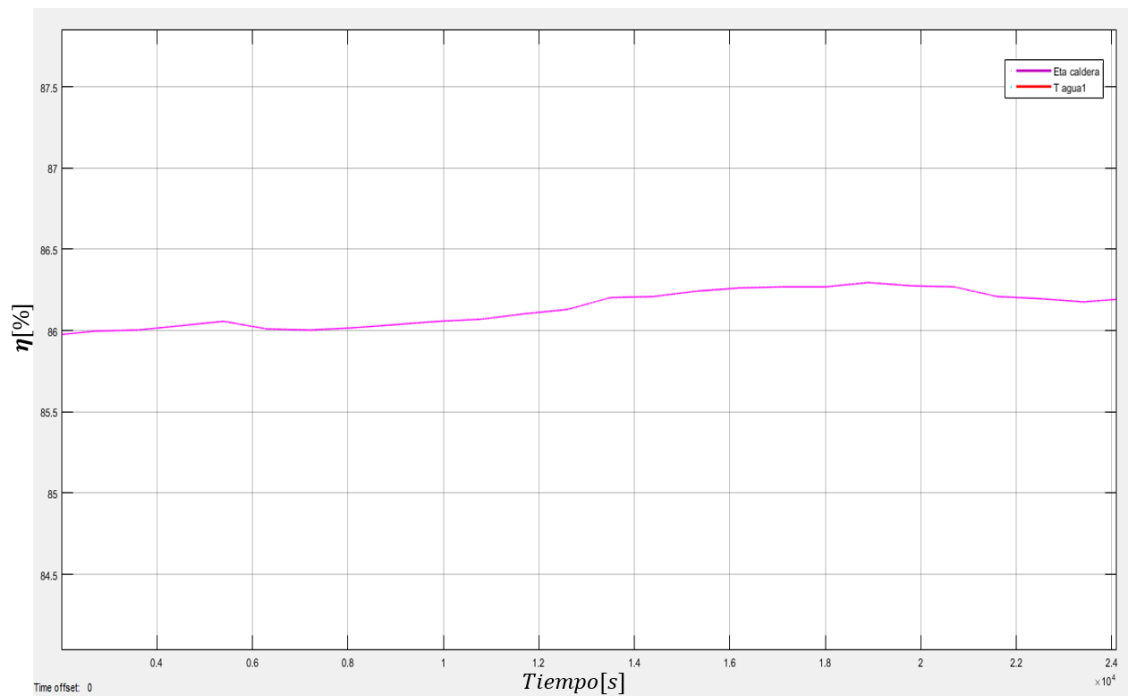


Figura 56. Acercamiento a la curva de eficiencia de la gráfica Eficiencia de caldera-Temperatura de agua de alimentación variable (proveniente colector).



La figura 55 tiene la curva de eficiencia y temperatura de agua proveniente del sistema térmico solar, en ella se observa la variación de la eficiencia con respecto a la variación de la temperatura. Se evidencia un aumento de casi 2%, con respecto a la Figura 54.

*La Programación para el cálculo de una caldera pirotubular*²⁴ arroja los resultados de potencia y demás datos de interés como temperatura de los gases de combustión, temperatura de superficie de los tubos mostrados en la Figura 57, para una caldera como la caracterizada en este proyecto.

La potencia obtenida por el programa es 16.0994 BHP, relacionándola con la potencia teórica dada por el fabricante equivalente a 20BHP se tiene:

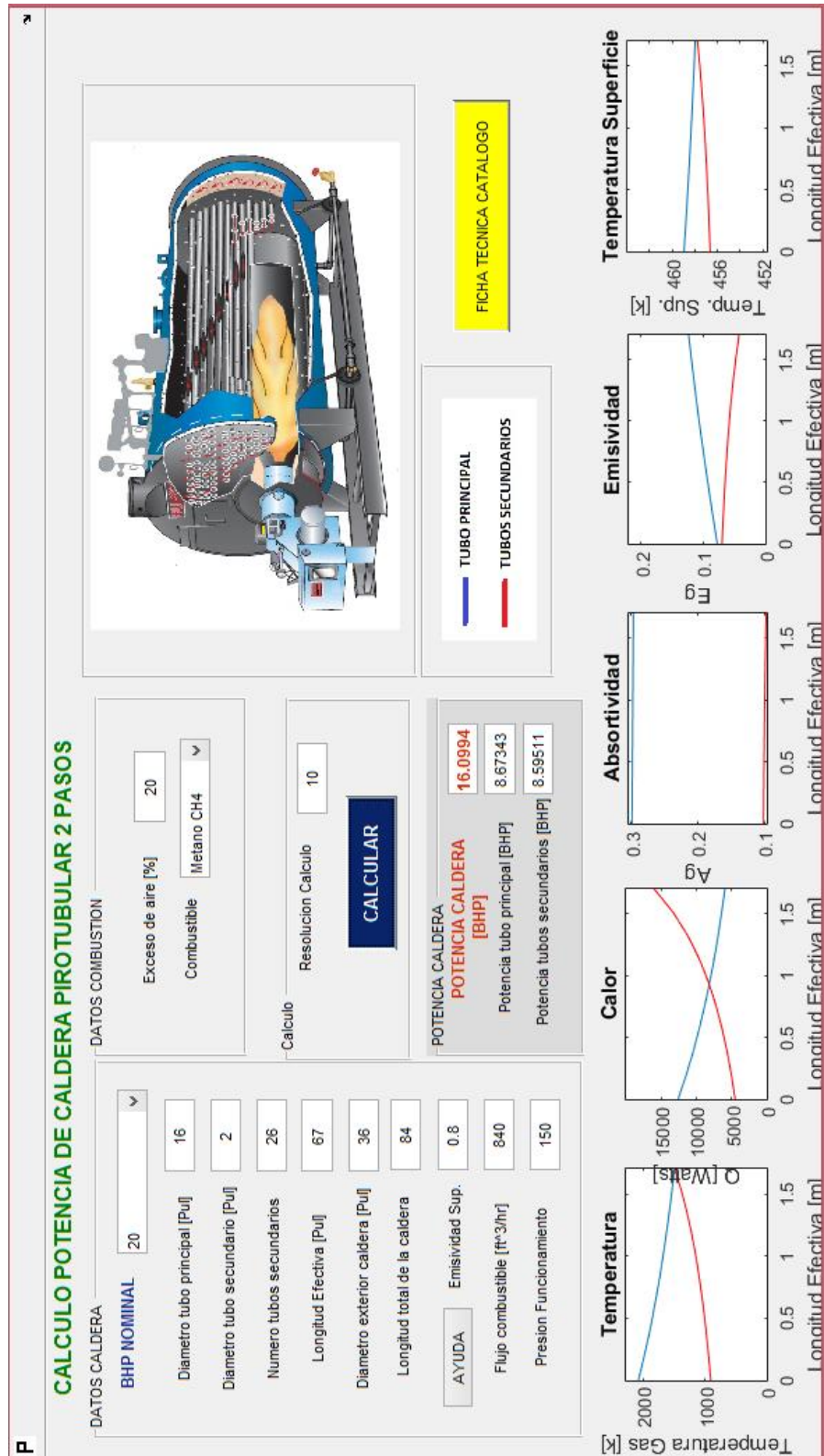
$$\eta_{caldera_{prog}} = \frac{potencia\ util}{potencia\ teorica} = \frac{16,0994}{20}$$
$$\eta_{caldera_{prog}} = 80,5\%$$

Realizando el calculo del porcentaje de error correspondiente, involucrando la eficiencia obtenida en la simulacion con temperatura constante:

$$\%error = \frac{\eta_{caldera_{prog}} - \eta_{caldera_{modelo}}}{\eta_{caldera_{prog}}} = 3,85\%$$

²⁴ GELVEZ AROCHA, Omar Armando. Programación para el cálculo de una caldera pirotubular. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia.

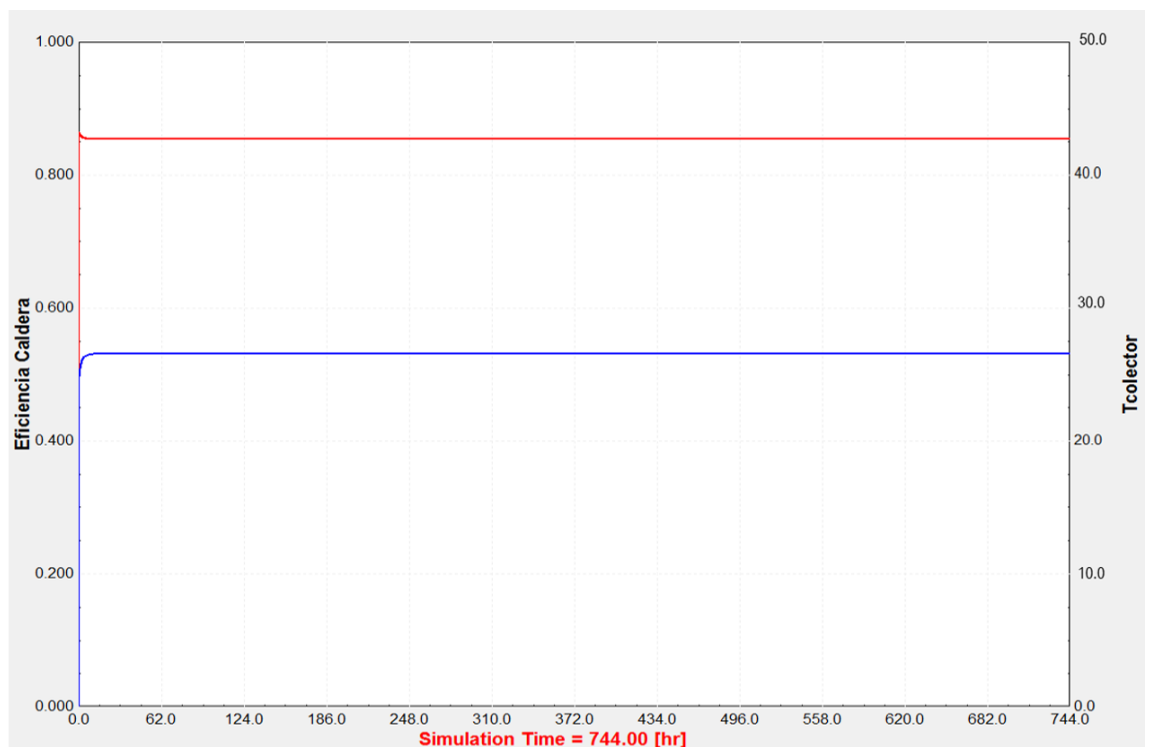
Figura 57. Resultados de La Programación para el cálculo de una caldera pirotubular de dos pasos[18].



7.2 VALIDACION TRNSYS

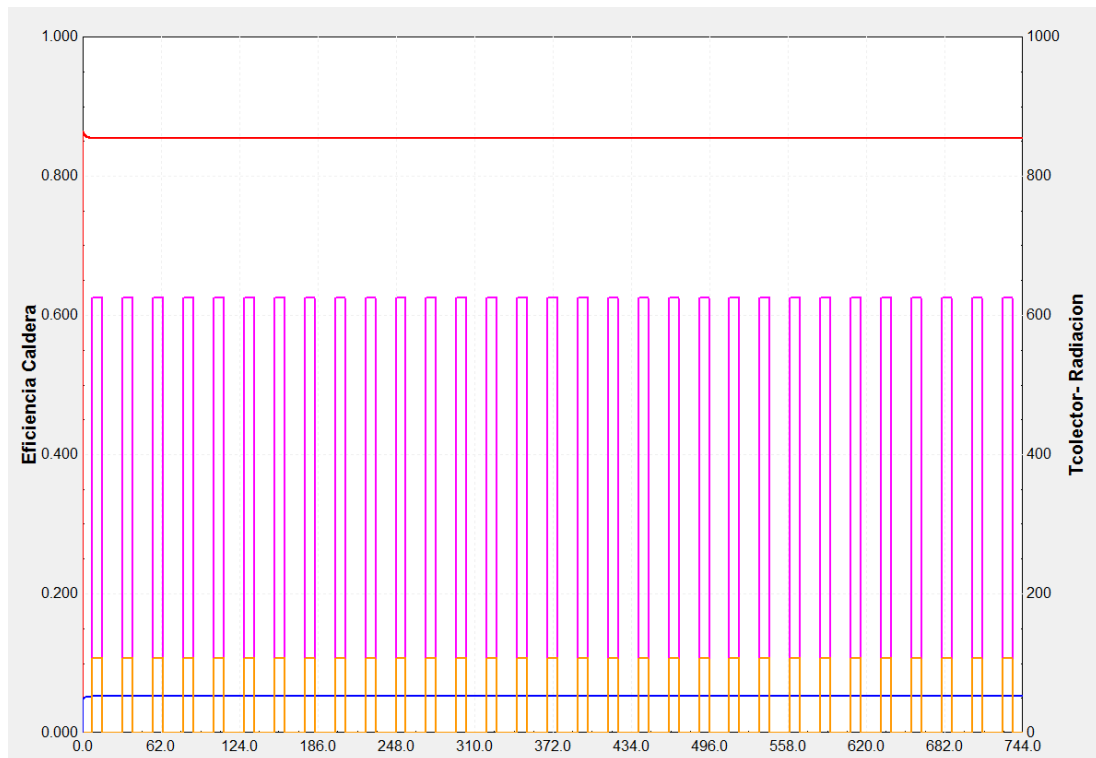
La confiabilidad de TRNSYS es centrada, en que es un software que no requiere de un modelado, como se señala anteriormente. Sus plantillas vienen perfectamente diseñadas para acoplarse a los datos de ingreso y funcionar correctamente. Por la complejidad de su *data sheet*, se hacen dos pruebas, sin datos meteorológicos y la otra con datos, sin variaciones intermedias.

Figura 58. Gráfica de la Eficiencia de la caldera y Temperatura a la salida del colector, sin Datos metrológicos. TRNSYS.



En la figura 58 se hace la prueba de la simulación en el software TRNSYS sin ingreso de datos meteorológicos, es decir, trabaja el sistema con datos constantes, arrojando un valor de eficiencia de caldera alrededor de 85% (línea roja), el cual es un dato válido con respecto a una caldera de este tipo. Para el colector, da una temperatura de salida de 55°C (línea azul), constante, lo que es coherente, ya que no existen “perturbaciones” en el sistema.

Figura 59. Gráfica de eficiencia de caldera, Tsalida colector y flujos máscicos de agua. TRNSYS.



En TRNSYS las unidades de los flujos máscicos (alimentación colector y alimentación caldera) se trabajan en Kg/h.

En la figura 59 la línea naranja representa el flujo másico del colector y la línea rosa el flujo másico de alimentación a la caldera, la forma de las curvas se debe a lo planteado al inicio de la Fase II-simulación, el funcionamiento del sistema se propone en un lapso de las 6 a las 18 horas del día, debido a que es el espacio en el que hay radiación solar, función que hacen las bombas y las funciones reguladoras de caudal.

Ahora, ingresando los datos meteorológicos se obtiene la gráfica de la figura 60, donde ya las curvas dejan de ser líneas rectas y tienen picos altos y bajos, siendo la roja la eficiencia de la caldera y la azul la temperatura del agua. Indicando que efectivamente el sistema si toma el cambio de entradas al sistema siendo su punto mas alto alrededor de 34°C.

La validación de los resultados obtenido en TRNSYS se realizan de forma mas general y conceptual, debido al objetivo de esta en el proyecto, que es la observación general del mes de Julio de 2016.

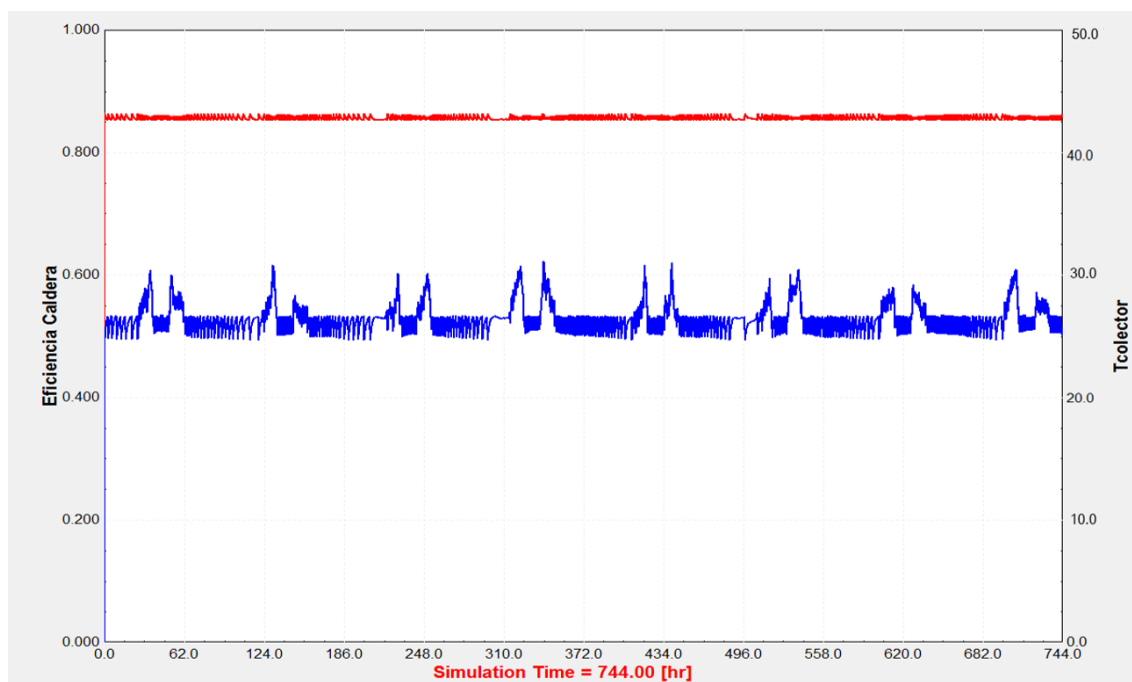
Haciendo la comparación de los datos obtenidos con *La Programación para el cálculo de una caldera pirotubular [18]*, para una temperatura de agua constante se tiene

$$\eta_{caldera_{programa}} = 80.5\%$$

$$\eta_{caldera_{TRNSYS}} = 85\%$$

$$\%error = \left| \frac{\eta_{caldera_{prog}} - \eta_{caldera_{TRNSYS}}}{\eta_{caldera_{prog}}} \right| * 100\% = 5.5\%$$

Figura 60. Grafica de la Eficiencia de la caldera y Temperatura a la salida del colector, con Datos metrológicos. TRNSYS.



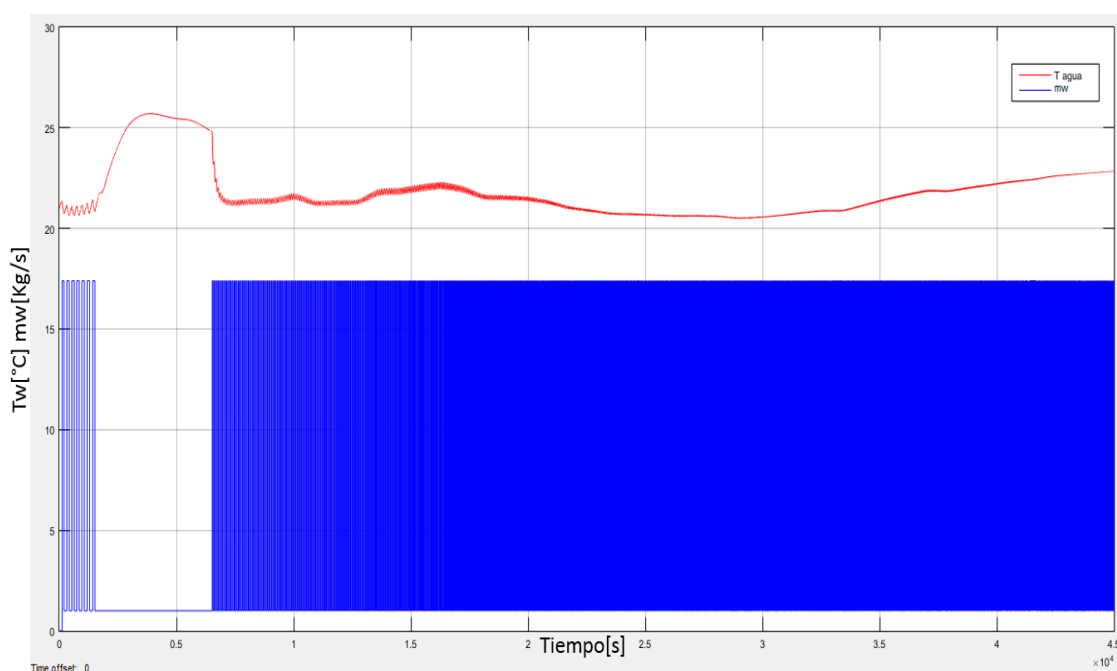
8. DESARROLLO FASE IV: EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA

Las evaluaciones del sistema se hacen de forma individual para cada software, puesto que para Matlab-simulink se realizó una simulación diaria y con TRNSYS fue mensual. Recordando que las dos son bajo el mismo criterio y corresponden al estado crítico de funcionamiento del sistema en conjunto, también la validación de los resultados se hace con respecto a los mismos referentes.

8.1 EVALUACION MATLAB-SIMULINK

Para esta fase es necesario tener presente que en cualquier situación el flujo másico de vapor en la caldera es equivalente a 0.086Kg/s es un parámetro constante.

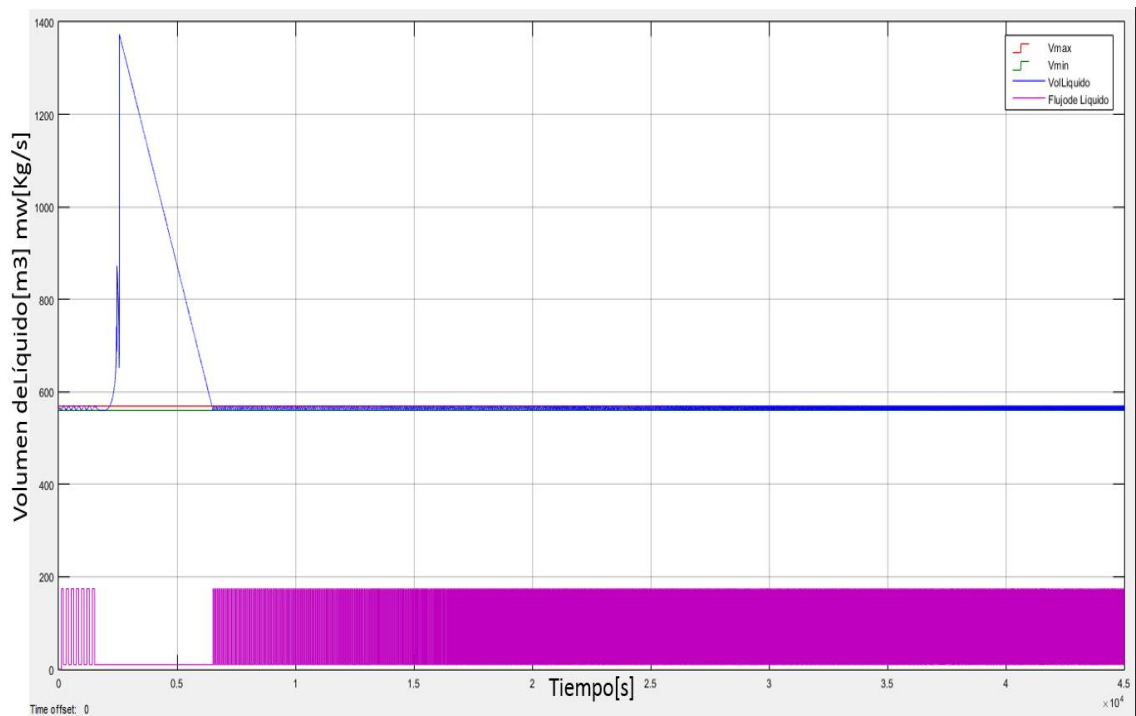
Figura 61. Gráfica de Temperatura y flujo másico del agua de alimentación de la caldera vs Tiempo. Matlab-Simulink.



En la figura 61 es mostrada claramente la relación que se menciona en el planteamiento del sistema en conjunto (sistema térmico solar y caldera pirotubular), la cual es mantener un tanque de almacenamiento en conjunto para el colector y la caldera, lo que quiere decir que cuando la caldera requiera suministro de agua (Línea azul) saldrá del acumulador, y automáticamente este requerirá agua fría de sustitución, por ende bajará la temperatura en el sistema de calentamiento (Línea roja). Este fenómeno se observa con mayor detalle en el lapso de 2800-3750 segundos, se ve que el mw disminuye y la temperatura aumenta y cuando sube la demanda de mw la línea de tendencia de la

temperatura del agua decae. Aclarando que este aumento de temperatura cuando no hay demanda de agua esta ligada directamente al calor suministrado al colector.

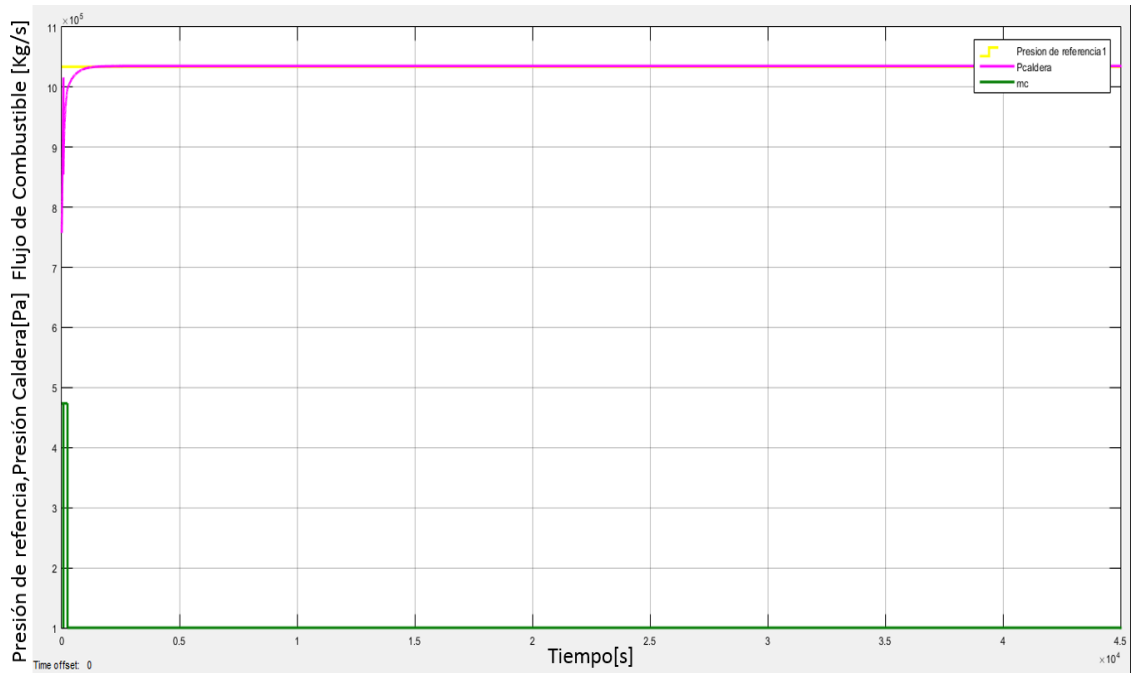
Figura 62. Gráfica Regulación del flujo másico de alimentación de la caldera en función del control del volumen de líquido en la caldera. Matlab-Simulink.



La figura 62 evidencia la influencia del control del volumen de líquido (Línea azul) en la caldera para la regulación del flujo másico de alimentación (Línea morada), en el momento donde se ve el pico mas alto de volumen de ve el “corte” de flujo de agua hacia la caldera, y así continuamente son dependientes en todo el tiempo de funcionamiento del sistema.

La presión de la caldera (Línea Fucsia) Figura 63 al inicio presenta fluctuaciones, la cuales son normales mientras el sistema se estabiliza, cuando esto ocurre toma el valor de 1034000Pa (150PSI) que es la de referencia (Línea amarilla). El flujo másico de combustible mc (Línea verde) se comporta como se ve en la figura 63 dependiente de la presión, que a su vez es dependiente de la temperatura de vapor, lo que indica que cuando la presión decae es por T_v , es necesario un aumento en la combustión para producir el calor necesario para cumplir la demanda de vapor, y por consiguiente se da el incremento en mc.

Figura 63. Gráfica Presión y flujo de combustible en caldera vs tiempo. Matlab-Simulink.



Luego se minimiza mc y presión aumenta hasta la de funcionamiento y se mantiene ahí.

La figura 64 muestra la curva de eficiencia de la caldera con respecto al transcurso del día, en la cual se evidencian fluctuaciones provocadas por la intervención del sistema térmico solar, el cual hace el precalentamiento del agua, adquiriendo un valor máximo de 86.5% y uno mínimo alrededor de 85.2%.

Figura 64. Eficiencia caldera vs tiempo. Matlab-Simulink.

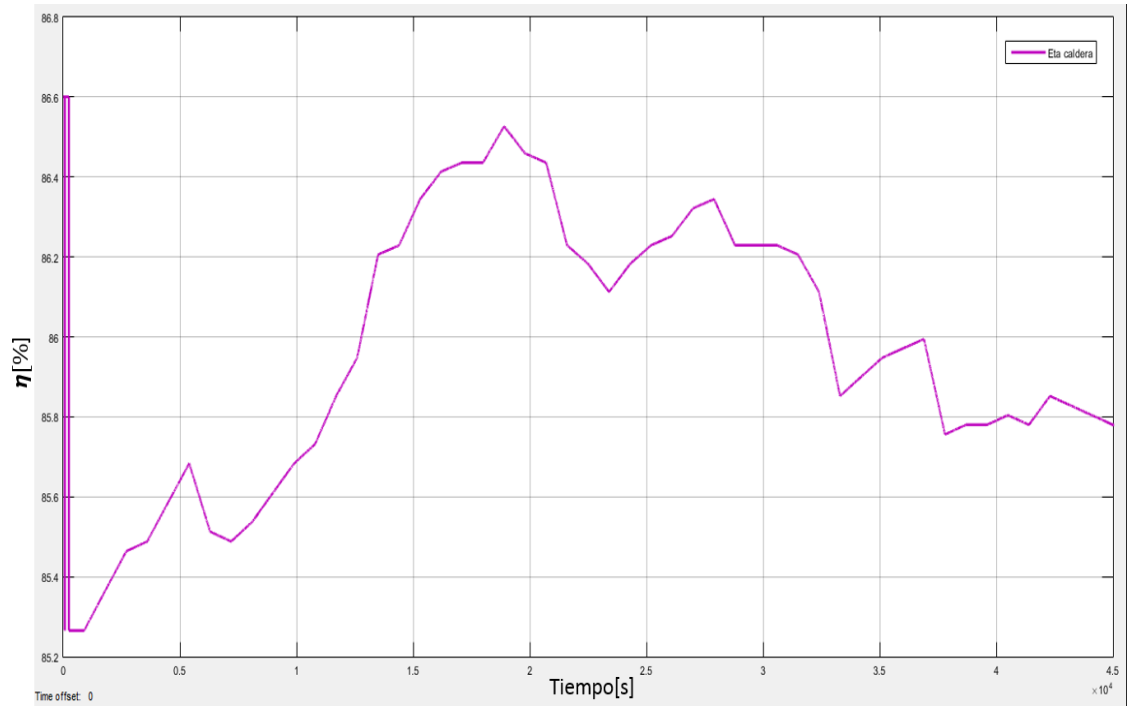


Figura 65. Gráfica eficiencia de caldera y temperatura del agua de alimentación. Matlab-Simulink.

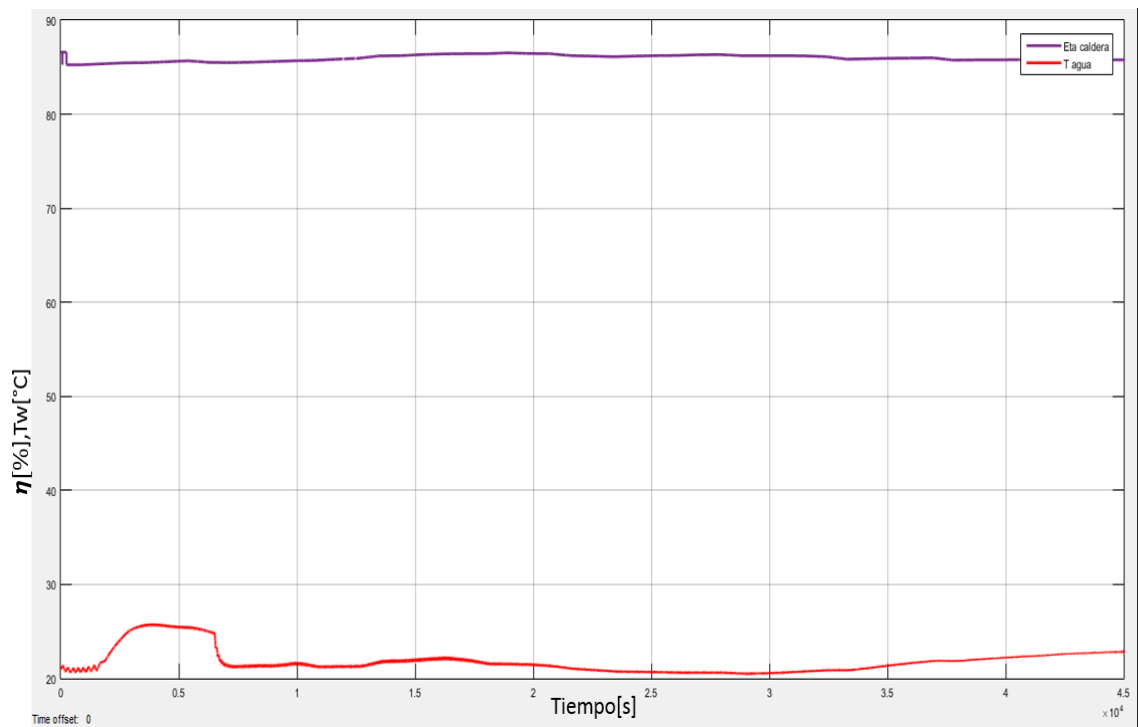
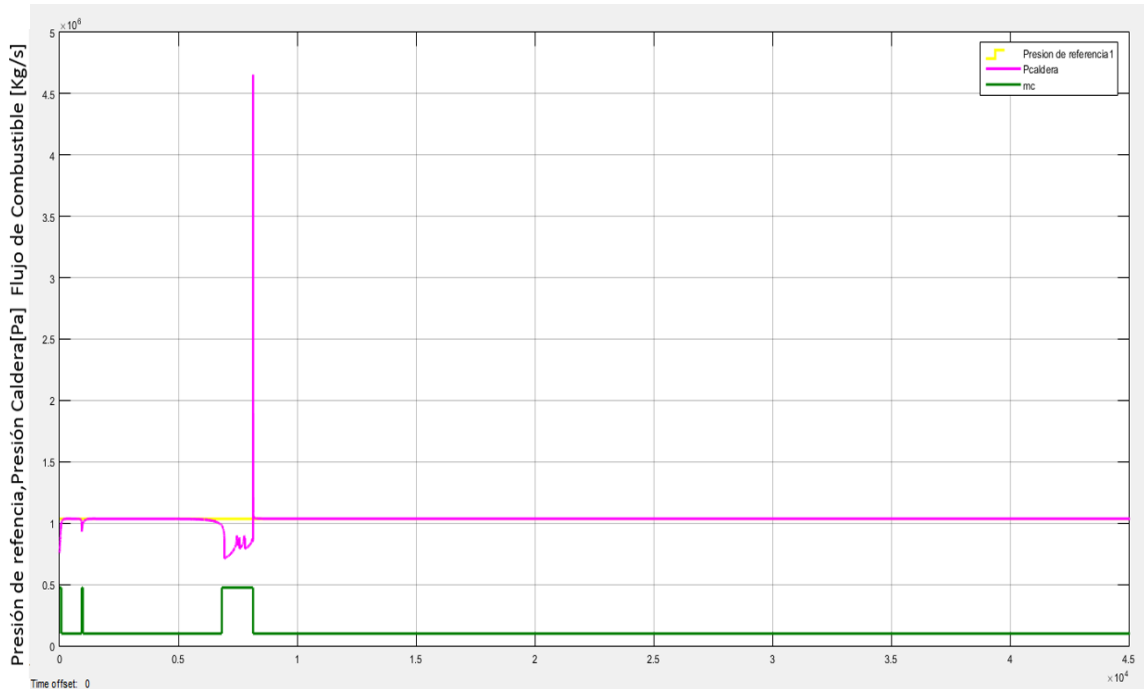
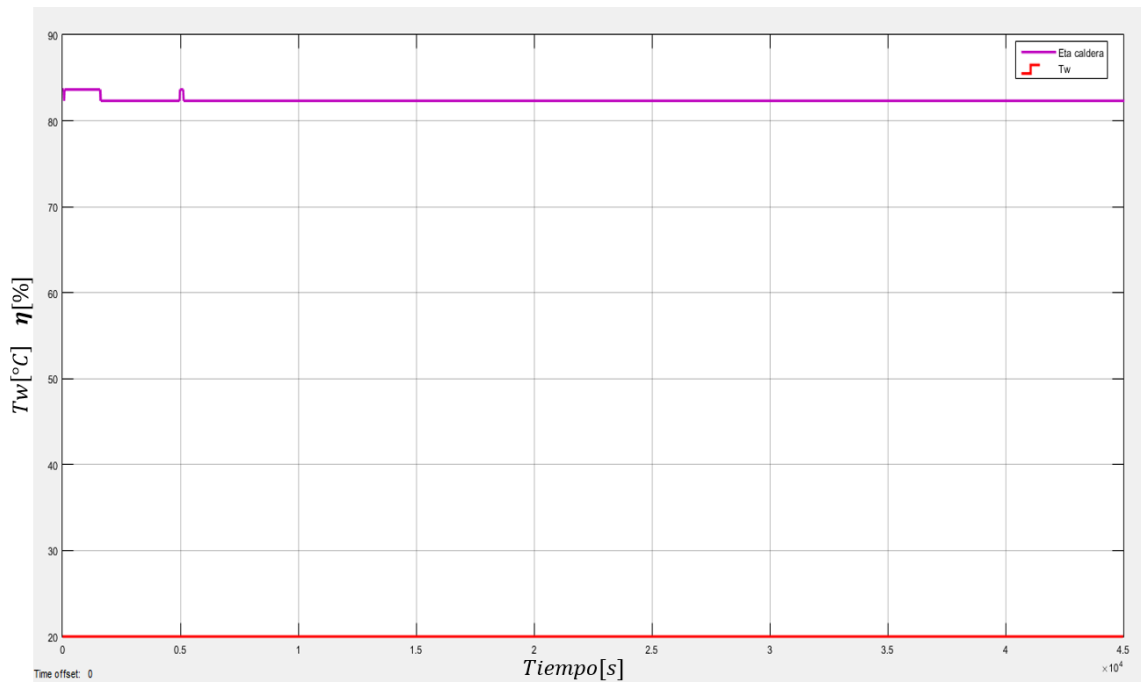


Figura 66. Gráfica de Presión-flujo másico de combustible vs tiempo con temperatura de agua de alimentación constante. Matlab-Simulink.



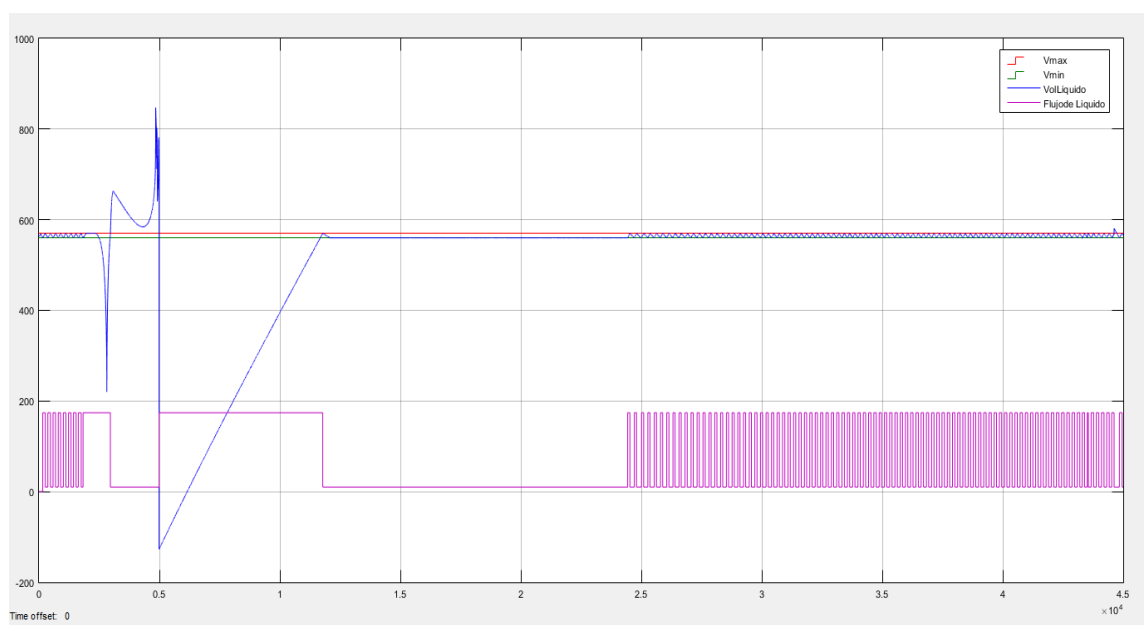
Evaluando el sistema con datos de temperatura constante, manteniendo los demás parámetros igual, se refleja en la figura 66 dos picos extra flujo masico de combustible mc máximo, ya que la presión tiende a variar después de un lapso de estabilidad. Evidentemente se consume mas mc para este caso.

Figura 67. Gráfica eficiencia de la caldera y Temperatura de agua de alimentación vs tiempo. Matlab-Simulink.



En condiciones de funcionamiento de temperatura de agua de alimentación T_w constante (Línea roja) Figura 67, la eficiencia se hace constante después de que el sistema se estabiliza, en un valor aproximado de 83%.

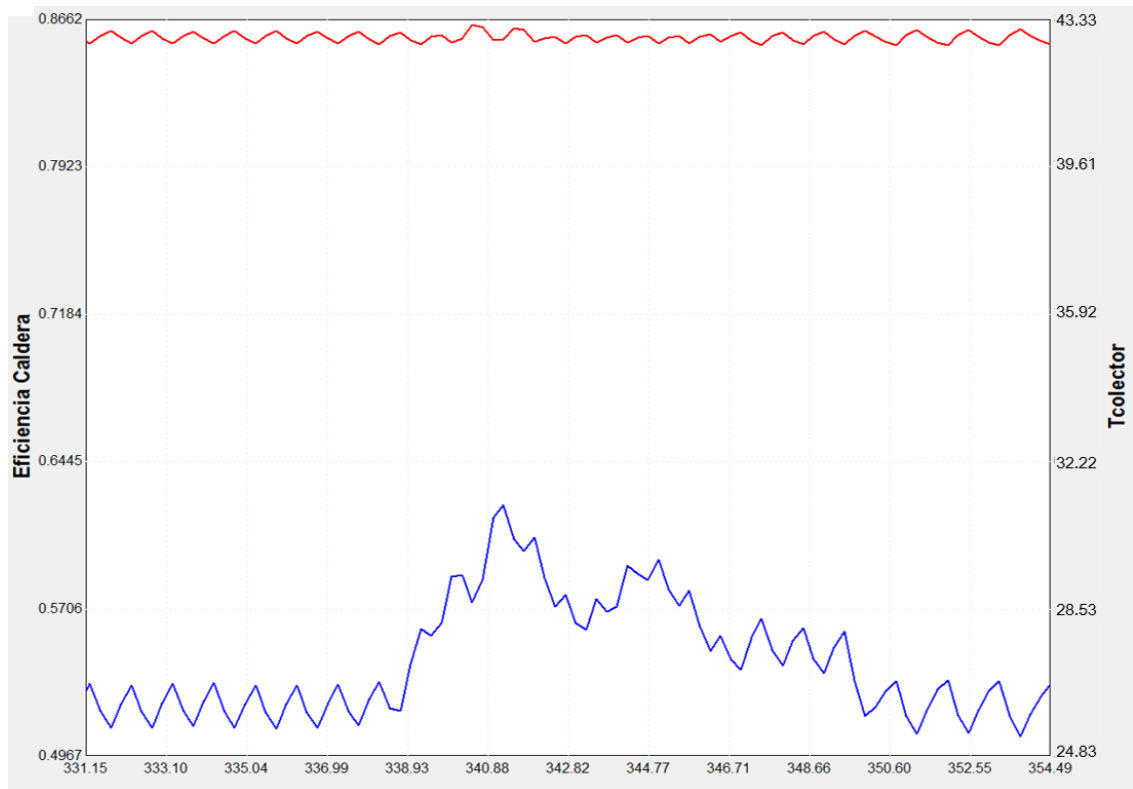
Figura 68. Regulación del flujo de agua de alimentación mediante el control del volumen de líquido en la caldera. Matlab-Simulink.



En la figura 68 se ve la regulación de flujo másico de alimentación (Línea morada) dependiente del control del líquido dentro de la caldera, para una temperatura constante de TW.

8.2. EVALUACION TRNSYS

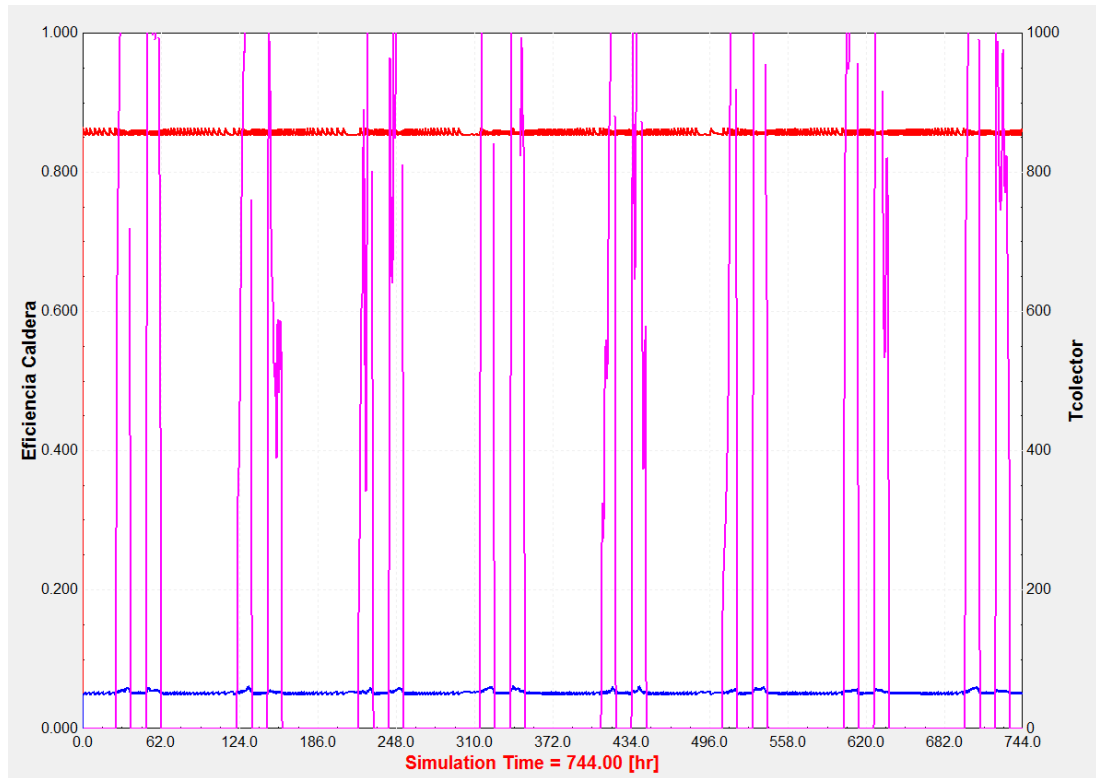
Figura 69. Acercamiento en detalle de gráfica de la Eficiencia de la caldera y Temperatura a la salida del colector, con Datos meteorológicos (figura 61). TRNSYS.



La eficiencia de la caldera (Línea roja) tiene su punto más alto entre $t=(340.88-342.82)$, con temperatura de agua (Línea azul) aproximada de 31°C llega a 86.62% , lo que indica un aumento cercano a $1,6\%$, con un ΔT adquirido por el agua equivalente a más de 11°C .

La Figura 70 muestra el comportamiento del sistema, donde claramente se ve la respuesta de la temperatura del agua con respecto a los picos altos de radiación (Línea Fucsia). Detalladamente se ve en la Figura 71 de $t=(315.35-324.35)$ la fluctuación de la temperatura del agua entre los 25 y 31°C , posteriormente se ve un descenso de 5°C por la disminución de radiación, y vuelve de nuevo a aumentar.

Figura 70. Gráfica de la Eficiencia de la caldera, Temperatura a la salida del colector y radiación solar con Datos meteorológicos. TRNSYS.



La figura 69 evidencia que cuando la temperatura del agua es constante en un instante de tiempo, igualmente se comporta la eficiencia de la caldera, es decir se ve afectada directamente su funcionamiento con respecto a la temperatura del agua de alimentación, que muchas ocasiones la hemos nombrado como temperatura del colector.

Figura 71. Acercamiento en detalle gráfica de la Eficiencia de la caldera, Temperatura a la salida del colector y radiación solar con Datos meteorológicos. TRNSYS.

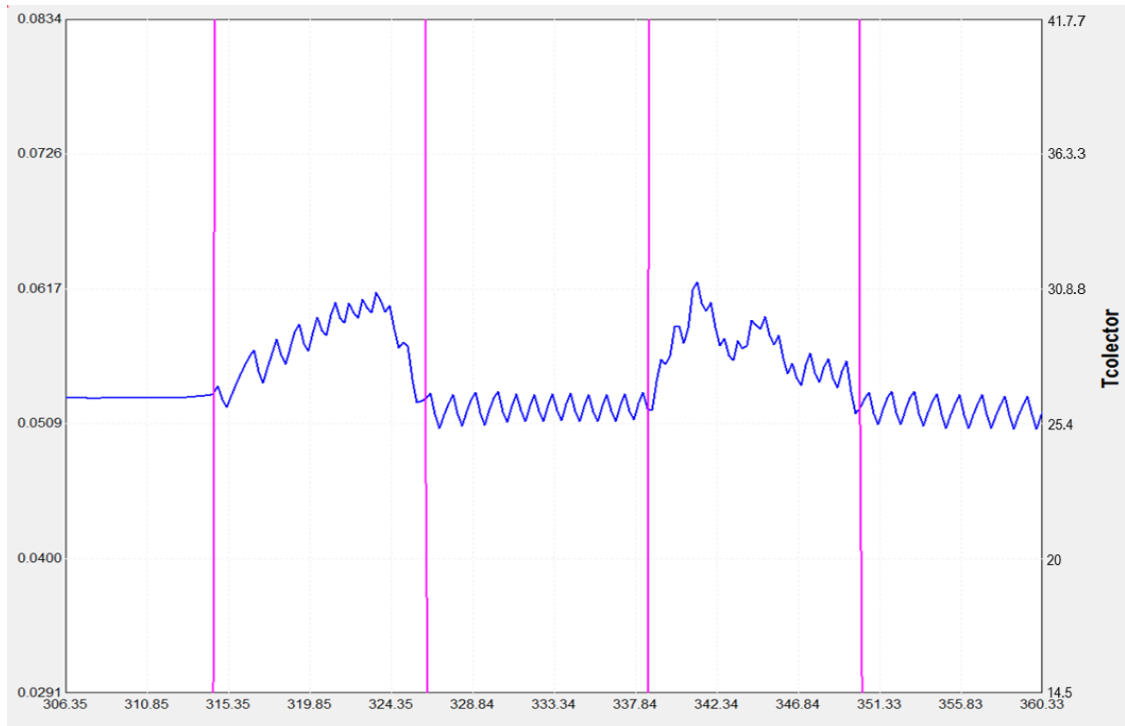


Figura 72. Acercamiento en detalle gráfica de la Eficiencia de la caldera, Temperatura a la salida del colector y radiación solar con Datos meteorológicos, comparación Tagua y eficiencia caldera. TRNSYS.

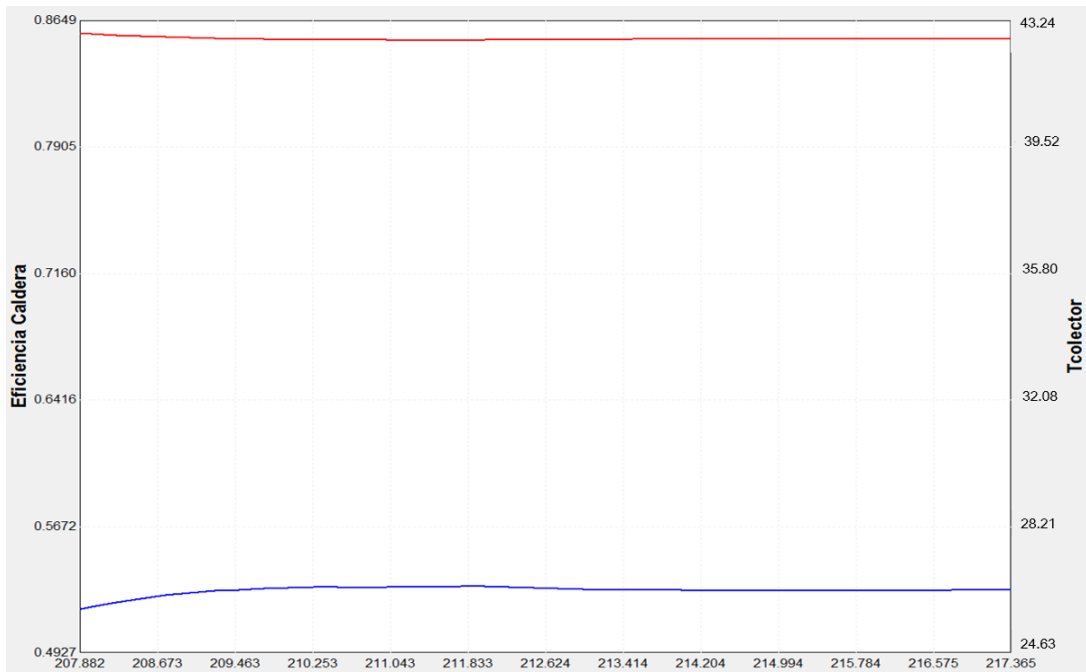


Tabla 13. Tabla comparativa de los valores de temperatura de agua de alimentación y eficiencia de caldera obtenidos en la simulación.

		Matlab Simulink	TRNSYS
Temperatura de agua [°C]	min	20,5	25
	max	25,7	31
Eficiencia [%]	min	85,6	85
	max	86,6	86,62

Partiendo de el valor de la eficiencia en Matlab-Simulink sin precalentamiento de (82,6 a 83,6)% con respecto a los valores de la Tabla 12, para este mismo software se observa un aumento alrededor de 3%, si se implementara el precalentamiento al agua de alimentación de la caldera mediante el sistema termico solar.

El valor de la eficiencia en TRNSYS sin precalentamiento es de 85% con respecto a los valores de la Tabla 12, para este mismo software se observa un aumento alrededor de 1,66%, si se implementara el precalentamiento al agua de alimentación de la caldera mediante el sistema termico solar.

Es necesario tener claridad de las perdidas despreciadas por humos, puesto que para este proyecto, se tuvo en cuenta solo las perdidas por transferencia de calor hacia la superficie de la caldera, por esta razón se muestra un aumento de eficiencia en el sistema mayor al 1% relacionandolo con un ΔT en el agua de alimentación de la caldera alrededor de 5°C.

Ahora bien, el desfase de resultados de las dos herramientas software implementadas, involucran parte del modelado matematico. Puesto que, para Matlab-Simulink se asumen hipótesis planteadas en medio del desarrollo del modelo, que claramente afectan de manera directa los resultados. Para TRNSYS que es un software el cual incluye su modelo matematico internamente, teniendo en cuenta menor cantidad de consideraciones ideales, ya que fue hecho para el uso de estudios de proyectos reales y basado en fuentes bibliograficas y mayor complejidad para el planteamiento del modelo, son mas acertivos los resultados obtenidos de este, dejando tambien claro la recomendación de un chequeo previo al modelo matematico que se utilizó para el desarrollo de este proyecto.

9. DESARROLLO FASE V: ESTUDIO DE VIABILIDAD FINANCIERA

El estudio de factibilidad tiene el objetivo de determinar el potencial de mercado, en este caso, del producto a adquirir para la mejora del funcionamiento del sistema, lo que da el indicador de *viabilidad financiera*, de la correcta evaluación que se realice depende que los proyectos a ejecutar contribuyan al desarrollo a mediano y largo plazo de una empresa, de la economía y el avance del país. Para ello se necesitan proyecciones y aproximaciones, que en este ejercicio es puntualmente los resultados de la simulación hecha.

- Estudio de factibilidad de mercado

Adquisición

Los sistemas térmicos solares han tomado fuerza con el avance de las energías renovables, el afán de ayudar al planeta tierra y hacer posible la sostenibilidad en la producción de energía.

Cada día son más las industrias que se suman a la implementación de energías limpias, las razones varían, unas van más allá de la concientización ambiental, atadas a la economía.

Las empresas que proveen estos sistemas se encuentran a nivel nacional e internacional, cada una ofreciendo diversos tipos los cuales suplen las necesidades dependiendo de los requerimientos del cliente, como ya se dijo, la empresa para este proyecto fue *CHROMAGEN*.

- Estudio de factibilidad técnica

Para la simulación realizada se tuvo en cuenta una ciudad de ubicación lo cual está ligado a los datos meteorológicos, además se simuló con los valores de radiación críticos, ya que las simulaciones solo son una aproximación de un sistema real, por tanto además de las cualidades con las que cuenta el sistema térmico solar seleccionado, el buen funcionamiento depende de las condiciones en las que trabajará. No se tuvo en cuenta una localización en una empresa, ni espacios delimitados aunque si se trabajó con márgenes aceptables para una posible implementación, además el sistema térmico elegido cuenta con una facilidad de montaje y ensamble, apoyo técnico por parte de la empresa proveedora, practicidad para su uso y monitoreo.

En cuestión de requerimiento de la caldera y oferta del colector, se tuvo en cuenta desde la caracterización de los sistemas.

- Estudio de factibilidad medio ambiental

Sujeto a una mejora en el proceso de producción de vapor, está la implementación de una energía renovable: solar. Con el fin de reemplazar los intercambiadores de calor convencionales, que pueden ser productores de agentes contaminantes y promover el uso de las energías sostenibles.

La ventaja excepcional, no tiene ningún efecto medio ambiental maligno, todo lo contrario, la implementación de un sistema integrado colector-caldera aportaría al avance industrial amigable con el medio ambiente.

- Estudio de factibilidad económica-financiera

Costo del sistema termico solar

Sistemas de circulación forzada Chromagen FZ2 200L PRO con:

- 1 captador solar
- acumulador de 200 litros de capacidad útil
- estructura fabricada en acero galvanizado
- estación solar

Costo:1540,14 Euros

Tomando un valor promedio del Euro en pesos el costo del sistema térmico solar seria

\$ 4.620.420 COP

Costo de instalación²⁵

El precio medio de instalar energia solar termica es de 1.450 Euros aproximadamente **\$4.350.000 COP**

Costo total de la implementación del sistema térmico solar:

\$8.970.420 COP

Combustible

Precio para combustible en Bucaramanga ²⁶

El costo promedio unitario para transporte de gas natural destinado a usuarios regulados: $T_m = 299,56 \text{ \$/m}^3$

Costo por uso del sistema de distribución de gas natural destinado a usuarios regulados: $D_m = 298,04 \text{ \$/m}^3$

El cargo fijo de comercialización a usuarios regulados: $C_{uf} = 2088 \text{ \$/factura}$
 $C_{uv} = 971.88 \text{ \$/m}^3$

²⁵ HABITISSIMO. Precio Instalar Energía Solar Térmica (Calefacción o ACS). Consultado el 4 de marzo de 2017. Disponible en [<https://precio.habitissimo.es/instalar-energia-solar-termica-calefaccion-o-ac>]

²⁶ ANEXO 4

Para sistema sin implementación de precalentamiento:
Consumo de mc máximo

$$284,89m^3 * mes$$

$$costo \ de \ combustible \ por \ mes = \frac{284,89 * 1867 \$}{m^3} = 532037 \ COP$$

Para sistema con implementación de precalentamiento:
Consumo de mc máximo

$$185,7m^3 * mes$$

$$costo \ de \ combustible \ por \ mes = \frac{185,7 * 1867 \$}{m^3} = 346702 \ COP$$

Con aumento de temperatura se ahorra **185335 COP mensual** en gastos de combustible al mes, si se calcula el PRI(periodo de retorno de inversión)

$$PRI = \frac{costo \ sistema \ térmico \ COP}{ahorro \ de \ combustible \ COP/mes} \quad (73)$$

$$\frac{8.970.420 \ COP}{185.335.1 \ COP/MES} = 48,4 \ MESES$$

El PRI o periodo de retorno de la inversión, es la relación o ratio financiero que compara la inversión realizada sobre el beneficio obtenido en cierta cantidad de tiempo.

Según el valor del PRI obtenido para el proyecto propuesto equivalente a 48,4 meses, indica que para una proyección de poco mas de 4años, se tendrá devuelta el dinero invertido.

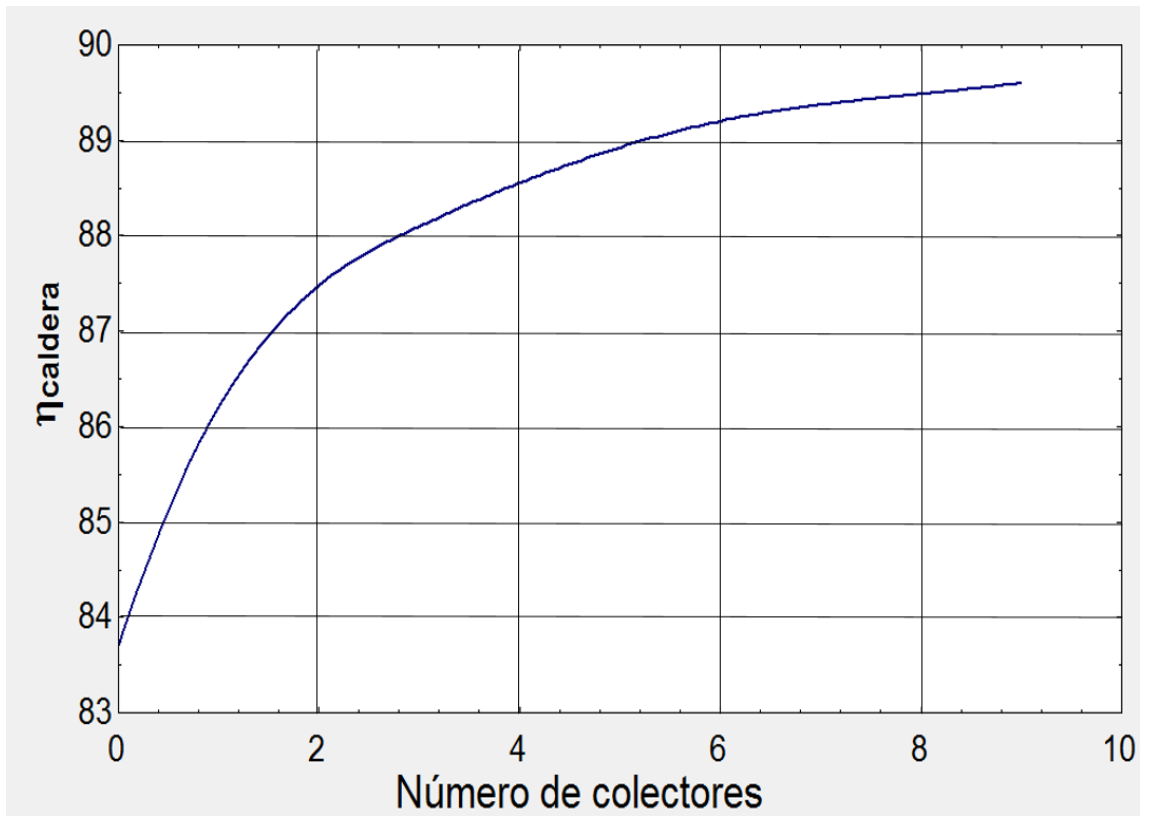
Lo anterior para la implementación de un sistema térmico solar con un solar captador.

Como estudio adicional se presenta la Figura 73, esta da una visión mas allá de la aplicación de un solo colector, se muestra el aumento de la eficiencia de la caldera con respecto al aumento de colectores solares en el sistema.

Hasta un número igual a 2 colectores se ve un aumento alrededor de 2% con respecto a la eficiencia del sistema con un colector, pasar de 4 a 6 colectores solo presenta un aumento de 1%

Ahora, teniendo en cuenta que el sistema con respecto al comportamiento del combustible y aumento de número de colectores no presenta mejoras relevantes, y basados en los cálculos hechos con la ecuación 73, se propone de 1 a 3 un número permisible de colectores a implementar, aclarando que para tener un valor de PRI que indique viabilidad financiera, deberá extenderse el plazo de recuperación de inversión, es decir será mayor a 4años.

Figura 73. Gráfica de eficiencia de caldera vs número de colectores



10. CONCLUSIONES

- ✓ Partiendo de el valor de la eficiencia en Matlab-Simulink sin precalentamiento de (82,6 a 83,6)% , para este mismo software se mostró un aumento alrededor de 3%, si se implementara el precalentamiento al agua de alimentación de la caldera mediante el sistema termico solar.
- ✓ El valor de la eficiencia en TRNSYS sin precalentamiento es de 85%, para este mismo software se mostró un aumento alrededor de 1,66%, si se implementara el precalentamiento al agua de alimentación de la caldera mediante el sistema termico solar.
- ✓ Se obtuvo un valor de PRI equivalente a 48,4 meses, lo que indica que para una proyección de poco mas de 4años, se tendrá devuelta el dinero invertido, siendo un tiempo menor al estimado para este tipo de energia termica solar que va de 5 a 10 años.
- ✓ La interacción del sistema en conjunto alteró considerablemente el desempeño en el colector solar, observándose una disminución alrededor de 7°C en el calentamiento del agua, esto debido al compartimiento del tanque de acumulación entre los dos sistemas.
- ✓ El proyecto se desarrolló con un sistema térmico solar de un(1) colector, pero se hizo un análisis de eficiencia vs número de colectores pensando en un mayor beneficio, con el cual se propuso que el número permisible de colectores a implementar sea de 1 a 3, aclarando que el plazo de recuperación de inversión aumentará, debido al mayor costo.

BIBLIOGRAFIA

ABSORSISTEM. Caldera con tubos múltiples de humo-Pirotubulares. [En línea].[Consultado 21 de mayo de 2016]. Disponible en: <<http://www.absorsistem.com/tecnologia/calderas/pirotubulares>> .

ASTONOMIA OMG. El Sol. [En línea].[Consultado el 13 de noviembre de 2016]. Disponible en: <<http://astronomiaomg.blogspot.com.co/search?q=el+sol>>

ASTROMIA. Estructura y composición del sol. [En línea]. [Consultado 13 de Noviembre de 2016]. Disponible en: <<http://www.astromia.com/solar/estrucsol.htm>>..

BBC MUNDO. Los países de América Latina que mas y menos invierten en energías renovables [en línea]. [Consultado Citado el 23 de enero de 2017]. Disponible en: <http://www.bbc.com/mundo/noticias/2016/04/160329_ciencia_energia_renovable_inversion_america_gtg>.

BOTIA, Javier Leonardo y PARRA, Manuel José. Simulación y cuantificación del ahorro energético de una caldera pirotubular bajo control on-off y continuo. Trabajo de grado Ingeniero Mecánico. Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica, 2005.

CALEFACCION SOLAR. ¿Cuáles son los tipos de colectores solares?. [En línea]. [Consultado 15 de junio de 2016]. Disponible en:

<<http://calefaccion-solar.com/cuales-son-los-tipos-de-colectores-solares.html>> .

CENGEL, Yunus A. Transferencia de calor y masa. 3 ed. Mexico.:McGraw-Hill/Interamericana Editores,SA,2007. ISBN-13 978-0-07-312930-3

DUFFIE, John A. Beckman, William A. Solar Engineering of Thermal Processes. 4 ed. Hoboken, New Jersey. Canadá :Copyright, 2013.

GAS NATURAL FENOSA. El gas natural. [en línea]. [Consultado 20 de marzo de 2017]. Disponible en: <<http://www.gasnaturalfenosa.com.co/co/comercio/el+gas+natural/1297102553412/que+es.html>>

ECOCARBON, Universidad Pontificia Bolivariana. Calderas a Carbón. Medellín, Colombia: Editorial Universidad Pontificia Bolivariana, 1998. 104p. ISBN 958-696-017-X

ENERGIA SOLAR. Energías renovables. [En línea]. [Consultado Junio 1de 2016]. Disponible en: <<https://solar-energia.net/energias-renovables>>

ESTRUCPLAN CONSULTORA S.A. Tipos de aparatos sometidos a presión con fuego. [En línea]. Noviembre, 2011 [Consultado 23 de junio, 2016]. Disponible en: <www.estrucplan.com.ar/producciones/entrega.asp?IDEntrega=2953>

ESTUDIO DE FACTIBILIDAD Y PROYECTOS. Factibilidad y Viabilidad. [en línea]. Septiembre, 2010. [Consultado 20 de Febrero, 2017]. Disponible en: <<http://estudiodefactibilidadyproyectos.blogspot.com.co/2010/09/factibilidad-y-viabilidad.html>>

FERNÁNDEZ, Ramón. El inicio del fin de la era de los combustibles fósiles. Madrid. 3p.

FENERCOM. Guía básica de calderas Industriales Eficientes. Madrid. Cap.3-4.

GAMARRA, Lauro. Cambio de fase. [en línea]. 18 de enero, 2011. [Consultado 23 de junio, 2016]. Disponible en: <<http://fisicaidued.blogspot.com.co/2011/01/cambio-de-fase.html>>

GELVEZ AROCHA, Omar Armando. Programación para el cálculo de una caldera pirotubular. Proyecto de clase Sistemas Térmicos. Bucaramanga, Colombia :Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica.

GEOENCICLOPEDIA. El Sol. [en línea]. [Consultado 2 de diciembre, 2016]. Disponible en :<<http://www.geoenciclopedia.com/el-sol/>>

Geracao Termica:Poder Calorifico. [en linea]. [Consultado el 16 de diciembre, 2016]. <<http://www.antoniolima.web.br.com/arquivos/podercalorifico.htm>>.

HESPERIAN HEALTH GUIDES. Energía Limpia. [en línea]. [Consultado el 10 de mayo,2016]. Disponible en: <http://es.hesperian.org/hhg/A_Community_Guide_to_Environmental_Health:Cap%C3%ADtulo_23:_Energ%C3%ADa_limpia>

INGEMECANICA. Instalaciones Termosolares para la producción de agua caliente sanitaria (A.C.S). [en línea]. [Consultado el 25 de febrero, 2017]. Disponible en: <<http://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn188.html>>

IGUARAN, Omar Arturo y MARTINEZ, Diana Milena. Diseño y construcción de una caldera pirotubular para el laboratorio de transferencia de calor Trabajo de grado Ingeniero Mecánico. Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica, 2008.

INSTITUTO TECNOLOGICO DE CANARIAS, S.A. Energías renovables y eficiencia energética. 1 ed. Copyright, 2008. 16 p. ISBN 978-84-69093-86-3.

INSTITUTO PARA LA DIVERSIFICACION Y AHORRA DE ENERGIA-IDAE. Energía solar térmica. Madrid: IDAE, 2006. Manuales de energías renovables, 4.

IRENA. Energías Renovables en América Latina 2015: Sumario de Políticas. Abu Dhabi: Copyright, 2015. 8 p.

JARAMILLO, O. A. Intercambiadores de calor. Centro de investigación en energía, Universidad Nacional Autónoma de México. 2007.

JIMENEZ, Carlos O. Cálculos de procesos de vapor en una industria textil. Trabajo de Ingeniero Mecánico. Guayaquil, Ecuador: Escuela Superior Politécnica del Litoral, 1997. 52 p.

KREITH, Frank. y GOSWAMI, D. Yogui. Handbook of energy and renewable energy. CRC Press-Taylor & Francis Group. Mechanical engineering series. ISBN 0-8493-1730-4

Modelado de sistemas dinámicos. [en línea]. [Consultado el 4 de mayo, 2016]. Disponible en: <www.matcuer.unam.mx/~victor/Sistemas/modelado_sistemas_dinamicos.pdf>

NATIONAL GEOGRAPHIC. El sol. [en línea]. [Consultado 23 de Julio, 2017]. Disponible en: <<http://www.nationalgeographic.es/ciencia/espacio/sun-article>>.

PEÑALBA G, Jordi. Modelado y Simulación de una caldera convencional. Trabajo de Ingeniería electrónica, eléctrica y automática. Escuela Técnica Superior de Ingeniería, 2003.

PEREZ LOPEZ, Cesar. MATLAB y sus aplicaciones en la ciencia y la ingeniería. Madrid : Pearson educación, S.A., 2002. ISBN 84-205-3537-0

QUIÑONEZ CERCADO, Nick Lee. Desarrollo del software para el análisis y diseño térmico de calderas pirotubulares horizontales con quemadores a diésel y bunker. Trabajo de Ingeniero Mecánico. Guayaquil, Ecuador: Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2008.

RUBBIO, C. *et al.* Determinación de la emisividad de llama y el calor de radiación por combustión en el hogar de una caldera. *Ingenium*, 10(28). 27-32.

SEDIGAS. Guía sobre aplicaciones de la energía solar térmica. España. 2013.

GUEVARA V, Sixto. TEORIA PARA EL DISEÑO DE CALENTADORES SOLARES DE AGUA. Lima, 2003.

SPIRAX-SARCO. Presentación Guía de Calderas Industriales.

SPIRAX-SARCO. Sistema de Control de purga BCS3. http://www.spiraxsarco.com/global/ar/Products/Documents/Sistema_de_control_de_purga_BCS3-Cat%C3%A1logos.pdf

Transient System Simulation Tool. TRNSYS. [en línea]. Copyright, 2016. [Consultado 20 de Junio, 2016]. Disponible en: <www.trnsys.com>

TWENERGY. ¿Qué son las energías renovables?.[en línea]. [Consultado 18 de mayo, 2016]. Disponible en: <<https://twenergy.com/a/que-son-las-energias-renovables-516>>

VIDAL,Aibis y DOMINGUEZ,Yasleny. Etapas del analisis de factibilidad. [en línea]. [Consultado 26 de febrero, 2017. Disponible en: <<http://www.eumed.net/ce/2009a/amr.htm>> .

ZABALZA, Ignacio y ARANDA, Alfonso. Energia Solar Térmica. Prensas Universitarias de Zaragoza. Zaragoza, 2009.

