

DISEÑO CONCEPTUAL DE UN COLECTOR SOLAR DE PLACA PLANA
PORTABLE CON INTEGRACION DE MATERIALES TRANSPARENTES
DE AISLAMIENTO

AUTORES:

SEBASTIAN URRUTIA OSPINA

LUISA MARIA BOTERO MONTOYA

DIRECTORES:

JULIÁN DAVID OSORIO RAMÍREZ

SEBASTIAN VILLEGAS MONCADA

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN



UNIVERSIDAD DE MEDELLÍN

FACULTAD DE INGENIERIAS

INGENIERIA EN ENERGIA

MEDELLÍN

2018

RESUMEN

En este trabajo se desarrolla una metodología para realizar el diseño de un colector solar de placa plana (CPP) con la integración de materiales transparentes de aislamiento (TIM). Estos materiales son transparentes a las longitudes de onda de la radiación solar y al mismo tiempo proveen aislamiento térmico, restringiendo las pérdidas de energía en longitudes de onda del infrarrojo lejano vía re-radiación y por conducción. Finalmente, se realiza un modelo matemático simplificado, a partir de resistencias térmicas y flujos de calor unidireccionales, para evaluar y comparar el desempeño de un colector convencional frente un colector con TIM, variando algunas de sus propiedades como al emitancia, conductividad y coeficiente de extinción, además del espesor de los *gaps* presentes en el sistema.

ABSTRACT

In this work, a way to design a flat plate solar collector with the integration of transparent insulation materials (TIM) was developed. These materials are transparent to the wavelengths of solar radiation and at the same time thermal insulation is provide. The energy losses by conduction and re-radiation at far-infrared wavelengths are restricted. Finally, from unidirectional heat flow rate and thermal resistances simplified mathematical model was made, varying its emittance, conductivity and extinction coefficient as well as the gaps thickness present in the system, to evaluate and compare a conventional collector and collector with TIM.

PALABRAS CLAVES

Colector Solar, Eficiencia, TIM, Pérdidas de Calor, Radiación solar.

KEYWORDS

Solar collector, Efficiency, TIM, Losses of heat, Solar radiation.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a los profesores Julián David Osorio Ramírez y Sebastián Villegas Moncada por el acompañamiento durante la realización de este trabajo y a nuestras familias por el apoyo que nos han brindado durante todo este tiempo de estudio.

TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS	5
LISTA DE TABLAS	6
LISTA DE ANEXOS.....	7
NOMENCLATURA.....	8
INTRODUCCIÓN.....	9
1.1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	9
1.2. JUSTIFICACIÓN.....	10
1.3. MARCO TEÓRICO.....	12
1.3.1. PANORAMA ENERGÉTICO MUNDIAL.....	12
1.3.2. PANORAMA ENERGÉTICO COLOMBIA.....	15
1.3.3. DEFINICIÓN DE LA TEGNOLOGÍA.....	19
1.5. OBJETIVOS.....	26
1.5.1. OBJETIVO GENERAL.....	26
1.5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	26
1.6 METODOLOGÍA.....	26
2. DISEÑO PRELIMINAR DE DETALLE.....	27
2.1. LISTA DE REQUERIMIENTOS.....	27
2.2. ÁRBOL DE OBJETIVOS.....	29
2.4. CAJA TRANSPARENTE.....	33
2.5. CASA DE LA CALIDAD.....	34
2.6. DIAGRAMA MORFOLOGICO.....	39
2.7. ASIGNACIÓN DE PESOS RELATIVOS A LOS OBJETIVOS.....	42
2.8. EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS.....	44
2.9. DIMENSIONAMIENTO DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO TÉRMICO.....	45
2.11. ESPECIFICACIONES DEL DISEÑO DEL COLECTOR.....	49
3. DESCRIPCIÓN DEL MODELO.....	50
3.1. ANALISIS TÉRMICO Y ÓPTICO.....	50
3.2 SIMULACIÓN DEL MODELO.....	52
GLOSARIO.....	61
CONCLUSIONES.....	62
RECOMENDACIONES.....	63
BIBLIOGRAFIA.....	64

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Curva de Keeling -----	13
Figura 1.2. Consumo de energía eléctrica -----	14
Figura 1.3. Producción de energía renovable -----	14
Figura 1.4. Proyectos registrados ante la UPME -----	16
Figura 1.5. Energía primaria por sector -----	16
Figura 1.6. Irradiación global horizontal media anual multianual -----	17
Figura 1.7. Brillo solar medio anual multianual -----	18
Figura 1.8. Energías renovables -----	19
Figura 2.1. Árbol de objetivos -----	31
Figura 2.2. Caja negra -----	32
Figura 2.3. Caja transparente -----	34
Figura 2.4. Casa de la calidad -----	38
Figura 2.5. Diagrama morfológico -----	40
Figura 2.6. Asignación de pesos relativo a los objetivos -----	43
Figura 2.7. Plano del colector -----	46
Figura 2.8. Configuración paralela -----	47
Figura 2.9. Configuración serie -----	47
Figura 2.10. Instrumentación del colector -----	48
Figura 3.1. Diagrama colector solar -----	50
Figura 3.2. Modelo térmico del colector solar de placa plana -----	50
Figura 3.3. Eficiencia del colector variando espesor del TIM -----	54
Figura 3.4. Pérdidas de calor variando espesor del TIM -----	54
Figura 3.5. Eficiencia del colector variando la emitancia del TIM -----	55
Figura 3.6. Pérdidas de calor variando la emitancia del TIM -----	55
Figura 3.7. Eficiencia del colector variando la conductividad del TIM -----	56
Figura 3.8. Pérdidas de calor variando la conductividad del TIM -----	56
Figura 3.9. Eficiencia del colector variando el coeficiente de extinción del TIM -----	57
Figura 3.10. Pérdidas de calor variando el coeficiente de extinción del TIM -----	58
Figura 3.11. Eficiencia del colector variando el gap de aire de t_3-t_2 -----	59
Figura 3.12. Pérdidas de calor variando el gap de aire de t_3-t_2 -----	59
Figura 3.13. Eficiencia del colector variando el gap de aire de t_5-t_4 -----	60
Figura 3.14. Pérdidas de calor variando el gap de aire de t_5-t_4 -----	60

Nota: figuras no referenciadas son de autoría propia.

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1. Propiedades del TIM -----	23
Tabla 2.1. Lista de requerimientos -----	28
Tabla 2.1.1. Continuación lista de requerimientos -----	29
Tabla 2.2. Cuadro morfológico -----	41
Tabla 2.3. Características de materiales aislantes -----	42
Tabla 2.4. Evaluación de alternativas -----	44
Tabla 2.5. Variables para el dimensionamiento del tanque -----	45
Tabla 2.6. Características del colector -----	49
Tabla 3.1. Parámetros referencia usados en MATLAB. -----	52
Tabla 3.1.1. Continuación Parámetros referencia usados en MATLAB. -----	53

Nota: tablas no referenciadas son de autoría propia.

LISTA DE ANEXOS

ANEXO 1. PARÁMETROS DE DISEÑO COMERCIALES Y EN DESARROLLO -----	69
ANEXO 2. PLANOS -----	72
ANEXO 3. CÓDIGO EN MATLAB PARA EL MODELO DEL COLECTOR -----	79

Nota: anexos no referenciados son de autoría propia.

NOMENCLATURA

T	Temperatura [K]	Cp	Calor específico [kJ/kg K]
T _i	Temperatura de inicial [K]	ρ	Densidad del agua [kg/m ³]
T _f	Temperatura de final [K]	A	Área del colector [m ²]
q _{HTF}	Calor transferido al fluido [W]	A _{ab}	Área del absorbedor [m ²]
q _{rad}	Calor de radiación [W]	t	Espesor [m]
q _{loss}	Pérdidas de calor [W]	m	Flujo másico [kg/h]
q _{in}	Calor de entrada [W]	ṽ	Flujo volumétrico [l/h]
q _{out}	Calor de salida [W]	eps	Épsilon
R _{rad}	Resistencia radiación [K/W]	h	Coefficiente convectivo y radiactivo
R _{conv}	Resistencia convección [K/W]	Subíndices	
R _{cond}	Resistencia conducción [K/W]	CCP	Colector cilindro-parabólico
R _{amb}	Resistencia ambiente [K/W]	CPP	Colector de placa plana
R _{cielo}	Resistencia cielo [K/W]	PV	Panel Fotovoltaico
R _{total}	Resistencia total [K/W]	i	Inicial
I _{rad}	Irradiancia [w/m ²]	f	Final
K	Conductividad térmica [W/m K]	HTF	Fluido de transferencia de calor
τ _s	Transmitancia de la cubierta de vidrio	rad	Radiación
C	Radio de concentración	loss	Pérdidas
R _{ra}	Radiación reflejada [%]	in	Entrada
ξ	Emitancia	out	Salida
α	Absortividad	conv	Convección
μ	Coefficiente de extinción [m ⁻¹]	cond	Conducción
η _c	Eficiencia del colector	amb	Ambiente
η _R	Eficiencia del receptor	c	Colector
η	Eficiencia	ab	Absorbedor
H	Ancho del colector [m]	dis	Carcasa
L	Longitud del colector [m]	gl	Glass envelope

INTRODUCCIÓN.

1.1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.

El desarrollo energético ha sido un pilar fundamental para el crecimiento económico y tecnológico de la humanidad. Por más de cien años, los combustibles fósiles han sido la principal fuente de energía; sin embargo, el uso extensivo y su dependencia ha generado una serie de problemas ambientales como la contaminación atmosférica, de las fuentes hídricas y el calentamiento global. Estos impactos negativos en nuestro medio ambiente se han convertido en un desafío que ha llevado al desarrollo de nuevos sistemas de generación más eficientes, amigables con el medio ambiente y basados en el aprovechamiento de los recursos energéticos renovables. Entre estos recursos se encuentra la energía eólica (“POR MEDIO DE LA CUAL SE REGULA IA INTEGRACIÓN DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES NO CONVENCIONALES AL SISTEMA ENERGÉTICO NACIONAL. EL CONGRESO DE COLOMBIA,” n.d.), biomasa (“¿Qué es la bioenergía? - RBA Ambiental,” n.d.), mareomotriz (“Energía Mareomotriz,” n.d.), undimotriz (“» ¿Qué es la Energía Undimotriz? Energías como Bienes Comunes,” n.d.), gradientes térmicos y salinos (“Energía de gradiente salino una solución ecológica,” n.d.), geotérmica (“Instalaciones Geotérmicas - La energía inagotable y gratuita,” n.d.), las pequeñas centrales hidroeléctricas y la energía solar (“POR MEDIO DE LA CUAL SE REGULA IA INTEGRACIÓN DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES NO CONVENCIONALES AL SISTEMA ENERGÉTICO NACIONAL. EL CONGRESO DE COLOMBIA,” n.d.). Además de ser amigables con el medio ambiente, los recursos energéticos renovables son fuentes inagotables de energía (“La importancia de las energías renovables | ACCIONA,” n.d.).

En el caso de Colombia, la canasta de energía eléctrica se compone de aproximadamente un 70% de energía hidráulica, y un 30% de energía térmica, empleando carbón o gas natural como combustible. Esta última se encarga de garantizar la confiabilidad del sistema interconectado y absorber los picos de demanda. En el caso de las energías renovables, es poca su participación y hasta el momento son pocas las plantas de generación basadas en el uso de fuentes energéticas renovables que se han construido. Dos de los proyectos pioneros en Colombia en el aprovechamiento de los recursos energéticos renovables son la planta de generación eólica Jepirachi en la Guajira, con una potencia nominal de 19.5Mw (Baxter, Hastings, Law, & Glass, 2008) desarrollado por Empresas Públicas de Medellín, y

el proyecto solar fotovoltaico Yumbo en el Valle del Cauca, con una potencia de 9.8Mw (“Granjas Solares,” n.d.), desarrollado por Celsia. Es importante destacar que el interés por el uso de las energías renovables ha venido creciendo en el país. Es así como para el 2018 se han registrado ante la UPME (Unidad de Planeación Minero-Energética) diferentes proyectos de generación de energía, entre los cuales se destacan 6 proyectos con biomasa, 10 de energía eólica y 161 de energía solar. En total, existen 374 proyectos vigentes hasta la fecha (“INFORME DE REGISTROS DE PROYECTOS DE GENERACIÓN,” n.d.).

En este trabajo se pretende realizar y evaluar el diseño conceptual de un colector solar de placa plana, portable y que tenga integrado un material transparente de aislamiento, mediante la aplicación de una metodología de diseño adecuada. A partir de un análisis y evaluación de diferentes alternativas de diseño, se definirá la mejor opción para el desarrollo conceptual de dicho colector. Además del potencial comercial de esta tecnología, su versatilidad y modularidad permitirán la extensión en su uso, no sólo como sistema para la calefacción de agua sanitaria, sino también como un instrumento de apoyo para la investigación y como banco de pruebas de laboratorio, que permita llevar a cabo experimentos bajo diferentes condiciones de operación y con remplazo o rediseño de alguno de sus componentes, para evaluar el desempeño del sistema.

1.2. JUSTIFICACIÓN.

En el desarrollo de éste trabajo se pretende estudiar el aprovechamiento de la energía solar térmica para el calentamiento de agua sanitaria. Colombia tiene como compromisos ambientales para el año 2030 , reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en un 20% (“EL ABC DE LOS COMPROMISOS DE COLOMBIA PARA LA COP21 CONTENIDO,” n.d.), y una forma de contribuir a esta meta es reemplazar los combustibles fósiles por la energía solar como fuente de calor. Tradicionalmente en Colombia, para calentamiento de agua sanitaria, se usan dos recursos, el primero es la energía eléctrica proveniente de recursos hidráulicos o térmicos, y el segundo, es gas natural, el cual es un combustible fósil, ambos tipos de recursos generan gases efecto invernadero de forma directa e indirecta, por lo que el uso de la energía solar para este tipo de aplicaciones es fundamental para contribuir con la mitigación del cambio climático. Se estima que alrededor del 35% de la energía eléctrica consumida en los hogares corresponde a la producción de

agua caliente (“DETERMINACIÓN DEL CONSUMO FINAL DE URBANO Y COMERCIAL DOMÉSTICOS DE ENERGÍA ELÉCTRICA Y GAS INFORME FINAL Presentado a : UPME Por : UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA FACULTAD DE CIENCIAS Departamento de Física,” 2006), lo que muestra una oportunidad para la incursión de tecnologías que aprovechan la energía solar térmica debido a su bajo costo e impacto ambiental. Los colectores de placa plana convencionales consisten en un sistema de tubos o canales por donde acoplados a una placa absorbidora de energía solar, la cual transfiere calor a un fluido de trabajo que circula a través de los tubos o canales. Los tubos o canales están ubicados entre una cubierta de vidrio y un sistema aislante para reducir las pérdidas de calor. La creciente demanda de los sistemas de conversión de energía solar hace necesario el desarrollo de sistemas cada vez más eficientes. Uno de los factores determinantes en la eficiencia de los colectores solares son las pérdidas de calor y una de las alternativas para reducir dichas pérdidas son los materiales transparentes aislantes o TIM por su sigla en inglés (Transparent Insulation Materials). Estos materiales son transparentes a las longitudes de onda de la radiación solar y al mismo tiempo proveen un buen aislamiento térmico restringiendo las pérdidas de energía en longitudes de onda del infrarrojo lejano vía re-radiación (Saxena & El-Sebaili, 2015).

Teniendo en cuenta lo anterior, con el desarrollo de este proyecto se pretende aplicar una metodología de diseño con la cual, en un futuro próximo, se permitirá la construcción de un colector funcional, portable, modular, y además de esto, eficiente, debido al uso de materiales transparentes de aislamiento, que aumentan la eficiencia con respecto a los colectores convencionales. Finalmente, este proyecto podrá beneficiar a personas o empresas que quieran implementar esta tecnología para el calentamiento diario de agua sanitaria sin generar impactos ambientales considerables.

1.3. MARCO TEÓRICO.

1.3.1. PANORAMA ENERGÉTICO MUNDIAL.

Los recursos energéticos han suplido gran cantidad de necesidades que la civilización ha tenido a través de los años, sin embargo, esas necesidades fueron cubiertas durante muchos años por los combustibles fósiles, por el petróleo y sus derivados, el carbón, etc., que evidentemente han afectado el medio ambiente, y desde hace algún tiempo, apenas como sociedad, nos hemos dado cuenta de los daños que se le han causado al ambiente, con las emisiones de gases efecto invernadero; a pesar de esta problemática, el uso de combustibles fósiles va en aumento. Estos combustibles han sido usados en diferentes sectores, como el sector industrial, el comercio, la agricultura, la minería, las construcciones, el sector transporte y además en el sector residencial, tanto urbano como rural. Para el año 2016, el consumo de combustibles fósiles era de alrededor de 85.5% del consumo mundial de energía primaria, lo preocupante de esto es que su demanda va en aumento (Corredor & Corredor, 2018), y se estima que su crecimiento sea aproximadamente del 30% al 2040 (Corredor & Corredor, 2018). Este aumento es debido al crecimiento de la población en el mundo. Según las Naciones Unidas, se espera que para el 2030 la población haya aumentado en 1000 millones de personas con respecto al 2015, y para el 2100 en casi 4000 millones de habitantes con respecto al mismo año ("Población | Naciones Unidas," n.d.), lo que lleva como consecuencia mayor demanda energética mundial.

Una de las formas de evaluar el aumento de la concentración de CO₂ en la atmósfera (Dióxido de Carbono), es por medio de la curva de Keeling, que muestra que para el 2013 ya se había superado una concentración de 400 partes por millón (ppm), y la lectura obtenida para octubre 16 de 2018 fue de 406.22 ppm ("The Keeling Curve | A daily record of atmospheric carbon dioxide from Scripps Institution of Oceanography at UC San Diego," n.d.). Esta gráfica muestra que en los últimos años el aumento de las emisiones de CO₂ ha sido muy grande, pues el pico es de casi 150ppm más que el primer año de medición. Las consecuencias de esto, se han evidenciado en el aumento de sismos, terremotos, etc., con mayor frecuencia y duración, causado por el incremento de la temperatura en el planeta.

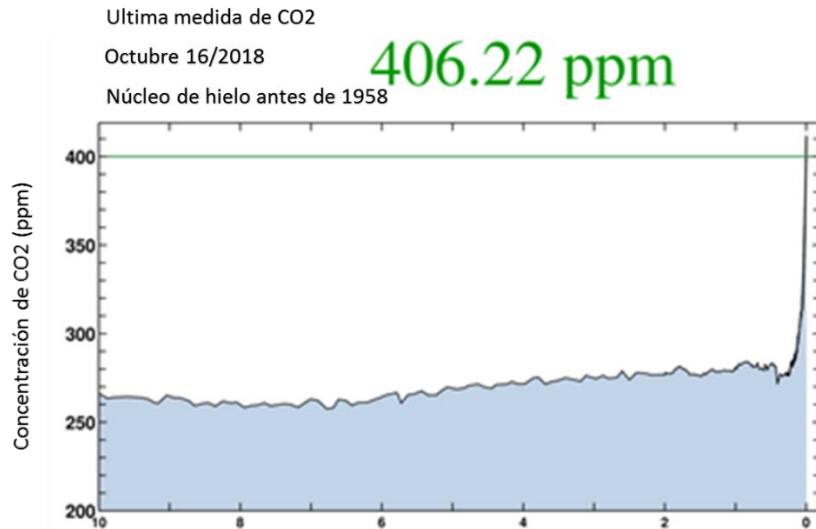


Figura 1.1. Curva de Keeling (“The Keeling Curve | A daily record of atmospheric carbon dioxide from Scripps Institution of Oceanography at UC San Diego,” n.d.).

El consumo de electricidad a nivel mundial crece cada año, como se muestra en la Figura 1.2, mostrando que para satisfacer esta demanda es necesario diversificar la matriz energética global, de lo contrario la concentración de CO₂ en la atmósfera será mayor. A raíz de esta necesidad y con el fin de alcanzar procesos sostenibles en la generación de energía, se han desarrollado investigaciones de nuevas tecnologías que permiten el aprovechamiento de fuentes renovables. En la Figura 1.3 se muestra que el aumento en la producción de energía a partir de fuentes renovables ha sido significativo a partir del año 1991.

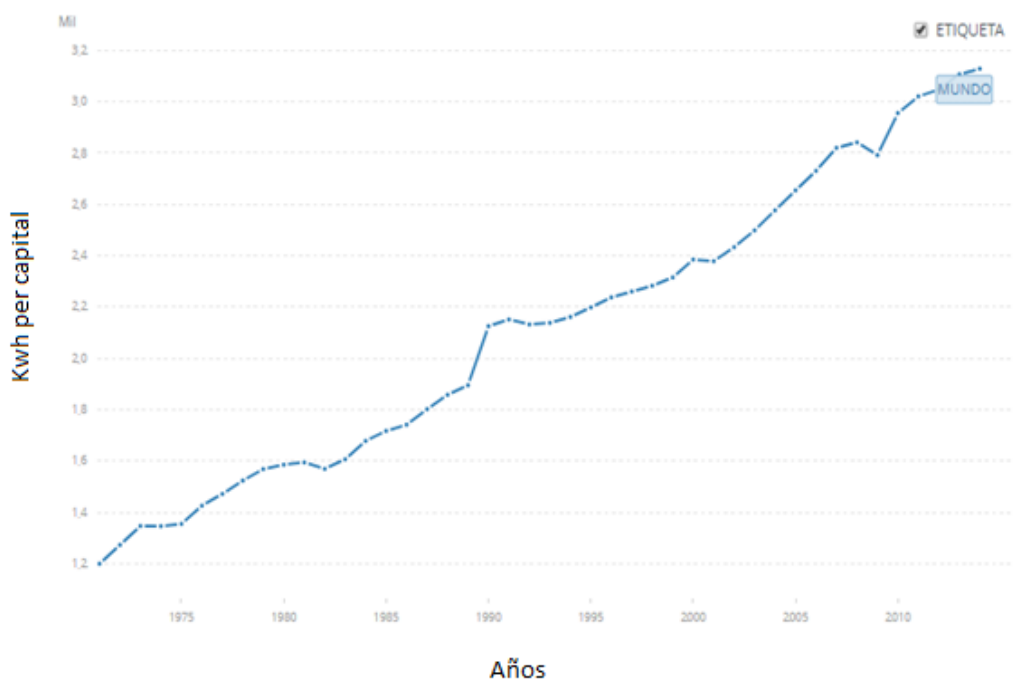


Figura 1.2. Consumo de energía eléctrica (“Consumo de energía eléctrica (kWh per cápita) | Data,” n.d.).

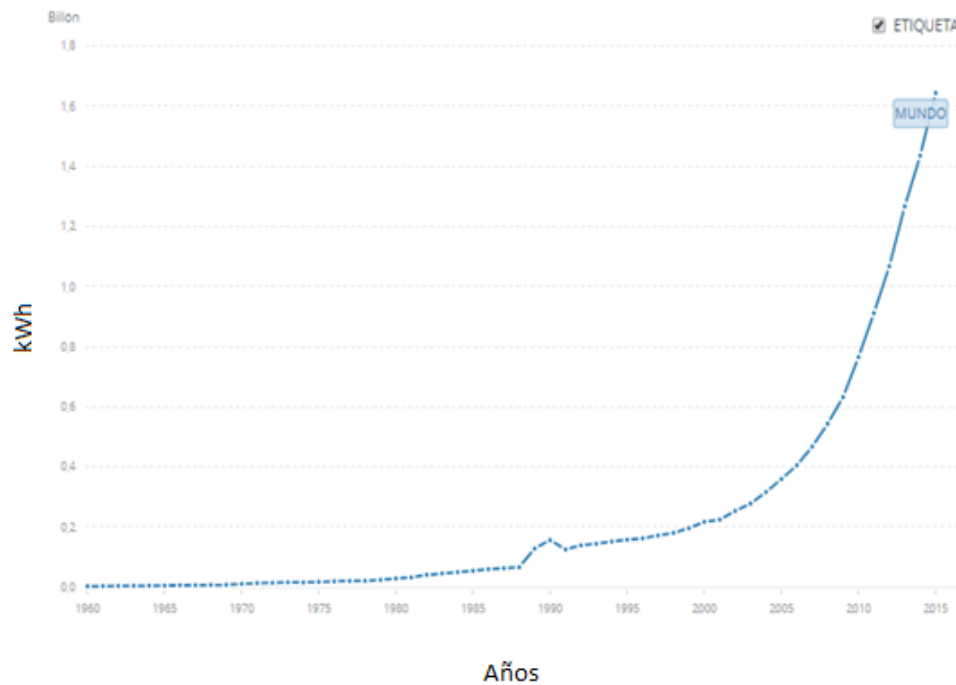


Figura 1.3. producción de energía renovable (“Consumo de energía eléctrica (kWh per cápita) | Data,” n.d.).

1.3.2. PANORAMA ENERGÉTICO COLOMBIA.

En el caso de Colombia la implementación de energía renovables no convencionales ha sido un proceso lento, hasta el 2018 apenas se tiene una central de energía renovable conectada al sistema interconectado nacional (“Granjas Solares,” n.d.). Sin embargo, la necesidad de diversificar la canasta energética es un objetivo en las nuevas políticas del país y debido a que la matriz energética nacional está compuesta por un 70% hidráulica y 30% termoeléctrica, la producción de energía eléctrica en Colombia depende de las variaciones climáticas, en especial en fenómenos del niño, donde la disminución de la capacidad de generación hídrica debe ser respaldada por la generación térmica, provocando un incremento en las emisiones de gases efecto invernadero y aumento en los costos de generación. A raíz de esta problemática, en los últimos años se han presentado diferentes proyectos ante la UPME para el aprovechamiento de los recursos renovables no convencionales, mostrando que la energía eólica y solar son las de mayor interés en Colombia como se puede observar en la figura 1.4

De otro lado, la matriz de consumo (ver figura 1.5) muestra que, en el consumo de energía primaria en Colombia, el calentamiento de agua sanitaria representa el 7%, frente a un 46% que representa el consumo de energía en cocción de alimentos. Para ambos usos específicos, las fuentes de energía son gas natural, gas natural licuado o energía eléctrica. Dadas estas necesidades de energía térmica, el calentamiento de agua o la cocción de alimentos puede lograrse por otro tipo de recursos más amigables con el medio ambiente como es la energía solar térmica.

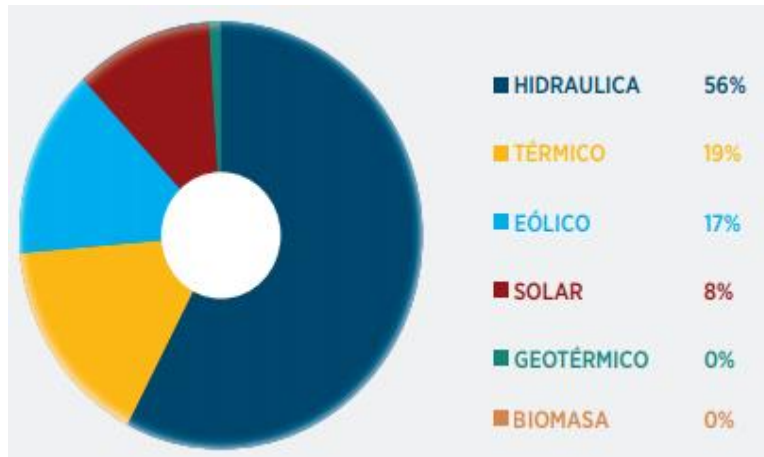


Figura 1.4. Proyectos registrados ante la UPME (Upme, 2016).

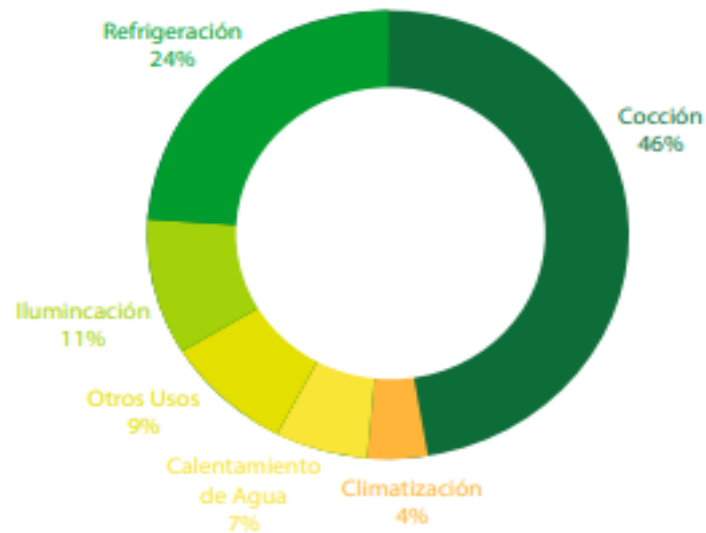


Figura 1.5. Energía primaria por uso en los sectores residencial, comercial e industrial (Ministerio de Minas y Energía de Colombia & Unidad de Planeación Minero Energética - UPME, 2017).

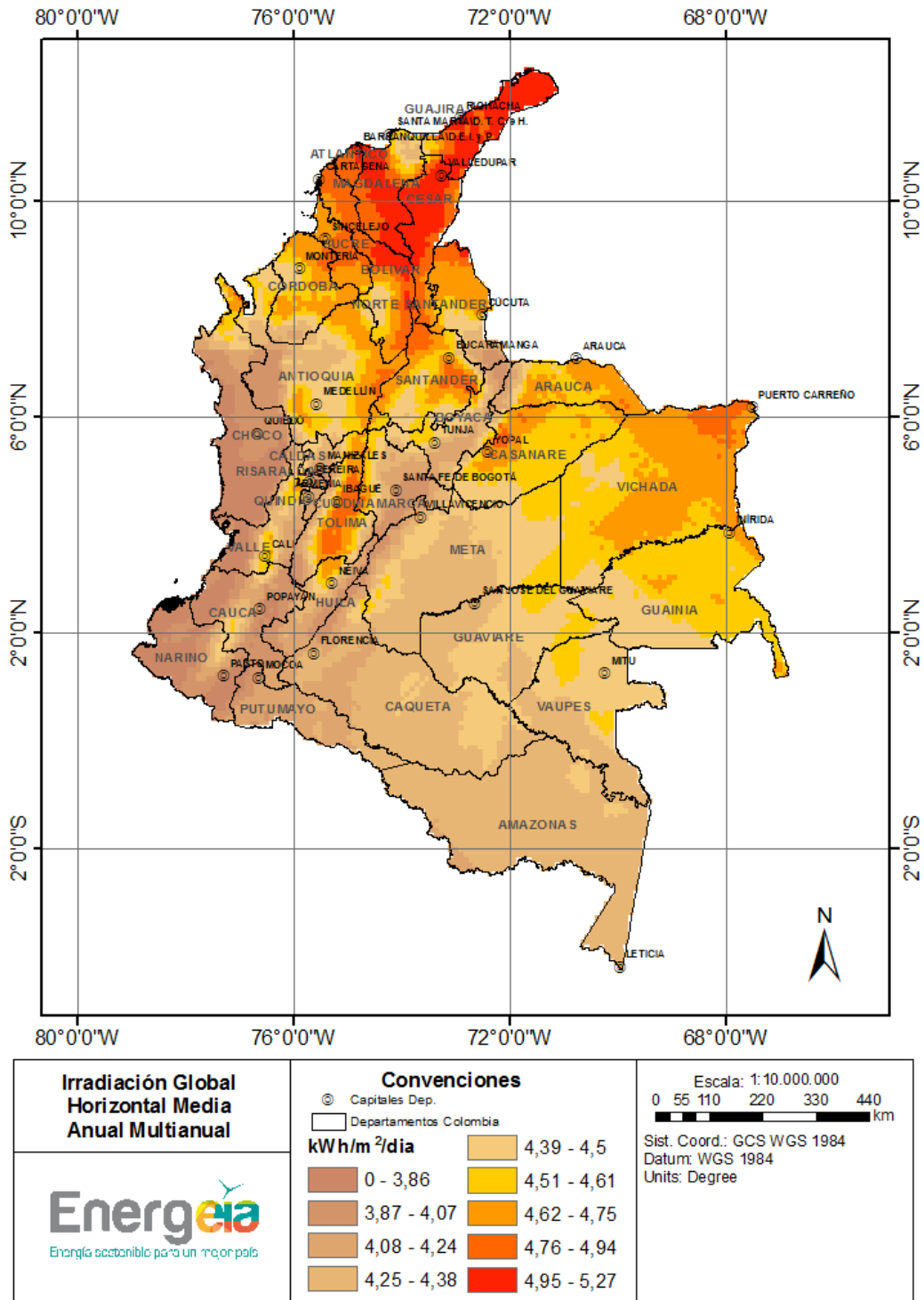


Figura 1.6. Irradiación global horizontal media anual multianual. (Karlsson et al., 2013)

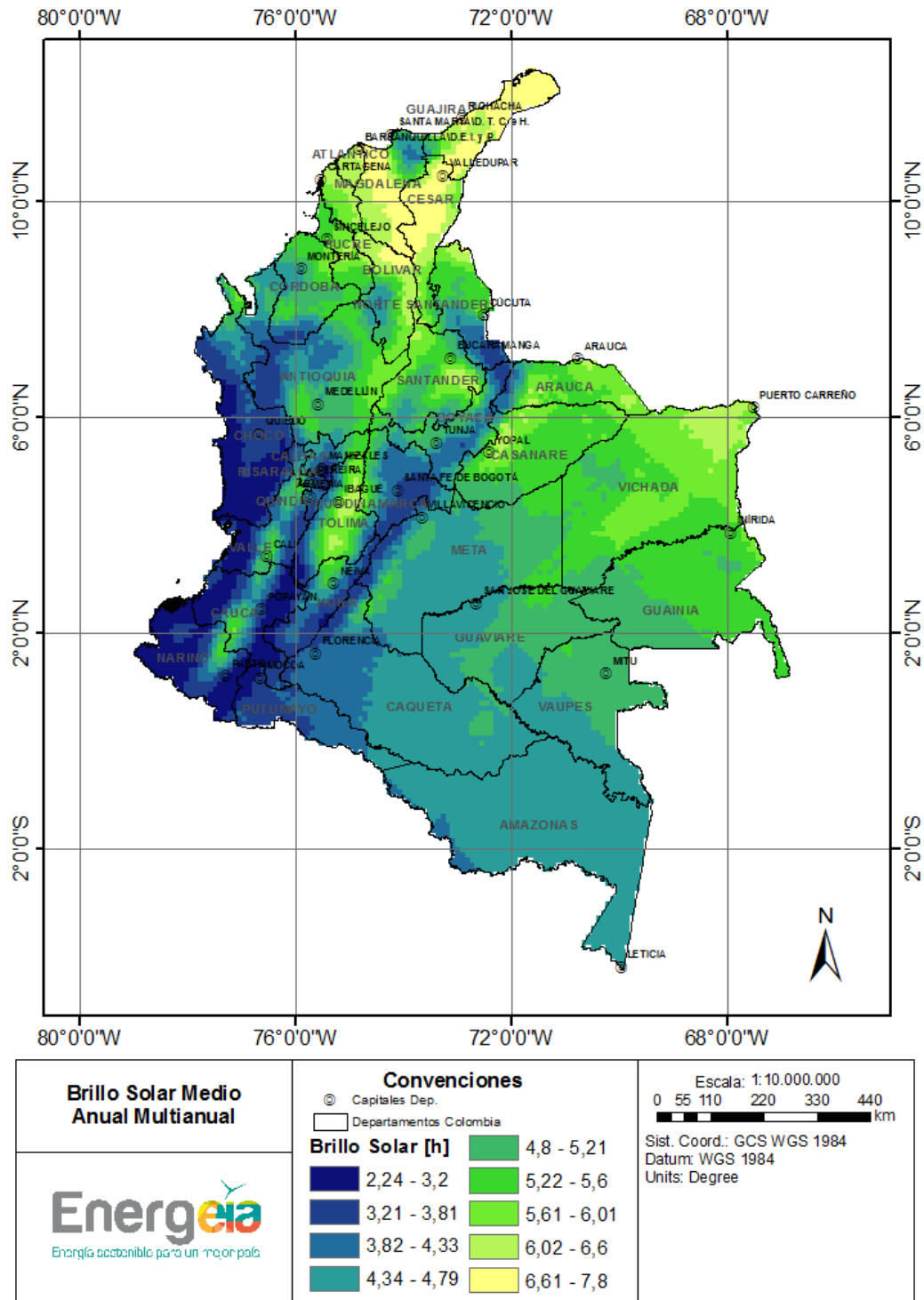


Figura 1.7. Brillo solar medio anual multianual (Karlsson et al., 2013).

Si bien el recurso solar puede ser aprovechado con tecnologías de energía de solar fotovoltaica, su aprovechamiento en calor también permite lograr impactos ambientales y económicos significativos debido a la disminución en el uso de combustibles fósiles y al deterioro de suelos y/o cuerpos de agua a causa de su explotación. En las figuras 1.6 y 1.7 se pueden observar los mapas de irradiación solar y brillo solar, mostrando las zonas en Colombia con mayor potencial para el aprovechamiento del recurso, siendo la parte norte del país, junto con el altiplano de Cundinamarca y Tolima, como las regiones más prometedoras. Cabe resaltar que, para el caso de las tecnologías de energía solar térmica, no solamente aprovechan la radiación directa, sino también la radiación indirecta, permitiendo que este tipo de tecnologías puedan ser implementadas en gran parte del territorio nacional.

1.3.3. DEFINICIÓN DE LA TECNOLOGÍA.

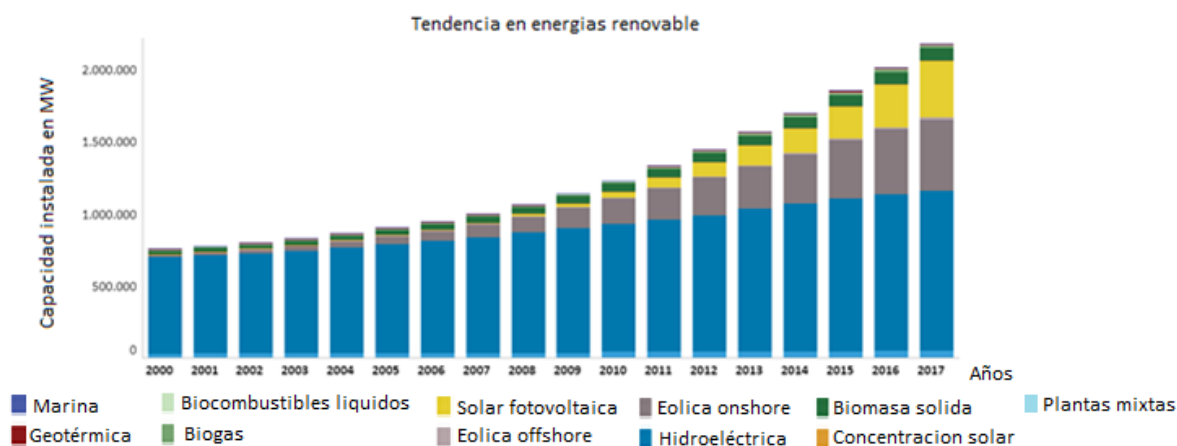


Figura 1.8. Crecimiento de las energías renovables a nivel mundial (“Libro de trabajo: IRENA REsource Renewable Energy Statistics Time Series2,” n.d.).

Existen varias fuentes de energía renovables con las cuales se puede producir energía eléctrica y térmica; como se muestra en la figura 1.8 estas son: marina, geotérmica, biomasa, solar, eólica y pequeñas centrales hidroeléctricas. En particular, las tecnologías de energía solar aprovechan la radiación emitida por el sol que llega al planeta. El aprovechamiento del recurso solar ha crecido en los últimos años gracias a la investigación y al desarrollo nuevas tecnologías, como se aprecia en la figura 1.8.

Existen diversas formas para el aprovechamiento de la energía solar. Los métodos que emplean la radiación solar para la generación de energía eléctrica y térmica están clasificados en dos tipos de tecnologías: sistemas con concentración y sistemas sin concentración de radiación. Entre los sistemas que emplean la concentración solar se encuentran los Colectores Cilindro Parabólicos (CCP), discos Stirling, colectores fresnel lineales, y sistemas de torre solar, también conocidos como sistema de receptor central. Los colectores solares sin concentración pueden aprovechar la radiación solar directa y la difusa. Los Colectores de Placa Plana (CPP) y los paneles fotovoltaicos (PV) son dos tipos de sistemas característicos dentro de esta clasificación, el primero para la generación de energía térmica y el segundo para la generación de energía eléctrica

A continuación, se describen algunas tecnologías de colectores solares con concentración:

- Los colectores solares cilindro parabólico (CCP), funcionan por medio de la concentración solar que es efectuada por una placa reflectora de forma parabólica, la cual concentra la mayor parte de radiación solar incidente sobre un receptor que se encuentra ubicado en el eje focal del concentrador parabólico y el cual puede estar sujeto a un sistema de seguimiento solar. Por el receptor, circula un fluido de trabajo que puede ser agua o nanofluidos con los cuales se obtienen mayores eficiencias térmicas (Abdulhamed, Adam, Zainal, Ab-Kadir, & Hairuddin, 2018). El elemento receptor debe de tener una alta capacidad de absorción y una muy baja emitancia de la radiación solar para tener altos rangos de eficiencia (Abdulhamed et al., 2018). Los CCP tienen diferentes aplicaciones entre los cuales pueden se destacan procesos de desalinización, sistemas de calefacción de aire y de refrigeración, generación de energía eléctrica, entre otros (Abdulhamed et al., 2018).
- El disco Stirling trabaja por medio de la concentración solar que es realizada por un sistema en forma de parábola que concentra la radiación solar en su foco en el cual se encuentra ubicado un motor (Hafez, Soliman, El-Metwally, & Ismail, 2016). El motor Stirling, es un elemento que opera por medio de un ciclo de calor cuyos fluidos de trabajo pueden ser aire, nitrógeno, hidrógeno o helio; entre estos fluidos el más usado es hidrógeno debido a que ha mostrado mejores desempeños frente a otros fluidos de trabajo (Hafez et al., 2016). El diseño y desempeño del disco Stirling se

ve afectado por múltiples factores como el diámetro de concentración de platos parabólicos, los materiales usados en el sistema de reflexión, el área de apertura del concentrador, la distancia focal del plato parabólico, el diámetro del punto focal, las propiedades térmicas del receptor, entre otros (Hafez et al., 2016). La principal aplicación del disco Stirling es la generación de energía eléctrica pero también hay diferentes investigaciones en las cuales se utiliza este sistema para la cocción de alimentos y el calentamiento de agua (Hafez et al., 2016).

- La concentración solar por medio del sistema lineal fresnel tiene un funcionamiento muy similar a los CCP debido a que ambos concentran la radiación solar sobre un tubo o elemento receptor el cual se encuentra ubicado a una distancia focal (Dabiri et al., 2018). El colector lineal fresnel es una tecnología menos madura y de más bajo costo que los CCP, debido a que los reflectores son planos o tiene una pequeña curvatura, lo que abarata sus costos de fabricación. (Dabiri et al., 2018). Además, debido a su estructura física, el mantenimiento de los colectores lineales fresnel es más simple, lo que a su vez, reduce costos de operación con respecto a los CCP (Dabiri et al., 2018). Existen diferentes tipos de diseño para los colectores lineales fresnel, el modelo básico posee un único tubo absorbente, pero hay investigaciones en las cuales se utilizan dos o más tubos mostrando mejores desempeños en el sistema (Dabiri et al., 2018).
- La torre solar en un sistema de concentración solar el cual cuenta con tres elementos fundamentales para su funcionamiento: una torre, un campo de heliostatos compuesto por espejos rectangulares y uno o varios receptores de la radiación (Carrizosa, Domínguez-Bravo, Fern Andez-Cara, & Quero, 2015). La radiación directa que incide sobre el campo de heliostatos es reflejada en los elementos de captación que se encuentran en la parte superior de la torre. Para que la radiación directa incida constantemente sobre los receptores, los heliostatos tienen un mecanismo con dos ejes de movimiento que les permite realizar seguimiento solar (Carrizosa et al., 2015). El fluido de trabajo que circula a través de los elementos receptores es usado en un ciclo termodinámico para la generación de energía eléctrica (Carrizosa et al., 2015).

Por otra parte, las tecnologías que no emplean la concentración solar son:

- La energía solar fotovoltaica aprovecha la radiación solar directa sin usar equipos de concentración (Siecker, Kusakana, & Numbi, 2017). Los equipos fotovoltaicos al recibir la radiación solar la convierten en energía eléctrica, estos equipos presentan muchas ventajas con respecto a otros tipos de energías renovables como la eólica, biomasa, marina entre otras debido a su fácil mantenimiento y sus diversas formas de uso; pero también tiene grandes desventajas ya que si el panel está expuesto en zonas muy húmedas o de alta concentración de polvo la eficiencia disminuirá considerablemente (Siecker et al., 2017). Otro factor que afecta directamente la eficiencia de los sistemas fotovoltaicos es la temperatura. Un aumento de 1°C produce una reducción del 0.5% en la eficiencia del sistema, provocando que solo una pequeña parte de la radiación incidente en el panel sea aprovechada y convertida en energía eléctrica (Siecker et al., 2017).
- Los colectores de placa plana al igual que los paneles fotovoltaicos no tienen ningún tipo de concentración solar, pero a diferencia de estos no convierten la radiación solar incidente en energía eléctrica sino que la aprovecha para el calentamiento de un fluido que circula a través del colector. Los colectores de placa plana tienen altas pérdidas de calor por lo que hay investigaciones que buscan mejorar la eficiencia del concentrador utilizando nanofluidos (Elsheikh, Sharshir, Mostafa, Essa, & Ahmed Ali, 2018), con la integración de materiales transparentes de aislamiento (Osorio et al., 2017) o utilizando reflectores que mejoren el desempeño del colector (Bhowmik & Amin, 2017).

La tecnología que se estudiará en este trabajo de investigación es un colector solar de placa plana (CPP) con la integración de un material transparente de aislamiento (TIM, por sus siglas en inglés) que mejora su eficiencia. Las partes que componen este tipo de colectores son: el *glass envelope*, dos *gaps* de aire, el TIM, absorbedor, fluido de trabajo, material aislante y por último el soporte.

El *glass envelope* es el componente que se encuentra en la parte superior del colector solar de placa plana, sus funciones principales son la de proteger al colector del ambiente y permitir el paso de la radiación solar incidente sobre este; teniendo en cuenta esta última función, el *glass envelope* debe tener una alta transmitancia para permitir el mayor paso de

la radiación solar a los tubos absorbedores y baja emitancia para reducir las pérdidas de radiación térmica emitidas al ambiente por este componente.

Los *gaps* o espaciamientos de aire que se encuentran en este tipo de colector solar son dos: el primero está ubicado entre el TIM y el *glass envelope* y el segundo entre el TIM y el absorbedor. El gap de aire sirve para reducir las pérdidas por convección en el colector, lo que permite alcanzar mayores rangos de temperatura. También existen *gaps* que utilizan vacío en vez de aire para disminuir las pérdidas por convección, sin embargo, este tipo de *gaps* incrementa los costos de fabricación y de mantenimiento del colector debido a que se requiere de sistemas herméticos que conserven el vacío.

Las propiedades del TIM que afectan el rendimiento de un CPP son la emisividad, la cual indica la cantidad de radiación térmica emitida por una superficie debido a su temperatura, la transmitancia, que es el inverso del coeficiente de extinción e indica cuanta radiación solar puede atravesar por una superficie, la conductividad térmica que indican la capacidad de conducción de calor de un material, y por último la reflectividad que indica cuanta radiación solar incidente es reflejada en una superficie. El rango de valores en los que oscilan estas propiedades son:

Tabla 1.1. Propiedades del TIM

Propiedades	Unidades
$K_{TIM} = 0.1 - 5.0$	$\frac{W}{m \cdot K}$
$\mu = 1 - 8$	m^{-1}
$\tau_{TIM} = 0.05 - 0.95$	
$R_{ra} = 4$	%

El absorbedor es el componente que recibe la radiación solar incidente en el colector luego de haber atravesado el *glass envelope*, los *gaps* de aire y el TIM, transmitiendo la energía térmica al fluido de trabajo que circula a través de este. El absorbedor está compuesto por unos tubos soportados o soldados a una placa, la cual se comporta como una aleta mejorando la transferencia de calor hacia los tubos. Tanto la placa como los tubos están fabricados o recubiertos de materiales con alta absorptividad que permita una alta emisión de energía térmica hacia el fluido de trabajo.

El material aislante es el componente que se encuentra ubicado después del absorbedor y su función es la de reducir las pérdidas por conducción de calor que se generan en el colector, principalmente en el absorbedor. Estos materiales pueden ser PCMS, espumas de poliuretano, lana de vidrio, entre otros aislantes. Por último, el soporte del colector es la estructura que permite ensamblar los componentes mencionados anteriormente, otorgándole rigidez al sistema y proteger el colector de los efectos del ambiente.

1.4. ESTADO DEL ARTE.

Existen varios métodos que se han estudiado para mejorar las eficiencias en los sistemas solares térmicos, por ejemplo, los nanofluidos. Estos son sustancias que pueden mejorar la eficiencia de los colectores solares, debido a que poseen partículas sólidas suspendidas que aumentan la conductividad efectiva del fluido, incrementado la transferencia de calor dentro del mismo fluido (Elsheikh et al., 2018). En una investigación reportada por (Elsheikh et al., 2018) se evaluó el desempeño de un CPP utilizando un nanofluido con partículas de Al_2O_3 y variando la fracción másica de nanopartículas, el flujo másico y la presencia de un surfactante. Los resultados de este trabajo muestran que, para una fracción de 0.2% de Al_2O_3 , el desempeño del colector mejoró en un 28.3% y la conductividad térmica del nanofluido aumento en un 6.7%, con respecto al fluido comúnmente utilizado (agua) bajo las mismas condiciones de operación. Otras investigaciones han estudiado el CuO , SiO_2 , TiO_2 y nanos tubos de carbono como nanofluidos obteniendo mejores eficiencias que las obtenidas con fluidos de trabajo convencionales en los colectores de placa plana. Una de esas investigaciones mostró que se obtiene un mejor desempeño del colector para una fracción 0.4% en peso de nano tubos de carbono dispersos en agua que para una fracción del 0.2%, bajo las condiciones de operación (Elsheikh et al., 2018).

Otro estudio realizado para mejorar la eficiencia del CPP, fue la implementación de una placa absorbidora perforada ubicada después de la cubierta del vidrio superior del colector (Chan, Vinson, Baljit, & Ruslan, 2018). Al realizar el estudio, se comparó la eficiencia de un colector de placa plana convencional con uno de placa perforada bajo las mismas condiciones de operación. Los resultados mostraron que la eficiencia del colector de placa perforada fue del 59% y para el de placa plana convencional del 36%, con una radiación de $846 W/m^2$ y un flujo másico de $0.02 kg/s$ (Chan et al., 2018). De otro lado, una aplicación interesante que se ha desarrollo en los últimos años es la de sistemas híbridos fotovoltaico-

térmico. Este tipo de tecnología está compuesto por un sistema de paneles fotovoltaicos adheridos a una placa con canales por los que circula un fluido. Esta placa funciona como un sistema de refrigeración para mantener baja la temperatura en los paneles solares, incrementado su eficiencia y adicionalmente, la energía térmica almacenada en el fluido de trabajo puede ser utilizada en otras aplicaciones, como por ejemplo calentamiento de agua sanitaria (Aste, Del Pero, & Leonforte, 2014)

Otra alternativa que se ha estudiado para mejorar la eficiencia del colector solar de placa plana es por medio del uso de reflectores de vidrio acoplados a la parte lateral del colector, con la posibilidad de cambiar de posición para que la radiación solar que incidente en ellos se refleje hacia el CPP (Bhowmik & Amin, 2017). El uso de estos reflectores permitió incrementar en un 10% la eficiencia de CPP convencional (Bhowmik & Amin, 2017).

Una nueva opción que ha tomado interés en recientes investigaciones para incrementar la eficiencia de CPP, es la integración de los TIMs a estos sistemas (Osorio et al., 2017). Las características más destacadas de los TIM, que los hace interesantes en investigación para CPP, es que son transparentes a la radiación solar visible e infrarrojo cercano y se comportan como un material aislante para la conducción, la convección y la re-radiación en longitudes de onda en el infrarrojo lejano (Saxena & El-Sebaei, 2015). Se han reportado en (Hirasawa, Tsubota, Kawanami, & Shirai, 2013) (Hellstrom, Adsten, Nostell, Karlsson, & Wackelgard, 2003) incrementos en la eficiencia de los colectores entre 7% y 12% con la integración de TIM. Estos materiales también han sido integrados en colectores parabólicos y de receptor central para mejorar su eficiencia (Osorio et al., 2017). Otro de los usos interesantes de los TIM es como materiales en arquitectura bioclimática y viviendas sostenibles. Con su incorporación en edificaciones se logra confort térmico y lumínico de espacios aprovechando la radiación solar y sin un gasto excesivo de energía externa (Sun, Wilson, & Wu, 2018). La integración de TIM en sistemas de colectores solares parabólicos y colectores de receptor central permiten alcanzar mayores eficiencias a altas temperaturas, en comparación a las alcanzadas en los sistemas convencionales bajo las mismas condiciones. Este comportamiento se debe a que los TIM reducen las pérdidas de calor aun cuando las temperaturas son elevadas, mientras que para los sistemas que no tienen integrados estos materiales, las pérdidas de calor se incrementan a altas temperaturas y por ende, disminuye su eficiencia térmica (Osorio et al., 2017). Desde comienzos de los años 60 se produjo la integración de los TIM en colectores solares con estructura de panel

para reducir o suprimir las pérdidas de calor por convección. Lo anterior conllevaría al surgimiento de nuevas y diferentes investigaciones sobre la integración de paneles de vidrio o plástico en CPP (Sun et al., 2018).

1.5. OBJETIVOS.

1.5.1. OBJETIVO GENERAL.

Diseñar un colector solar de placa plana con la integración de materiales transparentes de aislamiento.

1.5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Aplicar una metodología que permita la concepción de varias alternativas de diseño y seleccionar la mejor.
- Desarrollar un modelo matemático simplificado que permita el estudio de las variables que intervienen en el desempeño del colector.
- Implementar y simular diferentes condiciones de operación para evaluar el efecto de las propiedades en el desempeño del colector.

1.6 METODOLOGÍA.

- **Primer mes**
 - ✓ Revisión de la literatura especializada en todos los temas referentes al proyecto.
- **Segundo mes**
 - ✓ Revisión de la literatura especializada en todos los temas referentes al proyecto.
 - ✓ Diseño conceptual del colector solar de placa plana.
- **Tercer mes**
 - ✓ Evaluación de las alternativas de diseño del colector solar de placa plana.
- **Cuarto mes**
 - ✓ Discusión de resultados.
 - ✓ Entrega del Trabajo de Grados.
 - ✓ Sustentación del Trabajo de Grados.

2. DISEÑO PRELIMINAR DE DETALLE.

2.1. LISTA DE REQUERIMIENTOS.

Cualquier elemento que se requiera diseñar, trae consigo unos límites, que pueden afectar el rendimiento del dispositivo, por tanto, la lista de requerimientos ayuda a definir el problema de diseño, dejando espacio para que el diseñador desarrolle una idea que sea satisfactoria y que cumpla con aquellos límites que el elemento tiene; estos límites pueden establecer un rango de libertad para el diseñador, es decir, entre más generales sean los requerimientos, el diseñador tendrá más libertad de desarrollar la solución, por el contrario, si los requerimientos son muy específicos, quiere decir que el diseñador no tendrá la suficiente libertad, pero que su diseño deberá regirse por aquellos requerimientos que se le presentaron. Los requerimientos pueden ser obligatorios o deseos, en el caso de que sean una obligación, quiere decir que la solución debe cumplir plenamente con estos atributos, pues afecta el funcionamiento, sin embargo, en el caso de que sean un deseo, el incumplimiento de alguno de estos atributos no afectan directamente la funcionalidad del diseño y generalmente los atributos son propuestos por el cliente (Nigel Cross, 2000).

Para la elaboración de esta lista de requerimientos, se definió un grado de generalidad medio, con base a las necesidades que se requiere para la elaboración del colector solar. Dentro de todos los requerimientos que se clasifican como obligación, se busca cumplir que el colector sea modular, portable, económico, para que las personas puedan acceder a él, y que implementen el TIM para la reducción de pérdidas por calor; y además de esto, garantizar un buen rendimiento del colector. Dentro de los requerimientos que son deseo, se buscan que las personas que use el colector lo hagan de manera fácil, y por medio de esto se incentive su uso.

Tabla 2.1. Lista de requerimientos.

Tipo	Obligatorio (O) o Deseo (D)	Requerimiento
General	D	Temperatura de operación mayor a 50°C
	D	Materiales económicos y comerciales
	O	Costo de manufactura inferior a 8.000.000 COP
	D	Buena apariencia
	D	Buen acabado superficial
	D	Que no requiera uso de otra fuente de energía diferente a la solar
	O	Alta absortividad de la radiación solar
	O	Seguro para su manipulación y transporte (Sin puntas o aristas agudas)
	O	Amigable con el medio ambiente
	O	Materiales resistentes a la corrosión
	O	Montaje y desmontaje de manera fácil
	O	Materiales que soporten altas temperaturas (hasta 150°C)
General	O	Costo asequible
	D	Vida útil mayor a 10 años
Operación	O	Fluido de trabajo: agua
	O	Instrumentación - Temperatura, presión, flujo volumétrico
	D	Soporte que permita graduación de la inclinación
	D	Tanque de almacenamiento aislado
	O	Fácil acople al suministro de agua residencial
	D	Adaptable a diferentes superficies (techos, suelo)
	O	Sistema de adquisición de variables
	D	Capacidad de autorregulación del flujo en función de la temperatura
	D	Operación a flujos máxicos variables
	D	Silencioso durante la operación
	O	Bajo consumo en la bomba de flujo
	D	Funcionamiento con bomba de flujo o termosifón
	D	Inicio de operación de dispositivo a distancia
Configuración	O	Integración de Materiales de Aislamiento TIM
	O	Sistema modular - banco de pruebas
	O	Sistema portable
	D	Flexibilidad de operar con o sin almacenamiento

Tabla 2.1.1. Continuación lista de requerimientos.

	D	Almacenamiento híbrido agua y materiales que cambian de fase
	D	Varias configuraciones de absorbedores
	D	Mínimo número de componentes: 5
	O	Material de la cubierta protectora - vidrio
	O	Material de los tubos absorbedores - buen conductor térmico (cobre o aluminio)
Dimensional	O	Longitud del colector entre 20cm - 60cm
	O	Altura del colector entre 20cm - 60cm
	O	Peso del colector entre 5 - 15 Kg
	O	Sistema compacto
Mantenimiento	O	Mantenimiento fácil y reparación simple
	D	Fácil cambio de componentes estructurales
	D	Fácil acceso para la limpieza de componentes

2.2. ÁRBOL DE OBJETIVOS

El árbol de objetivos se realiza con el fin de aclarar los objetivos del diseño en un orden jerárquico, resolviendo preguntas de cómo y por qué, así, cada que se desciende en jerarquía resuelve la pregunta del cómo, por el contrario, si asciende el orden, se resuelve el por qué. El árbol también se construye para establecer las relaciones entre los objetivos (Nigel Cross, 2000).

Así pues, el objetivo principal es el diseño de un colector solar de placa plana portable con la integración de materiales transparentes de aislamiento, que se pretende desarrollar con tres subobjetivos, los cuales hacen referencia al diseño conceptual del colector y no, a el desarrollo de este documento. El primero de ellos es lograr una mayor eficiencia, reduciendo pérdidas de calor, con una adecuada ubicación y alta captura de la radiación. Las bajas perdidas de calor se logran con la baja conducción de la carcasa, es decir, que sea un buen aislante, también por medio de una menor convección en el gap de aire del colector y disminución de la re-radiación por medio del uso del TIM. La adecuada ubicación se logra con la facilidad en la inclinación de la base; y la alta captura de la radiación, aumentando la absorptividad, que en este caso se pretende realizar con pintura oscura, y con la manipulación de parámetros de operación sobre los cuales se pueda ejercer control. El segundo subobjetivo es la seguridad en la operación, en el transporte y en el mantenimiento. La seguridad en la operación incluye que el colector sea amigable con el

medio ambiente, lo que se garantiza con el uso de la energía solar. En el caso de la operación y mantenimiento, se busca que los usuarios directos del colector y las demás personas estén seguras con la manipulación del mismo, es decir que no debe tener aristas agudas y que el colector tenga un vidrio protector; por último, en el mantenimiento debe ser de fácil montaje y desmontaje, por lo que debe tener un manual de usuarios y sujeciones desmontables. El tercer subobjetivo es que el colector debe ser económico. Se identificó que debe serlo en su operación, construcción y mantenimiento, cumpliendo este último con la misma descripción que se describieron en seguridad. En la operación debe ser económico en el consumo de electricidad, que podría ser causa del uso de una bomba y también en el tiempo que dure el colector solar en óptimas condiciones, pues entre más larga sea su vida útil, es menor la inversión, lo que se logra por medio de la rigidez del sistema y de la calidad en los materiales que estarán expuestos a la intemperie. Finalmente, la economía también se logra en la construcción, con el diseño simple y la mano de obra local. El diseño simple se obtiene construyendo un colector que sea portable y modular con materiales comerciales y a su vez con la fácil implementación del sistema, pues debe ser conectado al suministro de agua del lugar donde se desea utilizar, por tanto, es esencial que el acople al suministro de agua sea fácil.

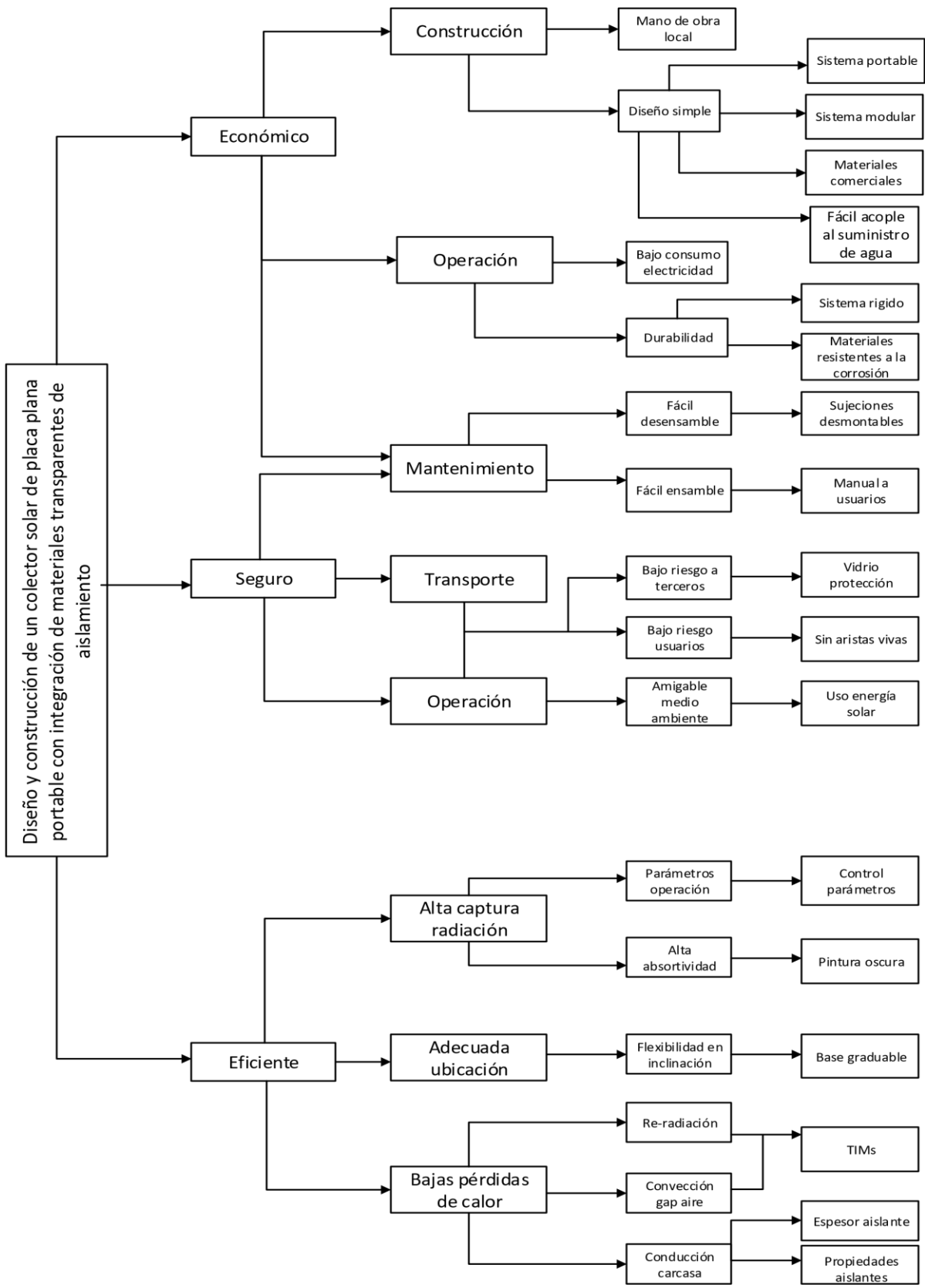


Figura 2.1. Árbol de objetivos.

2.3. CAJA NEGRA

Caja negra:

La caja negra es un método con el cual se puede revelar la función general deseada en un producto por medio de entradas y salidas. El punto de salida que se debe tener en cuenta con este método, es pensar en los resultados que se desean obtener por medio de un nuevo diseño. La caja negra comprende todas las funciones con las cuales se pueden transformar las entradas en salidas; lo ideal es poder generar una entrada lo más amplia posible, ya que esto puede generar una mayor gama de posibilidades para el nuevo diseño, algo que no podría ser posible teniendo una cantidad limitada de entradas (Nigel Cross, 2000).

En la caja negra realizada para el diseño del colector portable, las entradas que se tuvieron en cuenta fueron la radiación solar, agua fría y señales, las cuales generan a la salida pérdidas por calor, agua caliente y señales, todo esto por medio de unas sub-funciones las cuales son explicadas en la caja transparente.

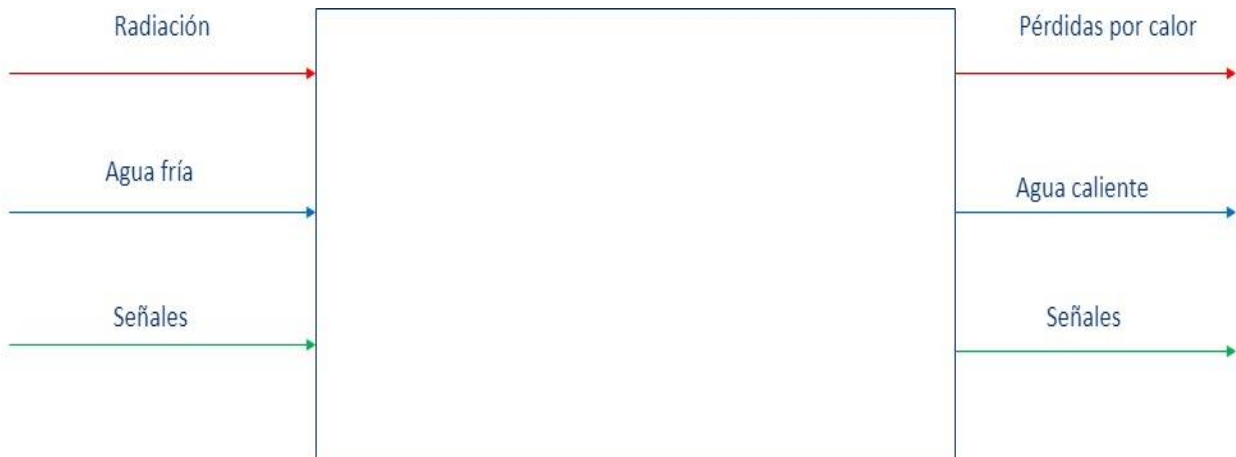


Figura 2.2. Caja negra.

2.4. CAJA TRANSPARENTE

La caja transparente es el sistema por el cual se da la unión entre el conjunto de entradas y salidas de un proceso; con la caja transparente se pueden representar las sub-funciones o sub-tareas que permitirán la unión de dichas entradas y salidas. El estudio de estas sub-funciones puede estar relacionado de elementos tales como, los tipos de materiales para algunas funciones específicas, las asignaciones de funciones a las maquinas o equipos que van a realizar dichos procesos, la destreza del diseñador, entre otros elementos los cuales permitan tener un mejor diseño y sub-funciones del producto. En la caja transparente cada sub-función debe de tener una entrada y salida las cuales deben tener una correlación entre ellas, y también se pueden tener sub-funciones de apoyo las cuales no tienen una contribución directa en el proceso (Nigel Cross, 2000).

La caja transparente realizada para el colector de placa plana, tiene en cuenta como entradas la radiación solar, agua fría y señales, y las salidas de dicha caja son señales, perdidas por calor y agua caliente. En el interior de la caja transparente se tienen 7 sub-funciones en total; la primera sub-función es la reducción de pérdidas de calor, permitir el paso de la radiación solar y proteger el sistema del ambiente, la segunda sub-función es aislar al sistema para reducir las pérdidas por convección, la tercera es la reducción de pérdidas por calor debido a la re-radiación y convección, la cuarta al igual que la tercera es aislar el sistema permitiendo la reducción de pérdidas por convección, la quinta es la transformación y transferencia de radiación solar al fluido de trabajo, la sexta es aislar al sistema permitiendo la reducción de pérdidas de calor que se produce por conducción y por último se tiene el soporte y la protección del sistema. Las uniones dentro de la caja transparente (ver figura 2.3), indican la conexión entre sub-funciones, y la dirección en la que actúa cada una de ellas.

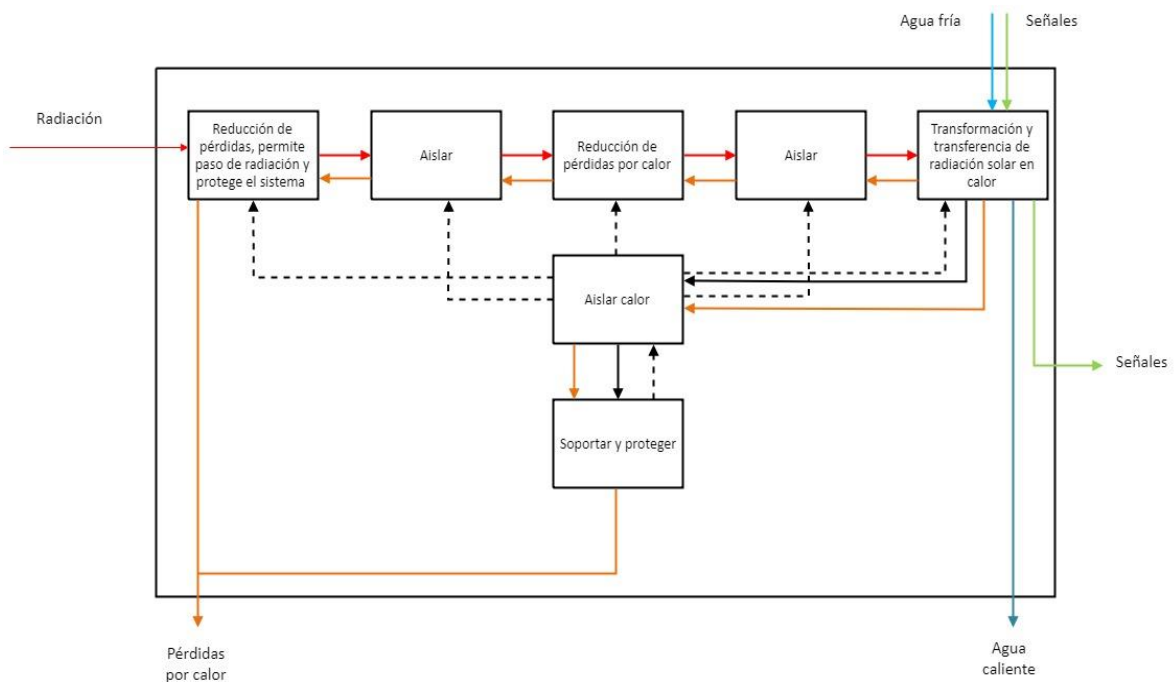


Figura 2.3. Caja transparente.

2.5. CASA DE LA CALIDAD

El método de “Despliegue de la Función de Calidad”, creado por japoneses tiene como filosofía escuchar la voz del cliente, dado que, el éxito de un producto se determina por la persona que lo va a comprar, puesto que, si dicho producto no es comprado en el mercado, por más que cumpla con todos los requerimientos de ingeniería, éste será un fracaso comercial. Sin embargo, no se debe dejar de lado las características ingenieriles que debe cumplir todo diseño, por tanto, el objetivo de este método es realizar un diseño que cumpla con los objetivos de ingeniería y que a su vez satisfaga los requisitos del cliente, evitando conflictos en el proceso de un producto (Nigel Cross, 2000).

Para implementar este método primero se debe identificar cuáles son los requisitos del cliente, para expresarlos como atributos; e identificar cuáles son las características de ingeniería (Nigel Cross, 2000).

Para el caso del colector solar portable con la integración de materiales transparentes de aislamiento se identificamos los siguientes requisitos de los clientes:

- Portable y modular
- Bajo costo de adquisición
- Fácil mantenimiento
- Buen acabado superficial
- Fácil instalación y desinstalación
- Adaptable a cualquier superficie
- Silencioso durante su operación
- Capacidad de calentar agua
- Larga vida útil
- Bajo peso
- No requerir supervisión
- No requerir mucho espacio
- Fácil transporte
- Buen aspecto en general

Los atributos de ingeniería que debe cumplir el colector son:

- Fácil acople al suministro de agua
- Sistema rígido
- Materiales resistentes a la corrosión
- Seguro en la operación y transporte
- Alta absorción de la radiación solar
- Materiales resistentes y buen acabado superficial
- Bajas pérdidas de calor
- Uso de materiales comerciales
- Diseño modular
- Sistema de sujeción y posicionamiento
- Colector portable y compacto
- Sistema instrumentado

Después de identificar las características tanto del cliente como de ingeniería, se determina la importancia relativa de cada una de ellas, pues algunos atributos son más importantes que otros, es decir, en el caso del colector, es más importante que su costo de adquisición

sea bajo, a que sea silencioso durante la operación; por tanto, se estableció que aquellos atributos que sean más importante, tendrían un valor de 5, los menos importantes de 1; entonces para el cliente se concluyó que es más importante que el colector sea portable y modular, que tenga bajo costo de adquisición, que el colector tenga la capacidad de calentar agua y que tenga larga vida útil, todos con un peso relativo de 5; siguen en el orden de importancia, con un peso de 4, que tenga buen acabado superficial, y que tenga buen aspecto todo el colector en conjunto; con el valor 3, el fácil mantenimiento, que sea fácil la instalación y la desinstalación, el bajo peso, el fácil transporte, y por último la capacidad de cambiar de inclinación; los menos importantes con un peso de 2, no requerir supervisión ni mucho espacio; finalmente los atributos que tienen menos importancia, adaptable a cualquier superficie y que sea silencioso durante la operación. Lo anterior se hizo para evaluar las características del cliente, pero en el caso de los atributos de ingeniería se realiza una matriz donde se compara con ellos mismos, identificando si existe una relación o no entre ellos.

Para evaluar la relación entre los atributos del cliente con los atributos ingenieriles se les asignó un peso relativo de 5 si la relación es muy fuerte, un 3 si es medio, y 1 si es débil, todos de forma simbólica, como se muestra en la Figura 2.4. Esta relación se describe en una matriz, donde las columnas son los atributos de ingeniería, y las filas los del cliente. Cuantificar esta relación servirá posteriormente para identificar cuales atributos son los importantes para el diseño del colector, y verificar si lo que se está desarrollando cumple con los objetivos de diseño. Finalmente, para calcular el peso total por atributo, se calcula una sumatoria de pesos relativos, multiplicando el peso individual del atributo del cliente, por el peso relativo que se le asigno en la relación de ingeniería-cliente, y al final se realiza la sumatoria. Para el caso del colector, se identificó que el atributo que más peso tiene es que el colector sea portable y modular, seguido de la alta absorción de la radiación solar, lo que es coherente, pues quiere decir, que el diseño del colector cumple con los objetivos que se habían establecido anteriormente.

Adicionalmente, para realizar un buen análisis de diseño, la metodología de Despliegue de la Función de la Calidad permite comparar el producto con la competencia, por tanto, para el colector de placa plana portable con la integración del TIM, se comparó cada uno de los atributos con colectores de placa plana, y de tubos de vacío; en el caso de los atributos del cliente, se les asignó un peso relativo de 1 a 5. Así mismo en la casa de la calidad se aprecia

dicha comparación en la evaluación técnica, que se representa en una gráfica lineal, en el eje vertical se encuentra una escala de 1 al 5, donde 1 es muy deficiente y 5 muy bueno, y en la horizontal los atributos de ingeniería. La gráfica de color verde describe el colector con la integración del TIM, el azul el colector de placa plana, y el rojo el colector de tubos de vacío. Como se puede observar en la Figura 2.4, el colector con la integración del TIM es el que mejor satisface todos los requerimientos, teniendo solo 4 de ellos que se perciben como buenos, los cuales son, el fácil acople al suministro de agua; uso de materiales comerciales, dado que el TIM es un vidrio que debe cumplir unas características específicas y no es fácil encontrarlo en el mercado; sistema de sujeción y posicionamiento; y sistema instrumentado.

En el caso del colector de placa plana comercial, el atributo que tiene menor calificación es el de diseño modular, y en el caso del colector de tubos de vacío es de portable y modular, donde se debe tener en cuenta que estas dos especificaciones hacen parte de los objetivos del desarrollo del colector a diseñar. Otro de los puntos importantes para comparar, es la alta absorptividad de la radiación solar, donde se observa que el colector de placa plana es menos eficiente con respecto al de tubos de vacío, sin embargo, para el caso del colector con TIM, es muy bueno, al igual que en el aspecto de bajas pérdidas de calor, lo que se traduce en eficiencia, que permite concluir que el colector con integración de materiales transparentes de aislamiento es más eficiente que la competencia directa.

En conclusión, el análisis de la casa de la calidad permite decir que el diseño que se desea desarrollar cumple con todos los objetivos planteados inicialmente, y además de eso, es un producto que puede ser exitoso en el mercado, pues todos los requerimientos que tiene el cliente para adquirir un colector solar para calentamiento de agua residencial, fueron estudiados y analizados, dado que, como ya se dijo anteriormente, de esos requisitos, los más importantes para el cliente fueron los que más peso tuvieron a la hora de cuantificar las especificaciones ingenieriles. Por último, otro aspecto a tener en cuenta es que el colector con la integración de materiales transparentes de aislamiento TIMs, en la mayoría de los atributos estudiados es mejor que los colectores comerciales, los cuales son su competencia.

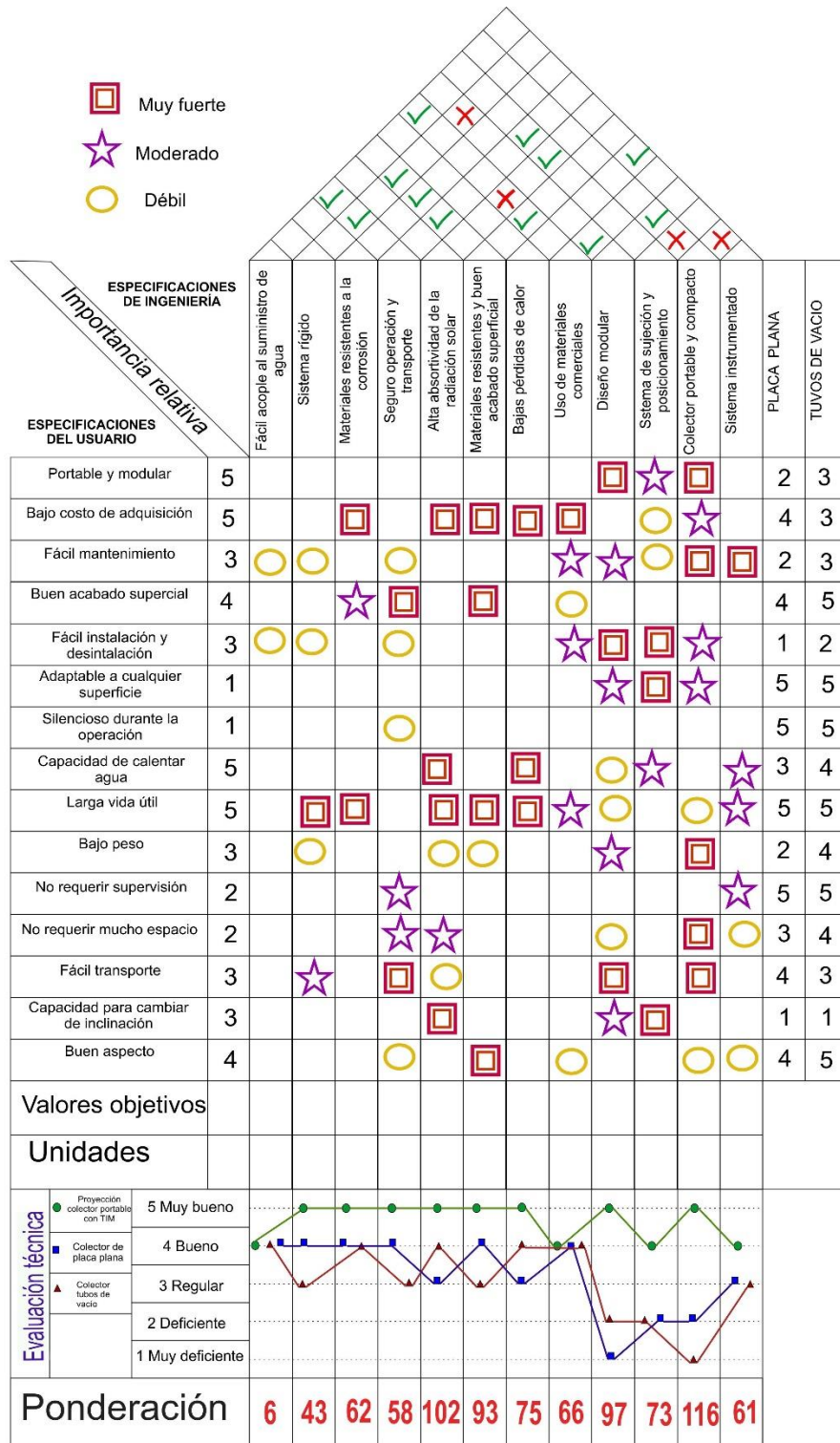


Figura 2.4. Casa de la calidad.

2.6. DIAGRAMA MORFOLOGICO.

El diagrama morfológico es un esquema que ayuda a visualizar posibles alternativas de solución de un producto, estas se construyen identificando diferentes componentes o configuraciones para una función, estas funciones son divididas en sub-funciones, dado que, para una sola función pueden existir diferentes componentes esenciales, por tanto, es clave definir de manera específica todas las funciones y sub-funciones, para que en el diseño no omita ningún elemento. El diagrama morfológico es importante construirlo, pues para un mismo producto existen diferentes alternativas de diseño, que deben ser evaluadas dependiendo de los objetivos planteados para el mismo, y de los requerimientos que tenga el cliente para el desarrollo de su producto (Nigel Cross, 2000). El diagrama morfológico para el colector solar se construyó con ayuda de la caja transparente (Figura 2.3.), en esta se encuentran todas las funciones que debe cumplirse, las cuales son: protección a oxidación, aislamiento convección y re-radiación, absorción, aislamiento de conducción, soporte interior y por último soporte y control; para facilitar de las alternativas de componentes o configuraciones fue necesario dividir las funciones en sub-funciones como se observa en el diagrama. Finalmente se definieron cinco alternativas de solución, estas alternativas se observan en la Tabla 2.2., cada una de ellas se propuso con el fin de que todas cumplan con los objetivos, sin embargo, más adelante en la evaluación, se encontrará cual es la mejor, dependiendo de los materiales, configuraciones y componentes elegidos.

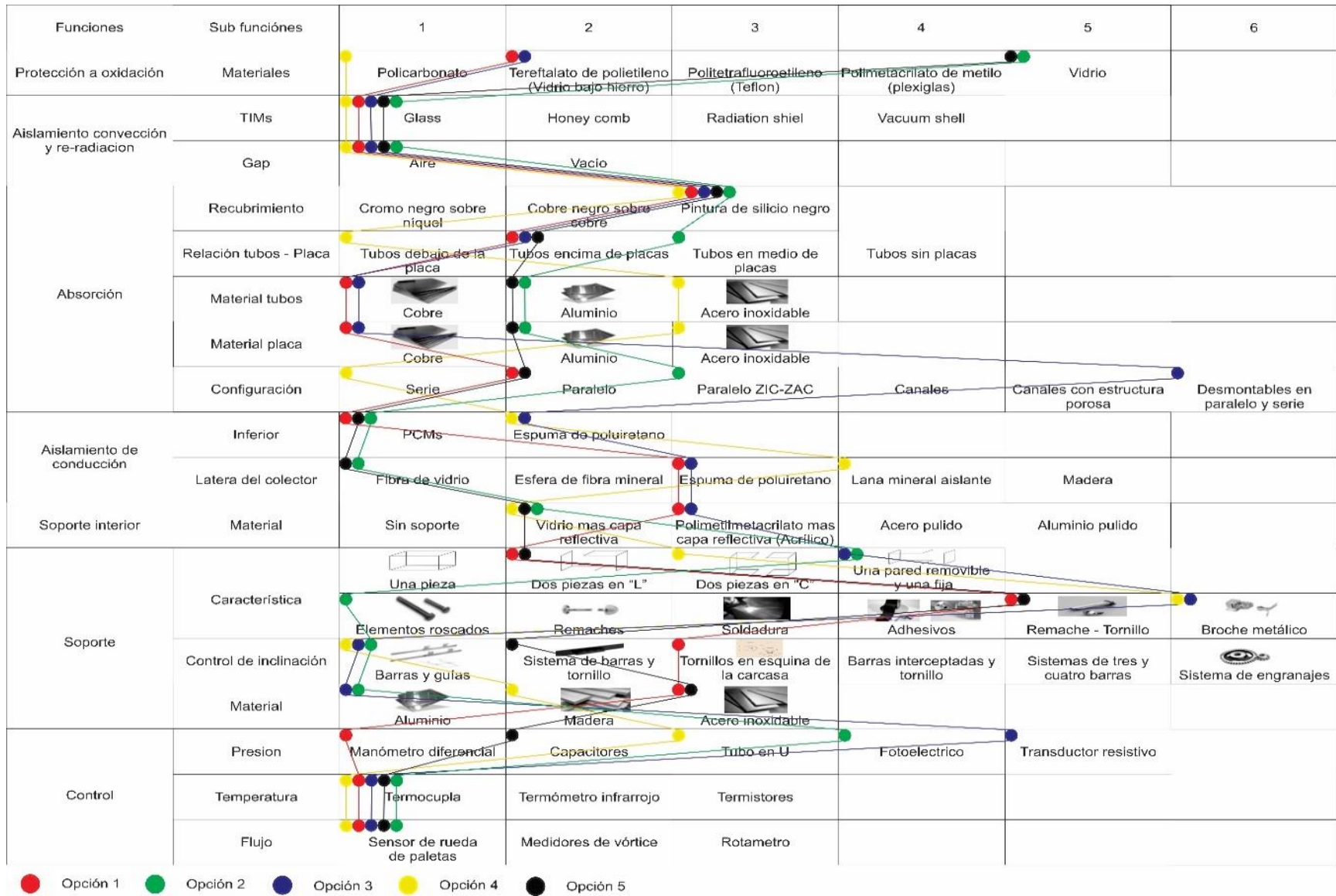


Figura 2.5. Diagrama morfológico.

Tabla 2.2. Cuadro morfológico.

Función	Subfunción	Opción 1	Opción 2	Opción 3	Opción 4	Opción 5
Protección a oxidación	Materiales	Tereftalato de Polietileno (vidrio bajo en hierro)	Vidrio	Tereftalato de Polietileno (vidrio bajo en hierro)	Policarbonato	Vidrio
Aislamiento de convección y re-radiación	Gap	Aire	Aire	Aire	Aire	Aire
	TIMs	Glass	Glass	Glass	Glass	Glass
Absorción	Recubrimiento	Pintura de silicio negro	Pintura de silicio negro	Pintura de silicio negro	Pintura de silicio negro	Pintura de silicio negro
	Relación tubos-placa	Tubos encima de placa	Tubos en medio de placa	Tubos encima de placa	Tubos debajo de placa	Tubos encima de placa
	Material tubos	Cobre	Aluminio	Cobre	Acero inoxidable	Aluminio
	Material placa	Cobre	Aluminio	Cobre	Acero inoxidable	Aluminio
	Configuración	Paralelo	Paralelo ZIC-ZAC	Desmontable en paralelo y serie	Serie	Paralelo
Aislamiento de conducción	Inferior	PCMs	PCMs	Espuma de poliuretano	Espuma de poliuretano	PCMs
	Lateral del colector	Espuma de poliuretano	Fibra de vidrio	Espuma de poliuretano	Lana mineral aislante	Fibra de vidrio
Soporte inferior	Material	Polimetilmetacrilato mas capa reflectiva (Acrílico)	Vidrio más capa reflectiva	Polimetilmetacrilato mas capa reflectiva (Acrílico)	Vidrio más capa reflectiva	Vidrio más capa reflectiva
Soporte	Característica	Dos piezas en "L"	Una pared removible y una fija	Una pared removible y una fija	Dos piezas en "C"	Dos piezas en "L"
		Remache-Tornillo	Elementos roscados	Broche metálico	Broche metálico	Remache-tornillo
	Control de inclinación	Tornillos en la esquina de la carcasa	Barras y guías	Barras y guías	Barras y guías	Sistema de barras y tornillo
	Material	Acero inoxidable	Aluminio	Acero inoxidable	Madera	Acero inoxidable
Control	Presión	Manómetro diferencial	Fotoeléctrico	Transductor resistivo	Tubo en "U"	Capacitores
	Temperatura	Termocupla	Termocupla	Termocupla	Termocupla	Termocupla
	Flujo	Sensor de rueda de paletas	Sensor de rueda de paletas	Sensor de rueda de paletas	Sensor de rueda de paletas	Sensor de rueda de paletas

La tabla 2.3 especifica las propiedades de los materiales aislantes utilizados como opciones para las alternativas de solución del diseño del colector. Dado a que la conductividad térmica es cercana entre cada uno, se eligió la espuma de poliuretano debido a su baja densidad y bajo costo de adquisición.

Tabla 2.3. Características de materiales aislantes

Propiedades de los materiales del aislante lateral del colector			
Materiales	Conductividad térmica [W/m*K]	Calor específico [J/Kg*K]	Densidad [Kg/m ³]
Fibra de vidrio	0.04 ("Aislamiento Térmico Erica," n.d.)	795 ("Aislamiento Térmico Erica," n.d.)	220 ("Aislamiento Térmico Erica," n.d.)
Madera	0.04 ("Aislamiento Térmico Erica," n.d.)	1381 ("Aislamiento Térmico Erica," n.d.)	840 ("Aislamiento Térmico Erica," n.d.)
Espuma de poliuretano	0.029 ("Aislamiento Térmico Erica," n.d.)	1674 ("Aislamiento Térmico Erica," n.d.)	40 ("Aislamiento Térmico Erica," n.d.)
Lana de roca	0.036 ("AISLAN AISLANTE TÉRMICO/ABSORBENTE ACÚSTICO," n.d.)	800 ("AISLAN AISLANTE TÉRMICO/ABSORBENTE ACÚSTICO," n.d.)	60 ("AISLAN AISLANTE TÉRMICO/ABSORBENTE ACÚSTICO," n.d.)

2.7. ASIGNACIÓN DE PESOS RELATIVOS A LOS OBJETIVOS.

La asignación de pesos relativos a los objetivos se realizó con el fin de evaluar las alternativas de diseño obtenidas del diagrama morfológico, puesto que, todas las opciones se evalúan dependiendo de los objetivos establecidos para el producto (Figura 2.1.). Para la realización de este árbol, se tuvo en cuenta la casa de la calidad (Figura 2.4.), puesto que, dependiendo de las necesidades del cliente, y de las exigencias ingenieriles, se puede establecer el orden de importancia de los objetivos. Finalmente, después de calcular el peso relativo y específico para cada uno, se calcula los pesos de los objetivos de la última rama jerárquica del árbol (Figura 2.1.), los cuales son los que servirán para realizar la evaluación de alternativas de cada opción.

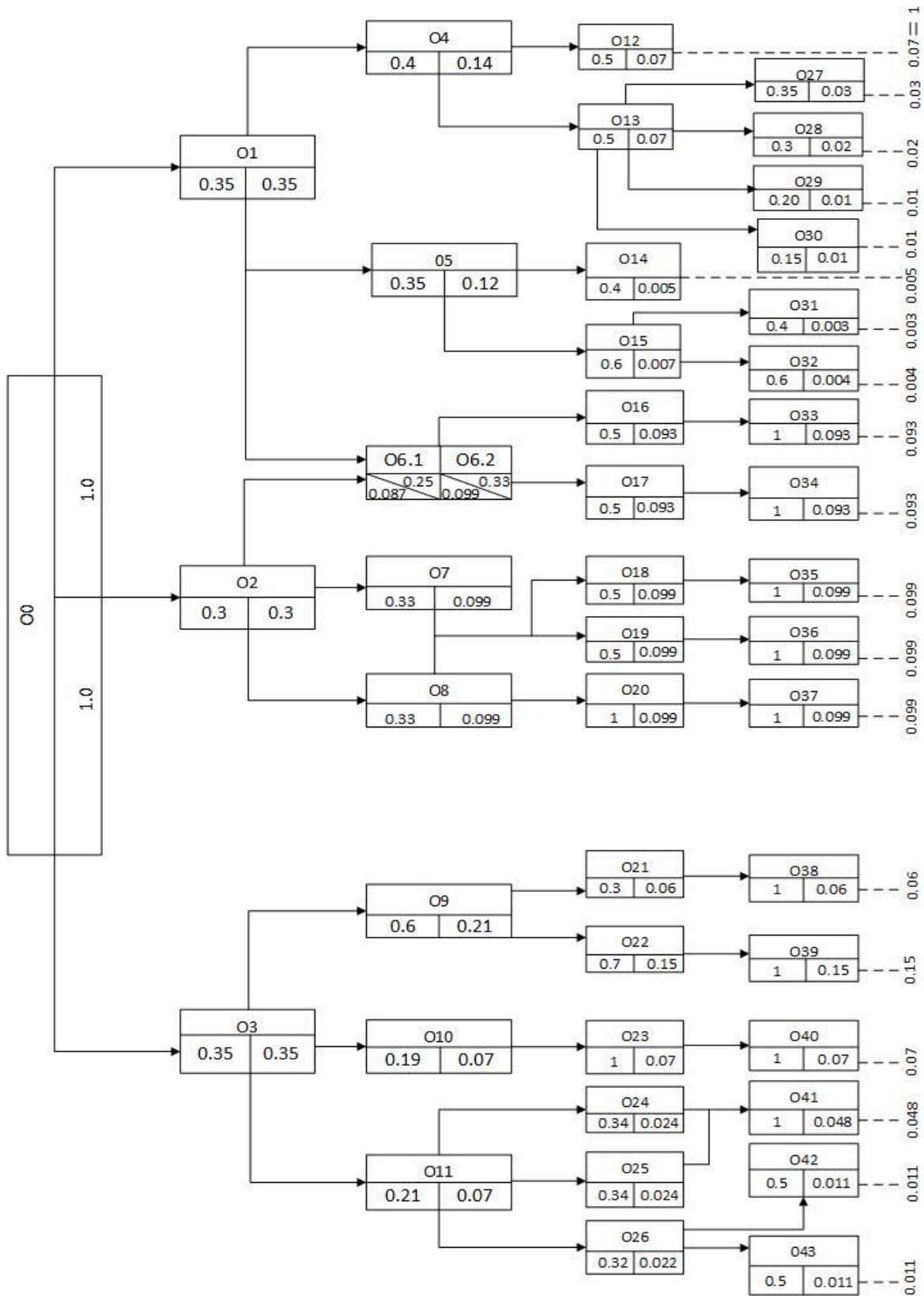


Figura 2.6. Asignación de pesos relativo a los objetivos.

2.8. EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS

Después de construir el diagrama morfológico, se procede a evaluar las posibles alternativas de solución, con el fin de identificar cual es la opción viable para el diseño del producto. En este caso, las alternativas se evaluaron realizando un análisis cuantitativo, donde se calculaban el peso relativo para cada opción, para lo que se utilizó la casa de la calidad, pues con esta se podía ver que componentes o configuraciones cumplía mejor con los requerimientos del cliente y a su vez con los de ingeniería; y también con la ayuda del árbol de objetivos para establecer que cada alternativa cumplía con los objetivos del colector, económico, seguro y eficiente. Sin embargo, la evaluación de alternativas se desarrolla con la ayuda de la asignación de pesos relativos a los objetivos de la última rama jerárquica, y de la asignación de pesos relativos a cada una de las opciones, dependiendo de cuál de ellas satisface mejor dichos objetivos, para después realizar una sumatoria de los pesos por opción y determinar cuál de las opciones tuvo mejor puntaje. Para este caso, la mejor opción para el diseño del colector es la opción 3, con un puntaje de 8.605, seguida por la opción 2 de 8.294; la composición de estas opciones se observa en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4. Evaluación de alternativas.

			Opción1		Opción2		Opción3		Opción4		Opción5	
Criterio		W	S	U	S	U	S	U	S	U	S	U
Económico	Mano de obra local	0.07	6	0.42	6	0.42	6	0.42	6	0.42	6	0.42
	Sistema portable	0.03	6	0.18	8	0.24	6	0.18	8	0.24	7	0.21
	Sistema modular	0.02	5	0.1	7	0.14	9	0.18	4	0.08	6	0.12
	Materiales comerciales	0.01	7	0.07	7	0.07	8	0.08	6	0.06	7	0.07
	Fácil acople al suministro de agua	0.01	8	0.08	8	0.08	8	0.08	8	0.08	8	0.08
	Bajo consumo de electricidad	0.005	7	0.035	7	0.035	7	0.035	7	0.035	7	0.035
	Sistema rígido	0.003	8	0.024	5	0.015	8	0.024	3	0.009	8	0.024
	Materiales resistentes a la corrosión	0.004	9	0.036	5	0.02	9	0.036	5	0.02	6	0.024
	Sujeciones desmontables	0.093	7	0.651	5	0.465	9	0.837	9	0.837	7	0.651
Manual a usuarios	0.093	10	0.93	10	0.93	10	0.93	10	0.93	10	0.93	
Seguridad	Vidrio protección	0.099	9	0.891	5	0.495	9	0.891	7	0.693	5	0.495
	Sin aristas vivas	0.099	7	0.693	7	0.693	7	0.693	7	0.693	7	0.693
	Uso energía solar	0.099	10	0.99	10	0.99	10	0.99	10	0.99	10	0.99
Eficiencia	Control parámetros	0.06	8	0.48	8	0.48	8	0.48	8	0.48	8	0.48
	Pintura oscura	0.15	10	1.5	10	1.5	10	1.5	10	1.5	10	1.5
	Base graduable	0.07	5	0.35	8	0.56	8	0.56	8	0.56	6	0.42
	TIMs	0.048	10	0.48	10	0.48	10	0.48	10	0.48	10	0.48
	Espesor aislantes	0.011	10	0.11	10	0.11	10	0.11	10	0.11	10	0.11
	Propiedades aislantes	0.011	9	0.099	7	0.077	9	0.099	7	0.077	7	0.077
SUMA		0.985		8.119		7.8		8.605		8.294		7.809

2.9. DIMENSIONAMIENTO DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO TÉRMICO

Tabla 2.5. Variables para el cálculo del tanque

Variables	Valor
I_{rad}	800 [w/m ²] [Figura 1.6 y 1.7]
A	0.1521 [m ²] [anexo 1]
η	50 [%]
T_i	20 [°C]
T_f	80 [°C]
ρ	1000 [kg/m ³]
Cp	4.22 [kJ/kg*K] (Cengel, Boles, Campos Olgu\in, Colli Serrano, & others, 2003)

Asumiendo que el tanque de almacenamiento no tiene pérdidas de calor, se tiene que el calor de entrada es igual al calor de salida, por tanto:

$$q_{in} = q_{out} \quad (1)$$

$$q_{in} = I_{rad} * A * \eta \quad (2)$$

Reemplazando en la ecuación 2, los valores de I (irradiancia), A (área), y η (eficiencia), se obtiene:

$$q_{in} = 60.84 \text{ W} = 219.024 \text{ kJ/h} \quad (3)$$

$$q_{out} = \dot{m} * Cp * (T_f - T_i) \quad (4)$$

Despejando de (4) \dot{m} ,

$$\dot{m} = \frac{q_{out}}{Cp * (T_f - T_i)} \quad (5)$$

Reemplazando (3) y los valores de la Tabla 2.5 en (5) se obtiene (6)

$$\dot{m} = 0.865 \text{ kg/h} \quad (6)$$

$$\frac{\dot{m}}{\rho} = \dot{V} \quad (7)$$

Reemplazando (6) en (7) y el valor de ρ de la Tabla 2.5

$$\dot{V} = 0.865 \text{ l/h} \quad (8)$$

Siendo (8) la capacidad que debe tener el tanque de almacenamiento para una hora.

Para dos horas:

$$2h * \dot{V} = 1.73 l \quad (9)$$

El cálculo se hizo para dos horas, puesto que se desea que el tanque tenga más tiempo de autonomía.

2.10. DISEÑO DEL COLECTOR.

Por medio de la evaluación de alternativas realizada en el capítulo 2.8 y cumpliendo con todos los objetivos especificados para el colector solar de placa plana se llegó al siguiente diseño.

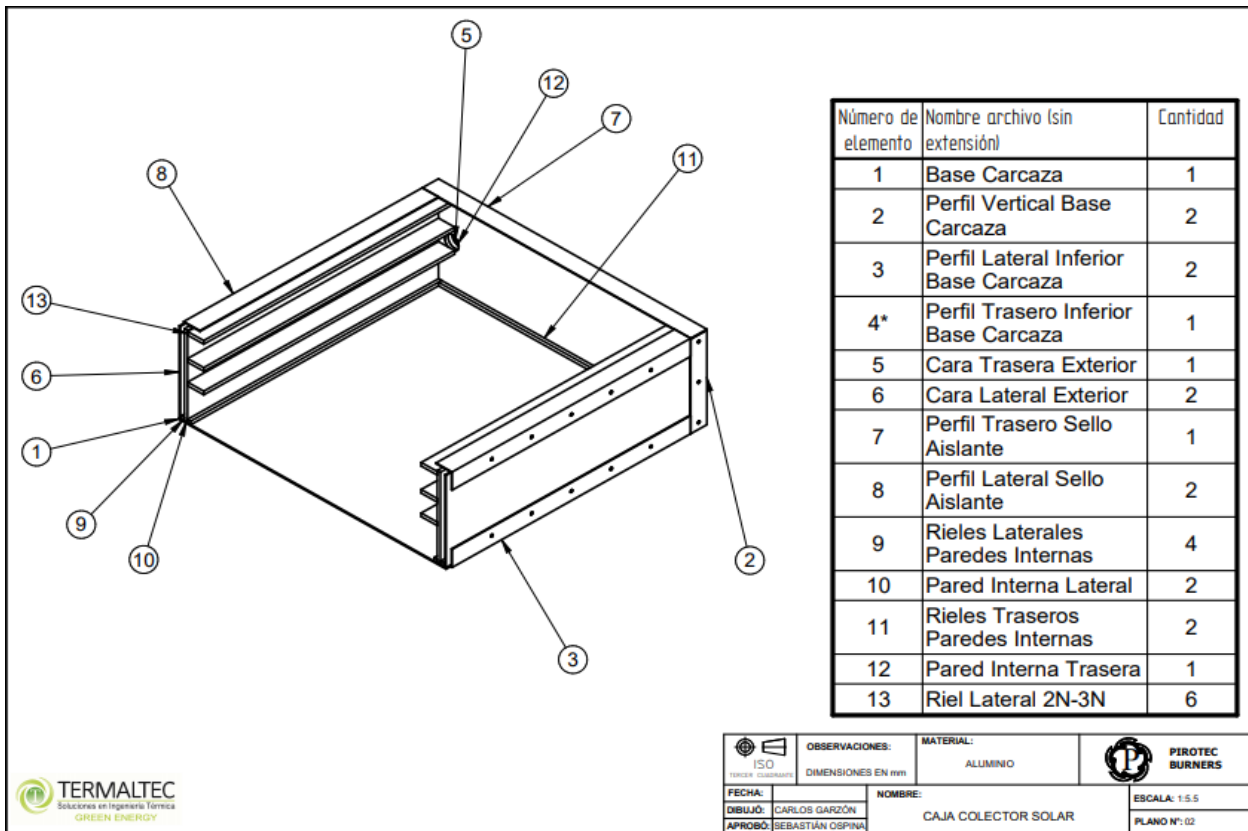


Figura 2.7. Plano del colector.

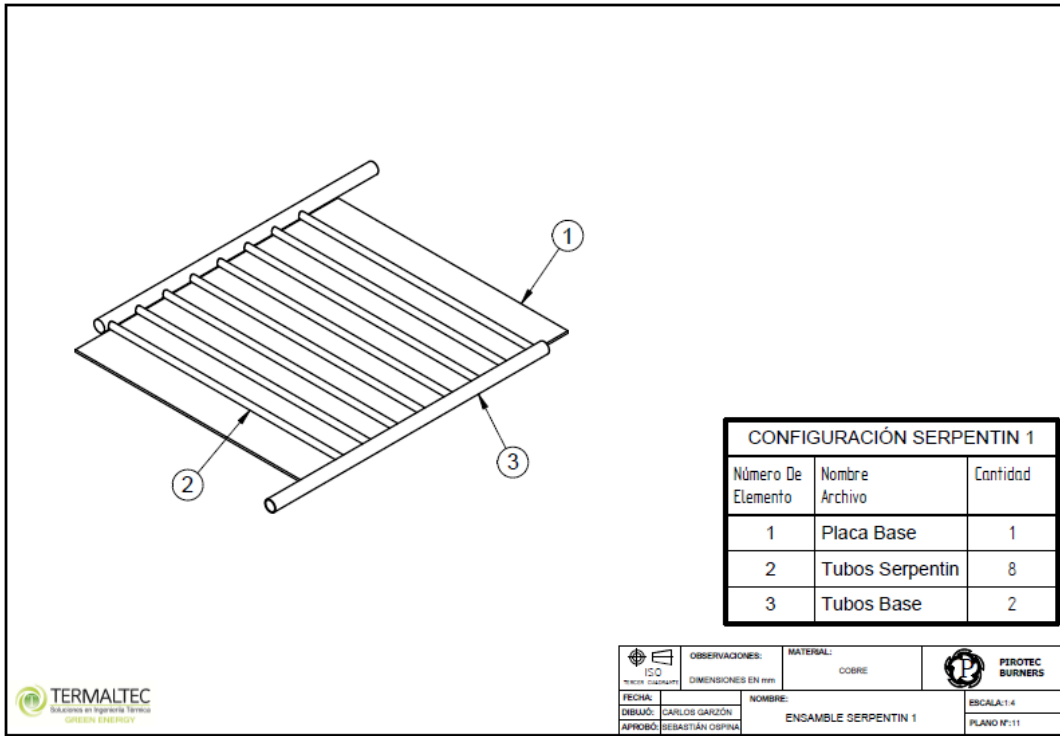


Figura 2.8. Configuración paralela.

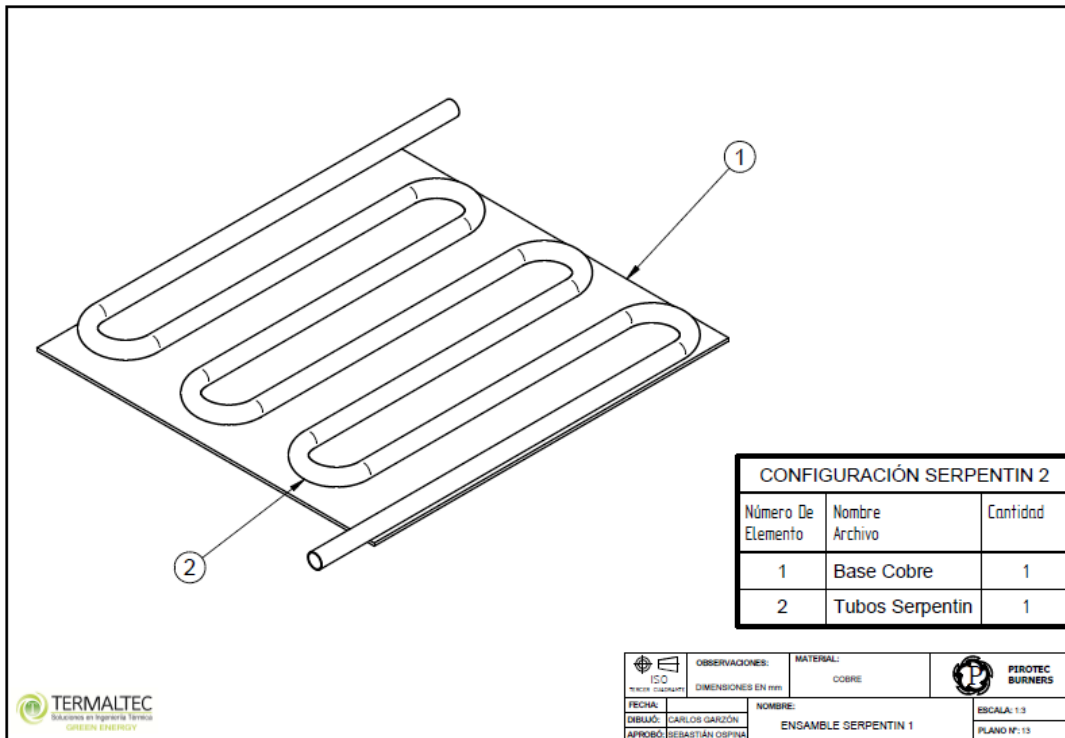
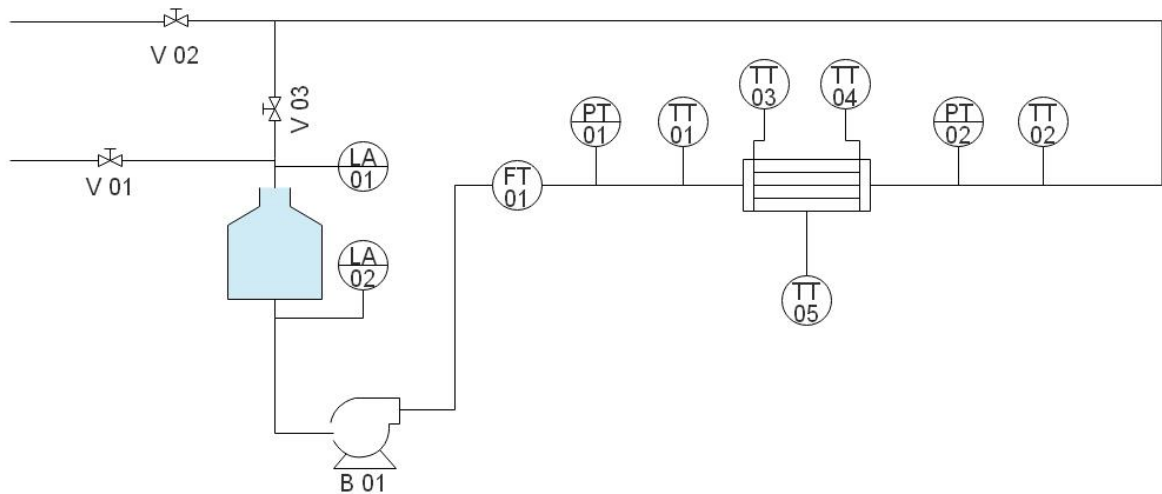


Figura 2.9. Configuración serie.

Las figuras 2.8 y 2.9 son los dos tipos de absorbedores que se desean implementar posteriormente; la figura 2.8 muestra la configuración en paralelo la cual está compuesta de una placa absorbedora, 8 tubos absorbedores y 2 tubos distribuidores donde uno de estos es la entrada del fluido de trabajo y el otro es la salida de este. La figura 2.9 es el plano isométrico de la configuración en serie la cual se compone de una placa absorbedora y un tubo absorbedor donde por un lado entra el fluido de trabajo y por el otro sale.

Después de realizar el diseño del colector como se muestran en las figuras 2.7, 2.8 y 2.9 se procede a realizar un esquema de un posible montaje de instrumentación como se muestra en la figura 2.10, para tomar medidas de variables como temperatura, presión, flujo y nivel para mantener en óptimas condiciones el funcionamiento del colector.



- B 01** Bomba controladora de flujo
- FT 01** Transmisor de flujo
- TT** Transmisor de temperatura
- V 01** Valvula suministro de entrada
- V 02** Valvula suministro de salida
- V 03** Valvula recirculacion

Figura 2.10. Instrumentación del colector.

2.11. ESPECIFICACIONES DEL DISEÑO DEL COLECTOR.

Tabla 2.6. Características del colector.

Características	Configuración en paralelo	Configuración en serie
Área total del colector	0.1521 m ²	0.1521 m ²
Ancho del colector	0.39 m	0.39 m
Largo del colector	0.39 m	0.39 m
Diámetro interno (Tubos)	7 mm	N/A
Diámetro externo (Tubos)	8.5 mm	N/A
Espesor Tubos	0.75 mm	N/A
Diámetro interno (Cabezal tubos)	14 mm	14 mm
Diámetro externo (Cabezal tubos)	15.5 mm	15.5 mm
Espesor cabezal tubos	0.75 mm	0.75 mm
Material de tubos	Cobre	Cobre
Espaciamiento entre tubos	50 mm	50 mm
Número de tubos	7	N/A
Longitud de los tubos	354 mm	~ 2500 mm
Configuración de los tubos	Paralelo	Serie
Área de la placa absorbente	0.1369 m ²	0.1369 m ²
Longitud de la placa absorbente	0.37 m	0.37 m
Ancho de la placa absorbente	0.37 m	0.37 m
Material de la placa absorbente	Cobre	Cobre
Espesor de la placa absorbente	1 mm	1 mm
GL espesor	6 mm	6 mm
TIM espesor	6 mm	6 mm
Air gap absorbedor -TIM	20 mm	20 mm
Air gap TIM - GE	12 mm	12 mm
Espesor del absorbedor inferior	50 mm	50 mm
Espesor del aislante lateral	10 mm	10 mm
Material del aislante	Poliuretano	Poliuretano
Material de la carcasa	Aluminio	Aluminio
Espesor de la carcasa	3 mm	3 mm
Volumen del tanque	2 L	2 L
Flujo másico	3.6 kg/h – 120 kg/h	3.6 kg/h – 120 kg/h

3. DESCRIPCIÓN DEL MODELO

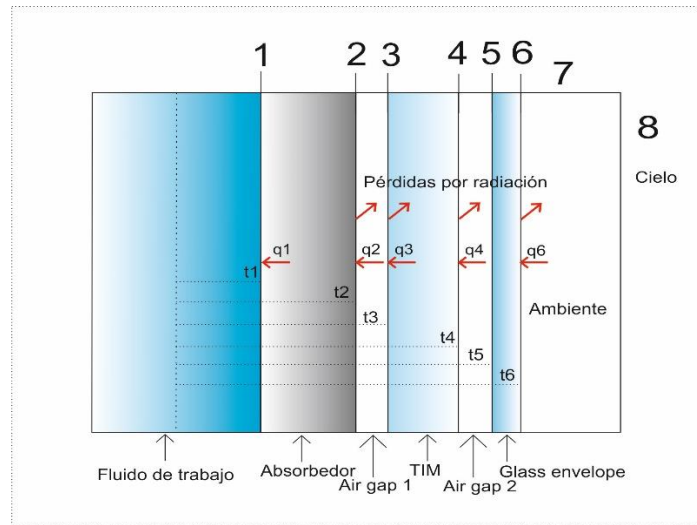


Figura 3.1. Diagrama colector solar.

En la figura 3.1 se puede observar la posición de los componentes del colector solar placa plana con TIM y como es el comportamiento de la radiación solar incidente en este.

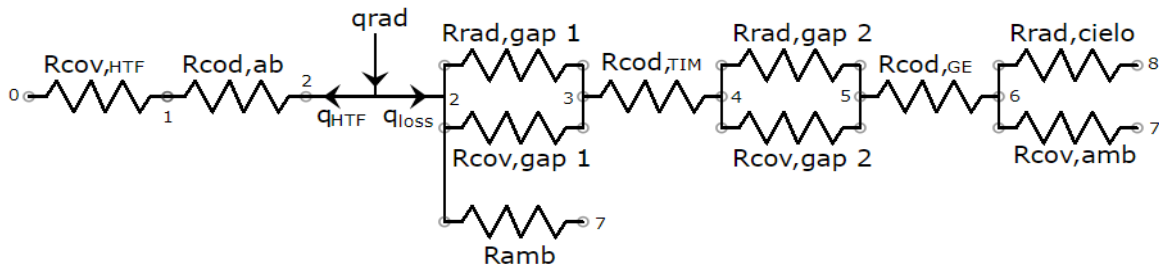


Figura 3.2. Modelo térmico del colector solar de placa plana.

3.1. ANALISIS TÉRMICO Y ÓPTICO.

La energía transferida al fluido de trabajo (q_{HTF}) es calculado por medio de la radiación incidente en el colector menos las pérdidas de calor producidas.

$$q_{HTF} = q_{rad} - q_{loss} \quad (10)$$

Primero la radiación solar incidente en la parte superior del colector solar (glass envelope) (q_6) se calcula por medio de la radiación solar de la zona en la cual se encuentre

el colector, el área del colector, la eficiencia del colector y el radio de concentración solar que presenta el colector.

$$q_6 = I_{rad} A_{ab} C \eta_c \quad (11)$$

Después, la radiación solar incidente en el TIM (q_4) la cual se atenúa un poco por haber pasado por el vidrio protector es igual a la radiación solar incidente en la parte interior del glass envelope (q_5). Este calor en el TIM se calcula por medio de la radiación solar incidente en la parte exterior del glass envelope por la transmitancia de este.

$$q_4 = q_5 = q_6 \tau_s \quad (12)$$

La radiación solar después de haber pasado por el TIM (q_3) y la que llega a la superficie del absorbedor (q_2) se calculan por medio de las ecuaciones (13) y (14); las cuales tienen en cuenta el efecto producido por el TIM.

$$q_3 = q_4 (1 - R_{ra}) e^{-\mu(t_4 - t_3)} \quad (13)$$

$$q_2 = q_3 (1 - R_{ra}) e^{-\mu(t_3 - t_2)} \quad (14)$$

La radiación solar incidente en el fluido de trabajo y teniendo en cuenta el efecto del TIM se calcula por medio de la radiación solar incidente en el absorbedor (q_2) por la absorbancia que posee este mismo.

$$q_{rad} = q_2 \alpha \quad (15)$$

La radiación solar incidente en el colector sin tener en cuenta los efectos producidos por el TIM, se puede observar en la ecuación (16).

$$q_{rad \text{ No TIM}} = q_6 \tau_s \alpha \quad (16)$$

Las pérdidas producidas por el colector solar se calcularon median la ecuación (17); en esta ecuación se debe de tener en cuenta que el segundo término puede ser despreciable ya que la diferencia de temperaturas entre el ambiente y el cielo es muy poca por lo cual estas pérdidas pueden ser menores e iguales al 1%.

$$q_{loss} = \frac{(T_2 - T_7)}{R_{total}} + \frac{T_7 - T_8}{R_{total} \left(1 + \frac{R_{cielo}}{R_{conv,amb}}\right)} \quad (17)$$

El calor transferido al fluido de trabajo se calcula por medio de la ecuación (18). En esta ecuación se tiene en cuenta la temperatura en la superficie del absorbedor, la temperatura del fluido de trabajo, la resistencia por conducción del tubo absorbedor y por último la resistencia por convección del fluido de trabajo.

$$q_{HTF} = \frac{(T_2 - T_0)}{R_{cond,ab} + R_{conv,HTF}} \quad (18)$$

La Eficiencia del receptor (η_R) puede ser calculada por medio de la relación entre la eficiencia general del colector (η) y la eficiencia de colección (η_c) de este mismo. Hay que tener en cuenta que para los colectores de placa plana $\eta_R = \eta$.

$$\eta_R = \frac{\eta}{\eta_C} = \frac{q_{HTF}/q_{in}}{q_6/q_{in}} = \frac{q_{rad} - q_{loss}}{q_6} \quad (19)$$

Al reemplazar las ecuaciones (11), (15) y (17) en la ecuación (19), se puede obtener una ecuación general para la eficiencia de recepción del colector solar con la integración del TIM.

$$\eta_R = \tau_s \alpha (1 - R_{ra})^2 e^{-\mu(T_2 - T_7)} - \frac{(T_2 - T_7)/R_{total}}{I_{rad} A_{ab} C \eta_C} \quad (20)$$

En contraste la eficiencia de recepción del colector solar sin la aplicación del TIM se puede observar en la ecuación (21)

$$\eta_{R \text{ No TIM}} = \tau_s - \frac{(T_4 - T_3)/R_{total, \text{No TIM}}}{I_{rad} A_{ab} C \eta_C} \quad (21)$$

3.2 SIMULACIÓN DEL MODELO

Las siguientes simulaciones se realizaron en MATLAB con un código matemático elaborado por medio del análisis de la sección 3.1, donde se describen previamente las ecuaciones para el análisis de transferencia en dicho colector. En el anexo 3 se encuentra el código.

Los parámetros de referencia usados para realizar las simulaciones que se muestran a continuación se encuentran en la Tabla 3.1, estos valores de referencia se obtuvieron de la Tabla 2.6 donde se especifican las características de diseño del colector propuesto por este documento.

Los parámetros de referencia que se utilizaron en la simulación fueron los siguientes:

Tabla 3.1. Parámetros referencia usados en MATLAB.

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
I	800 w/m ²	t7	t6 * 1.1 m
T ₇	298 K	K _{ab}	385
T ₈	287 K	K _{gl}	1.25
T ₁	353 K	eps2	0.1
tTIM	6 mm	eps5	0.87
eps TIM	0.2	eps6	0.87
K _{TIM}	1.25	h ₁	20
μ	2	h ₂₋₃	5
T ₀	298 K	h ₄₋₅	5
T ₇	353 K	h ₇	20
H	0.39 m	L _{dis}	0.02925 m
L	0.39 m	K _{dis}	0.0165
t1	0.007 m	C	1

Tabla 3.1.1. Continuación Parámetros referencia usados en MATLAB.

t2	0.0085 m	T	0.92
t3	0.0285 m	A	0.95
t4	t3 + Ttim m	R _{ra}	0.04
t5	t4 + 0.012 m	A _{ab}	0.1369
t6	t5 + 0.006 m	Sigma	5.67 e ⁻⁸

A continuación, se presentan las gráficas que se obtuvieron después de correr el modelo basado en las anteriores ecuaciones. La figura 3.3 muestra la eficiencia de un colector de placa plana con TIM y sin TIM, con el aumento de la temperatura del fluido de trabajo (T1), y se aprecia que el colector con TIM es más eficiente a altas temperaturas que el colector que no lo tiene, esto se explica también por medio de la Figura 3.4, ya que, al integrar el TIM, las pérdidas de calor disminuyen, haciendo que los colectores con TIM sean más eficientes. Además, en la figura 3.3 se observa que el colector con TIM empieza a superar la eficiencia del colector sin TIM en temperaturas superiores a 42°C, y para la presente investigación, se requiere que la temperatura del fluido de trabajo alcance 80°C, temperatura a la cual el sistema con TIM es más eficiente que el sistema convencional. De otro lado, en esta misma figura se puede observar comportamiento de la eficiencia del CPP con respecto al espesor del TIM. A medida que se va aumenta la temperatura de operación en el CPP las eficiencias del colector, con respecto al espesor del TIM, se comienzan a acercar y su comportamiento es similar, es decir, que a altas temperaturas el espesor del TIM no es un factor influyente en la eficiencia del colector. En la figura 3.4, se observa que las pérdidas de calor siempre son inferiores para el colector con TIM, este resultado confirma que las propiedades del material si son funcionales para reducir las pérdidas de calor en CPP. Además, el comportamiento de las pérdidas de calor con el espesor del TIM no presenta variaciones significativas entre cada uno de los espesores evaluados. Lo anterior evidencia que las pérdidas de calor no dependen del espesor del material, pero si son una función fuerte de la temperatura, como se esperaba.

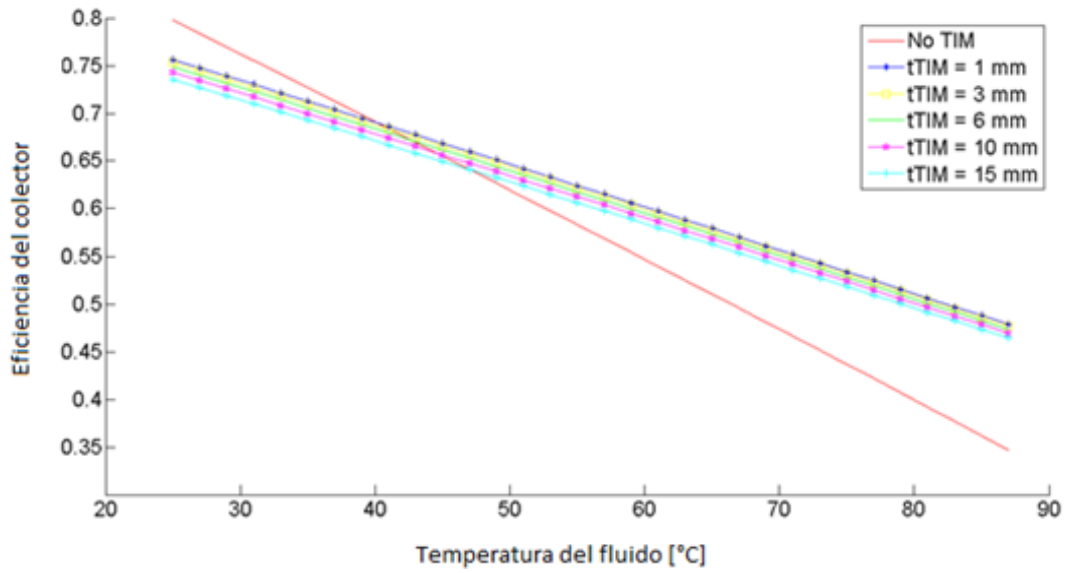


Figura 3.3. Eficiencia del colector variando espesor (t) del Tim.

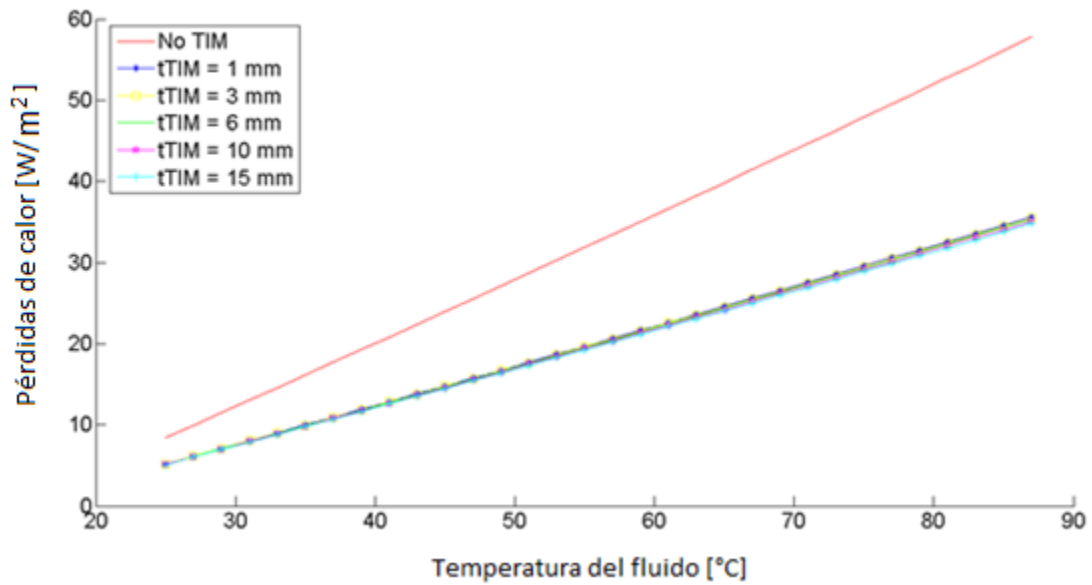


Figura 3.4. Pérdidas de calor variando espesor (t) del Tim.

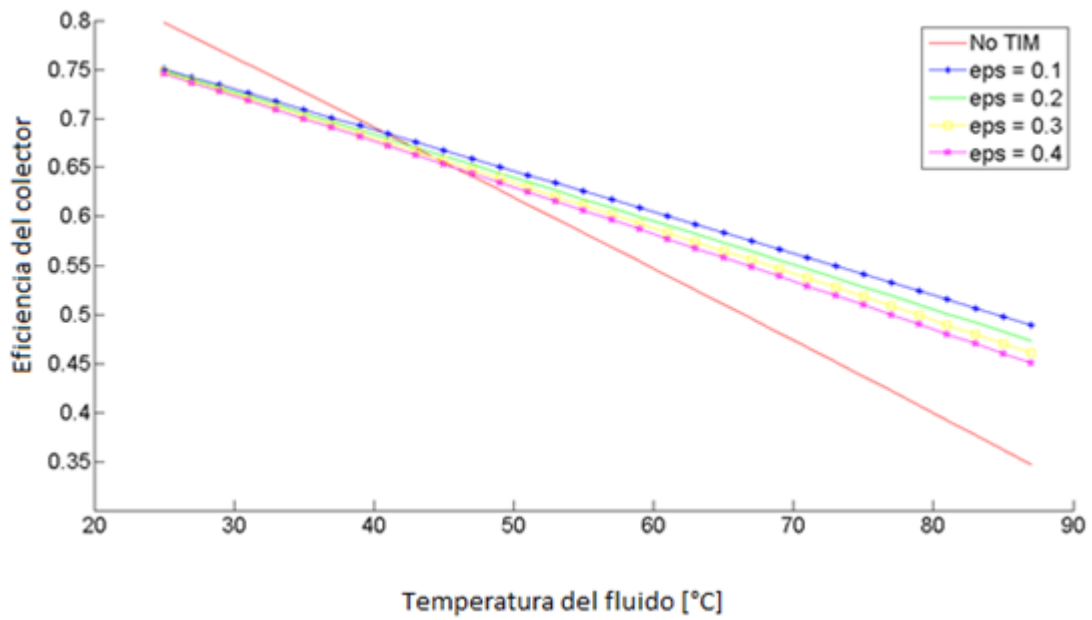


Figura 3.5. Eficiencia del colector variando la emitancia del TIM.

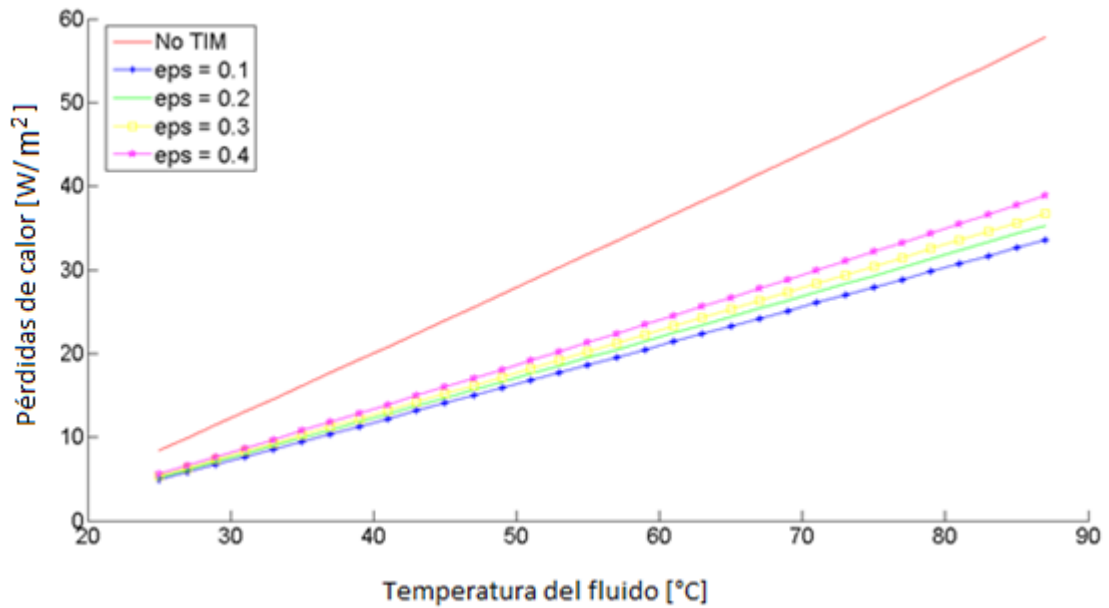


Figura 3.6. Perdidas de calor variando la emitancia del TIM.

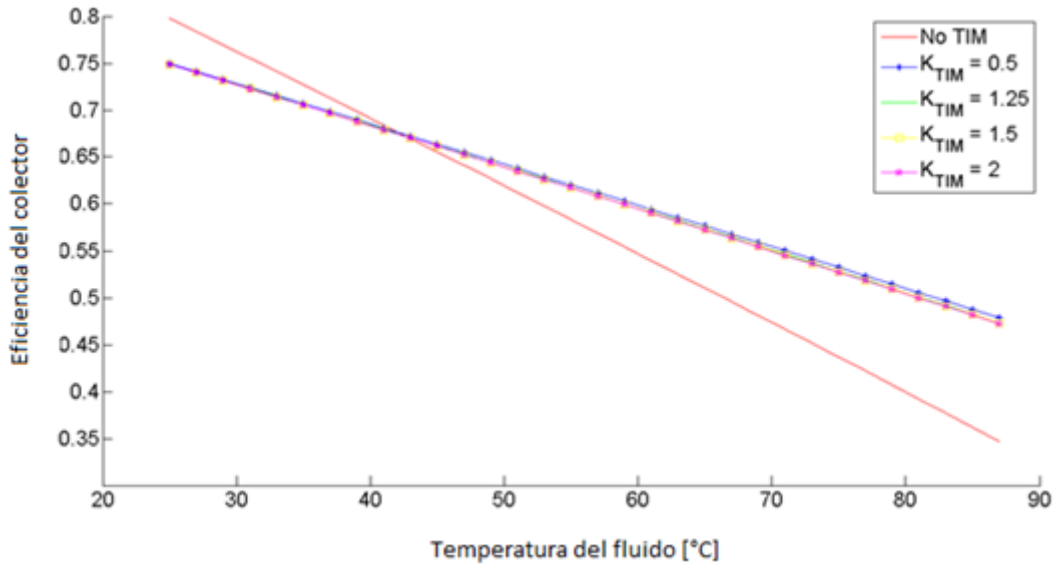


Figura 3.7. Eficiencia del colector variando la conductividad del TIM.

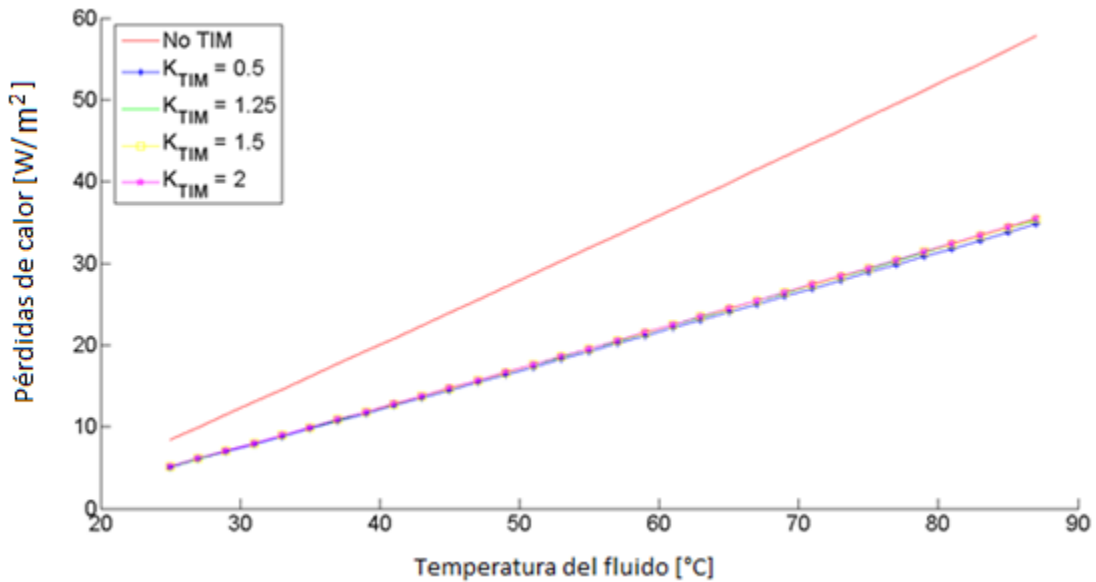


Figura 3.8. Pérdidas de calor variando la conductividad del TIM.

En las figuras 3.5 a 3.14 se pudo observar un comportamiento similar en el desempeño del colector al analizado en las figuras 3.3 y 3.4. En los resultados obtenidos para cada simulación el CPP con TIM presenta mayores eficiencias a temperaturas superiores a los

42°C y pérdidas de calor menores en todo el rango de temperaturas con respecto al CPP convencional. Como se observa en la figura 3.5 la emitancia del TIM influye significativamente en la eficiencia del colector. Los resultados muestran que se obtiene mayor eficiencia para emitancias pequeñas, esto se debe a que las pérdidas por la radiación emitida desde la superficie del TIM son menores. Lo anterior se corrobora con los resultados obtenidos en la gráfica 3.6. En esta gráfica se observa que las pérdidas de calor disminuyen con el decrecimiento de la emitancia.

En las figuras 3.7 y 3.8 se estudia el efecto de la conductividad térmica del TIM en el desempeño del colector. Aunque se observa un comportamiento coherente con la variación de la conductividad, en el cual su incremento disminuye la eficiencia y aumenta las pérdidas, su efecto es muy leve en el desempeño del CPP con TIM.

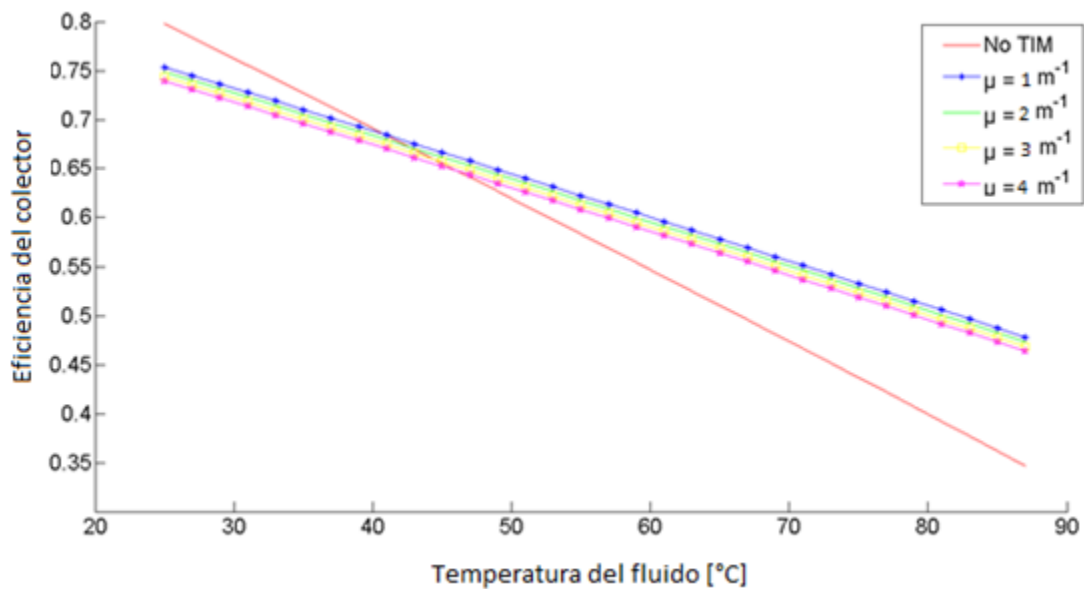


Figura 3.9. Eficiencia del colector variando el coeficiente de extinción del TIM.

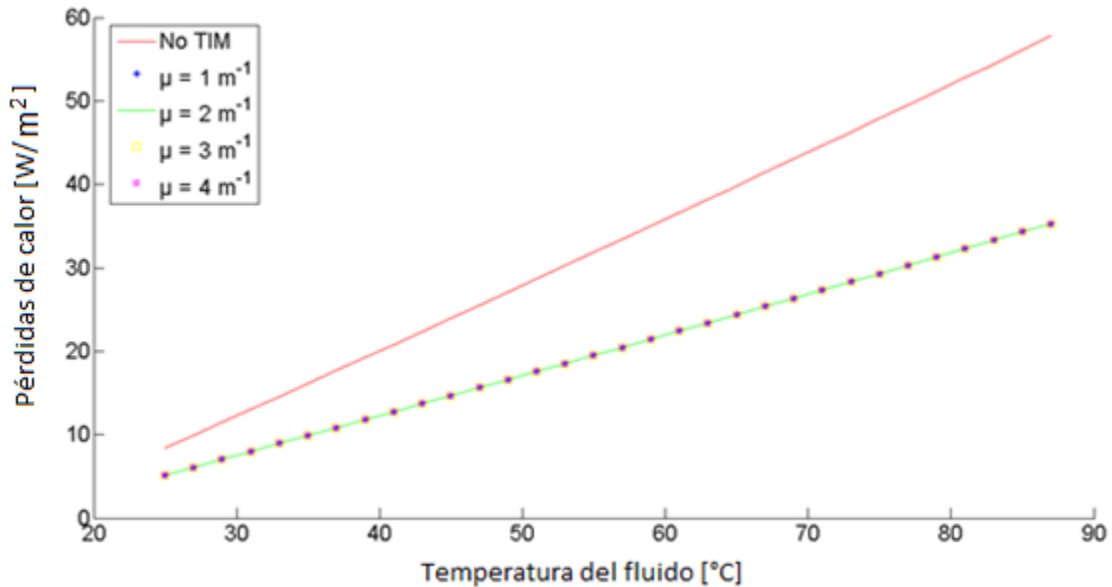


Figura 3.10. Pérdidas de calor variando el coeficiente de extinción del TIM.

En la figura 3.9 y 3.10 se evalúa el desempeño del colector con respecto al coeficiente de extinción del TIM. Teniendo en cuenta que la transmitancia es el inverso del coeficiente de extinción ($\tau = 1/\mu$), una mayor transmitancia implicará un menor coeficiente de extinción y viceversa. En este sentido, un bajo coeficiente de extinción significa que hay una mayor transmisión de radiación a través del TIM y por lo tanto llegará mayor radiación solar a la placa absorbadora del CPP. En la figura 3.9 se observa que, para incrementos del coeficiente de extinción, es decir para decrecimientos de la transmitancia, la eficiencia del colector disminuye. Estos resultados son los esperados, ya que, si la radiación que pasa a través del TIM es menor, el calor útil disminuirá y por ende la eficiencia del CPP. Además, en la Figura 3.10 se observa que las pérdidas de calor en el CPP son independientes del valor del coeficiente de extinción, pero éstas siempre son menores a las del colector convencional.

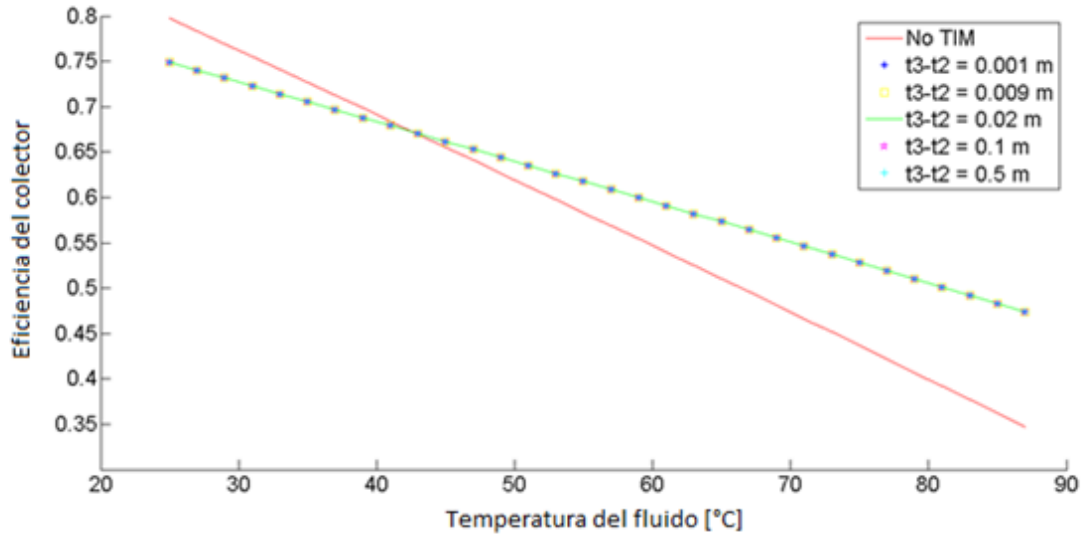


Figura 3.11. Eficiencia del colector variando el gap de aire de t_3-t_2 .

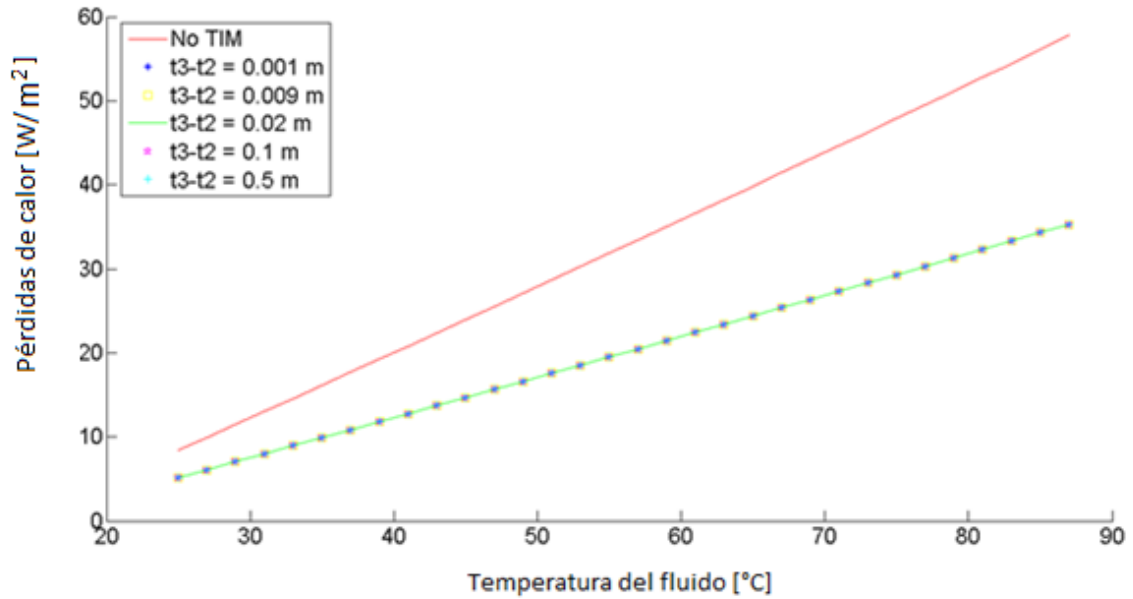


Figura 3.12. Pérdidas de calor variando el gap de aire de t_3-t_2 .

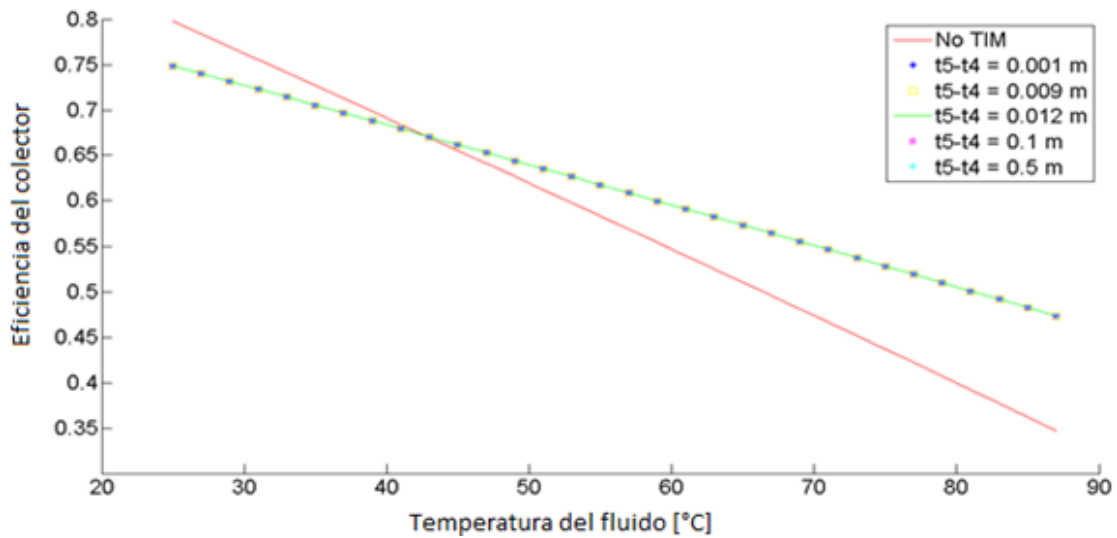


Figura 3.13. Eficiencia del colector variando el gap de aire de t_5-t_4 .

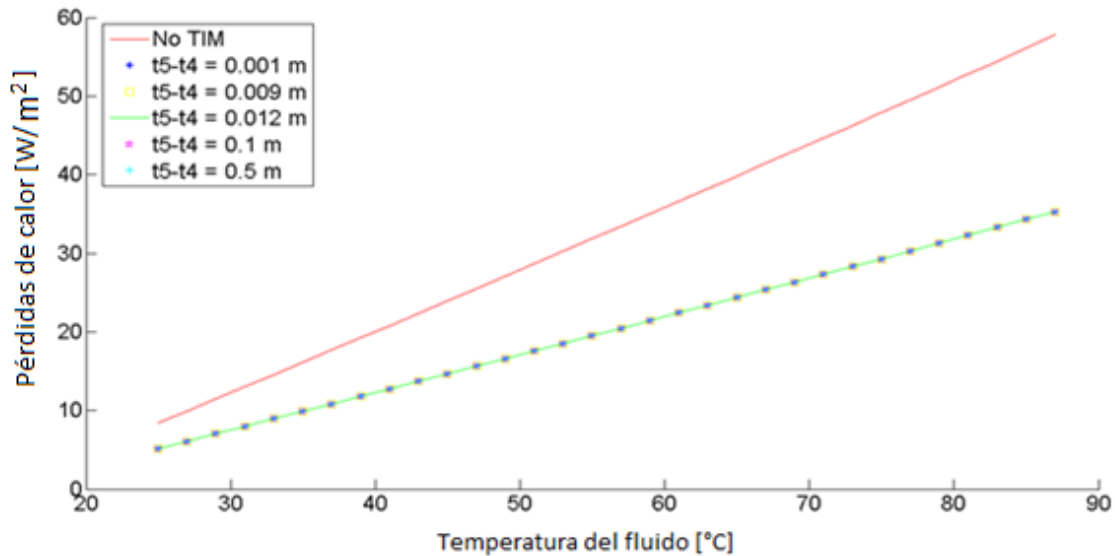


Figura 3.14. pérdidas de calor variando el gap de aire de t_5-t_4 .

Según las figuras 3.11, 3.12, 3.13 y 3.14 se aprecia que las variaciones en el espesor de los diferentes gaps de aire no producen un efecto significativo en el desempeño del CPP con TIM, sin embargo, en términos de costos y funcionamiento su uso es necesario, dado que el vacío es costoso y de difícil mantenimiento, y de no tener gap se presentaría un contacto directo entre los elementos aumentando las pérdidas de calor por conducción.

GLOSARIO

- **Brillo solar:** “La duración del brillo solar en horas, representa el tiempo total durante el cual incide luz solar directa sobre alguna localidad, entre el alba y el atardecer”.(“Brillo Solar - Hidrometeorología de ETESA,” n.d.)
- **Colector solar:** “Son elementos que capturan la radiación solar y la convierten en energía térmica”.(“Colector solar,” n.d.)
- **Conducción:** “La conducción es la transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia a las adyacentes menos energéticas, como resultado de la interacción entre partículas” (Cengel et al., 2003).
- **Convección:** “La convección es la transferencia de energía entre una superficie sólida y el fluido adyacente que se encuentra en movimiento, y tiene que ver con los efectos combinados de la conducción y el movimiento del fluido”(Cengel et al., 2003).
- **Energía térmica:** “Es aquella energía liberada en forma de calor, es decir, se manifiesta en forma de calor, pasa de un cuerpo más caliente a otro que presenta una temperatura menor.”(“Definición de Energía Térmica » Concepto en Definición ABC,” n.d.)
- **Gap:** Es el espaciamiento que hay entre dos superficies.
- **Glass envelope:** Cubierta de vidrio superior del colector solar placa plana.
- **Irradiancia:** “Es una magnitud representada por el cociente entre la potencia y el área que recibe la radiación solar”(“Irradiancia - aprendeconenergía,” n.d.)
- **Radiación:** “La radiación es la transferencia de energía debida a la emisión de ondas electromagnéticas (o fotones)” (Cengel et al., 2003).
- **TIMs:** Materiales transparentes de aislamiento

CONCLUSIONES

El colector diseñado en este documento servirá, con su posterior construcción, como elemento de investigación y docencia en el laboratorio de ingeniería en energía para evaluar el desempeño de estos sistemas bajo diferentes condiciones de operación y diseño. Se demostró que este tipo de colector puede llegar a ser un producto comercial acogido por la comunidad, dado que cumple con especificaciones directas de los usuarios, y presenta mejores ventajas que un colector convencional.

La metodología de diseño implementada en este trabajo permitió la evaluación de varias alternativas, llegando a la mejor opción que cumple con todos los requisitos del cliente y las características ingenieriles necesarias para el cumplimiento de los objetivos de diseño del colector mencionadas en el capítulo 2.2.

Para la evaluación del comportamiento del colector se realizó un modelo matemático simulado en MATLAB, que permitió analizar la incidencia de algunas propiedades físicas y ópticas del TIM, tales como la conductividad térmica, el factor de extinción, la emitancia, entre otras, sobre la eficiencia y las pérdidas de calor en CPP y a su vez, comparar su desempeño con un sistema convencional. Los resultados de las simulaciones permitieron concluir que el uso del TIM reduce significativamente las pérdidas de calor en un CPP y por ende, aumenta la eficiencia de mismo a temperaturas de operación por encima de los 42°C.

RECOMENDACIONES

Este trabajo llego hasta el diseño conceptual de un colector solar de placa plana portable y modular con la implementación de materiales transparentes de aislamientos. A continuación, se describen las recomendaciones a desarrollar en un futuro cercano.

- Construcción del colector solar portable y modular. A la fecha ya se empezó con la cotización de los servicios de construcción.
- Realizar la instrumentación y el control del colector solar a partir de los planos que se presentan en el anexo 2.
- Comparar experimentalmente el desempeño del CPP utilizando las configuraciones serie y paralelo diseñadas para el absorbedor.
- Complementar el modelo que se encuentra en el anexo 3 por medio de correlaciones que permitan describir adecuadamente los procesos de convección y radiación dentro del colector.
- Desarrollar nuevos diseños o modificaciones en las partes que componen el colector para evaluar su desempeño, por ejemplo, realizar perforaciones en los tubos de la placa absorbedora para generar turbulencia en el fluido de trabajo y, por ende, aumentar la convección de calor en este.
- Utilizar materiales que cambien de fase (PCMs) en el sistema de almacenamiento, para aumentar el tiempo de autonomía del colector bajo condiciones de operación nocturnas o de baja radiación solar.

BIBLIOGRAFIA

- ¿Qué es la bioenergía? - RBA Ambiental. (n.d.). Retrieved October 22, 2018, from <http://www.rba-ambiental.com.ar/bioenergia/que-es-la-bioenergia/>
- » ¿Qué es la Energía Undimotriz? Energías como Bienes Comunes. (n.d.). Retrieved October 22, 2018, from <http://www.energias.bienescomunes.org/2012/10/12/que-es-la-energia-undimotriz/>
- Abdulhamed, A. J., Adam, M., Zainal, M., Ab-Kadir, A., & Hairuddin, A. A. (2018). Review of solar parabolic-trough collector geometrical and thermal analyses, performance, and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *91*, 822–831. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.085>
- Aislamiento Térmico | Erica. (n.d.). Retrieved October 25, 2018, from <http://www.erica.es/web/aislamiento-termico/>
- AISLAN AISLANTE TÉRMICO/ABSORBENTE ACÚSTICO. (n.d.). Retrieved from <http://cym-sanpascual.cl/wp-content/uploads/2014/05/modificado-triaaptico-aislan-lana-mineral.pdf>
- Aste, N., Del Pero, C., & Leonforte, F. (2014). Water flat plate PV thermal collectors: A review. *Solar Energy*, *102*, 98–115. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.01.025>
- Baxter, R., Hastings, N., Law, A., & Glass, E. J. . (2008). Jepírachi: una experiencia con la comunidad indígena Wayuu de la Alta Guajira colombiana. *Animal Genetics*, *39*(5), 561–563.
- Bhowmik, H., & Amin, R. (2017). Efficiency improvement of flat plate solar collector using reflector. *Energy Reports*, *3*, 119–123. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2017.08.002>
- Brillo Solar - Hidrometeorología de ETESA. (n.d.). Retrieved November 1, 2018, from http://www.hidromet.com.pa/brillo_solar.php
- Carrizosa, E., Domínguez-Bravo, C., Fern Andez-Cara, E., & Quero, M. (2015). Optimization of multiple receivers solar power tower systems. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.08.005>
- Cengel, Y. A., Boles, M. A., Campos Olgu\in, V., Colli Serrano, M. T., & others. (2003). *Termodinámica*.
- Chan, H. Y., Vinson, A. A., Baljit, S. S. S., & Ruslan, M. H. (2018). Comparison of Thermal Performances between Low Porosity Perforate Plate and Flat Plate Solar Air Collector. *Journal of Physics: Conference Series*, *989*(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/989/1/012001>

Colector solar. (n.d.). Retrieved November 1, 2018, from <https://solar-energia.net/definiciones/colector-solar.html>

Consumo de energía eléctrica (kWh per cápita) | Data. (n.d.). Retrieved October 22, 2018, from https://datos.bancomundial.org/indicador/EG.USE.ELEC.KH.PC?name_desc=false.

Corredor, G., & Corredor, G. (2018). Colombia y la transición energética. *Ciencia Política*, 13(25), 107–125. <https://doi.org/10.15446/cp.v12n25.70257>

Dabiri, S., Khodabandeh, E., Khoeini Poorfar, A., Mashayekhi, R., Toghraie, D., Ali, S., & Zade, A. (2018). Parametric investigation of thermal characteristic in trapezoidal cavity receiver for a linear Fresnel solar collector concentrator. *Energy*, 153, 17–26. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.04.025>

Definición de Energía Térmica » Concepto en Definición ABC. (n.d.). Retrieved November 1, 2018, from <https://www.definicionabc.com/ciencia/energia-termica.php>

DETERMINACIÓN DEL CONSUMO FINAL DE URBANO Y COMERCIAL DOMÉSTICOS DE ENERGÍA ELÉCTRICA Y GAS INFORME FINAL Presentado a : UPME Por : UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA FACULTAD DE CIENCIAS Departamento de Física. (2006).

EL ABC DE LOS COMPROMISOS DE COLOMBIA PARA LA COP21 CONTENIDO. (n.d.). Retrieved from http://www.minambiente.gov.co/images/cambioclimatico/pdf/colombia_hacia_la_COP21/ABC_de_los_Compromisos_de_Colombia_para_la_COP21_VF_definitiva.pdf

Elsheikh, A. H., Sharshir, S. W., Mostafa, M. E., Essa, F. A., & Ahmed Ali, M. K. (2018). Applications of nanofluids in solar energy: A review of recent advances. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82(October 2017), 3483–3502. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.108>

Energía de gradiente salino una solución ecológica. (n.d.). Retrieved October 22, 2018, from <https://minas.medellin.unal.edu.co/noticias/facultad/606-energia-de-gradiente-salino-una-solucion-ecologica>

Energía Mareomotriz. (n.d.). Retrieved October 22, 2018, from <https://www.fuentesdeenergiarenovables.com/energia-mareomotriz/>

Granjas Solares. (n.d.). Retrieved October 22, 2018, from <http://www.celsia.com/granjas-solares>

Hafez, A. Z., Soliman, A., El-Metwally, K. A., & Ismail, I. M. (2016). Solar parabolic dish Stirling engine system design, simulation, and thermal analysis.

<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.07.067>

- Hellstrom, B., Adsten, M., Nostell, P., Karlsson, B., & Wackelgard, E. (2003). The impact of optical and thermal properties on the performance of flat plate solar collectors. *Renewable Energy*, 28(3), 331–344. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(02\)00040-X](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(02)00040-X)
- Hirasawa, S., Tsubota, R., Kawanami, T., & Shirai, K. (2013). Reduction of heat loss from solar thermal collector by diminishing natural convection with high-porosity porous medium. *Solar Energy*, 97, 305–313. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.08.035>
- INFORME DE REGISTROS DE PROYECTOS DE GENERACIÓN. (n.d.). Retrieved October 22, 2018, from http://www.siel.gov.co/Generacion_sz/Inscripcion/2018/Registro_Proyectos_Abril2018.pdf
- Instalaciones Geotérmicas - La energía inagotable y gratuita. (n.d.). Retrieved October 22, 2018, from <http://www.akiter.com/energia-geotermica-y-renovables/>
- Irradiancia - aprendeconenergia. (n.d.). Retrieved November 1, 2018, from <http://www.aprendeconenergia.cl/glossary/irradiancia/>
- Karlsson, K.-G., Riihelä, A., Müller, R., Meirink, J. F., Sedlar, J., Stengel, M., ... Wolters, E. (2013). CLARA-A1: a cloud, albedo, and radiation dataset from 28 yr of global AVHRR data. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(10), 5351–5367. <https://doi.org/10.5194/acp-13-5351-2013>
- La importancia de las energías renovables | ACCIONA. (n.d.). Retrieved October 22, 2018, from <https://www.acciona.com/es/energias-renovables/>
- Libro de trabajo: IRENA REsource Renewable Energy Statistics Time Series2. (n.d.). Retrieved October 22, 2018, from <https://public.tableau.com/views/IRENAREsourceRenewableEnergyStatisticsTimeSeries2/Charts?:embed=y&:showVizHome=no&publish=yes&:toolbar=no>
- Ministerio de Minas y Energía de Colombia, & Unidad de Planeación Minero Energética - UPME. (2017). Plan De Acción Indicativo De Eficiencia Energética 2017 - 2022, 157. Retrieved from http://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/MarcoNormatividad/PAI_PROURE_2017-2022.pdf
- Nigel Cross. (2000). *Strategies for Product Design. Design* (Fourth Ed). Retrieved from <http://www.lavoisier.fr/notice/fr421790.html>
- Osorio, J. D., Rivera-Alvarez, A., Girurugwiro, P., Yang, S., Hovsopian, R., & Ordonez, J. C. (2017). Integration of transparent insulation materials into solar collector devices.

- Solar Energy*, 147, 8–21. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.03.011>
- Población | Naciones Unidas. (n.d.). Retrieved October 22, 2018, from <http://www.un.org/es/sections/issues-depth/population/index.html>
- POR MEDIO DE LA CUAL SE REGULA LA INTEGRACIÓN DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES NO CONVENCIONALES AL SISTEMA ENERGÉTICO NACIONAL. EL CONGRESO DE COLOMBIA. (n.d.). Retrieved October 22, 2018, from <https://www.minminas.gov.co/documents/10180/23517/22602-11506.pdf>
- Saxena, A., & El-Sebaï, A. A. (2015). A thermodynamic review of solar air heaters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, 863–890. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.059>
- Siecker, J., Kusakana, K., & Numbi, B. P. (2017). A review of solar photovoltaic systems cooling technologies. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.053>
- Sun, Y., Wilson, R., & Wu, Y. (2018). A Review of Transparent Insulation Material (TIM) for building energy saving and daylight comfort. *Applied Energy*, 226(June), 713–729. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.05.094>
- The Keeling Curve | A daily record of atmospheric carbon dioxide from Scripps Institution of Oceanography at UC San Diego. (n.d.). Retrieved October 22, 2018, from <https://scripps.ucsd.edu/programs/keelingcurve/>
- Upme. (2016). Minas y energía 2012 – 2016. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

ANEXOS

ANEXO 1. PARAMETROS DE DISEÑO EN DESARROLLO Y COMERCIALES

Parámetros de diseño de colectores solares de placa plana en desarrollo y comerciales

Características	[2]	[3]	[4]	[8]	[6]	[7]	[8]
Área total del colector		2 m ²	2 m ²	0.6 m ²	2.25 m ²		
Ancho del colector	1.2 m			0.6 m	0.9 m		0.925 m
Largo del colector	1.8 m			1 m	2.5 m		2 m
Espesor del colector				10/ 15 cm DGE			
Numero de tubos		9	9	8	6		
Diámetro interno (Cuerpo del tubo)		1.1 cm	1.1 cm	1 cm	1.25 cm	1.27 cm	
Diámetro externo (Cuerpo del tubo)	12.5 mm						15 mm
Espesor (Cuerpo del tubo)	0.7 mm	0.75 mm	0.75 mm				
Diámetro interno (head tubes)		2.23 cm	2.23 cm	1.2 cm	2.8 cm	3.81 cm	
Diámetro externo (head tubes)	2.5 cm						
Espesor de la cabeza del tubo	0.7 mm	1.5 mm	1.5 mm				
Material de tubos					Cobre		Cobre
Espaciado entre los	11.25 cm			5 cm			

centros de los tubos							
Área del plato absorbedor		1.6 m ²	1.51 m ²	0.5 m ²		1.85 m ²	
Material del plato absorbedor		Cobre	Cobre	Aluminio			Aluminio
Espesor del plato absorbedor	0.5 mm	4 mm		20 mm			
Longitud del plato absorbedor	1.65 m						
Ancho del plato absorbedor	1 m						
Espesor del air gap	3 cm			5 cm			
Espesor de la cubierta de vidrio	30 mm	4 mm	4 mm			3 mm	6 mm
Espesor del aislante inferior	40 mm	70 mm	70 mm		40 mm	25.4 mm	
Espesor del aislante lateral		5 mm	5 mm		20 mm		
Material aislante	Lana de vidrio	Lana de vidrio K = 0.04 W/mK	Madera K=0.08 W/m ² K	Espuma	Poliuretano K=0.033 W/mK	Fibra de vidrio	
Conexión del diámetro interno del tubo		25.4 mm	25.4 mm				
Cover to cover space DGE				50 mm			
Peso del colector	40 kg						
Capacidad del colector	4 Liters						
Anti fugas					Caucho		
Material del marco					Aluminio		

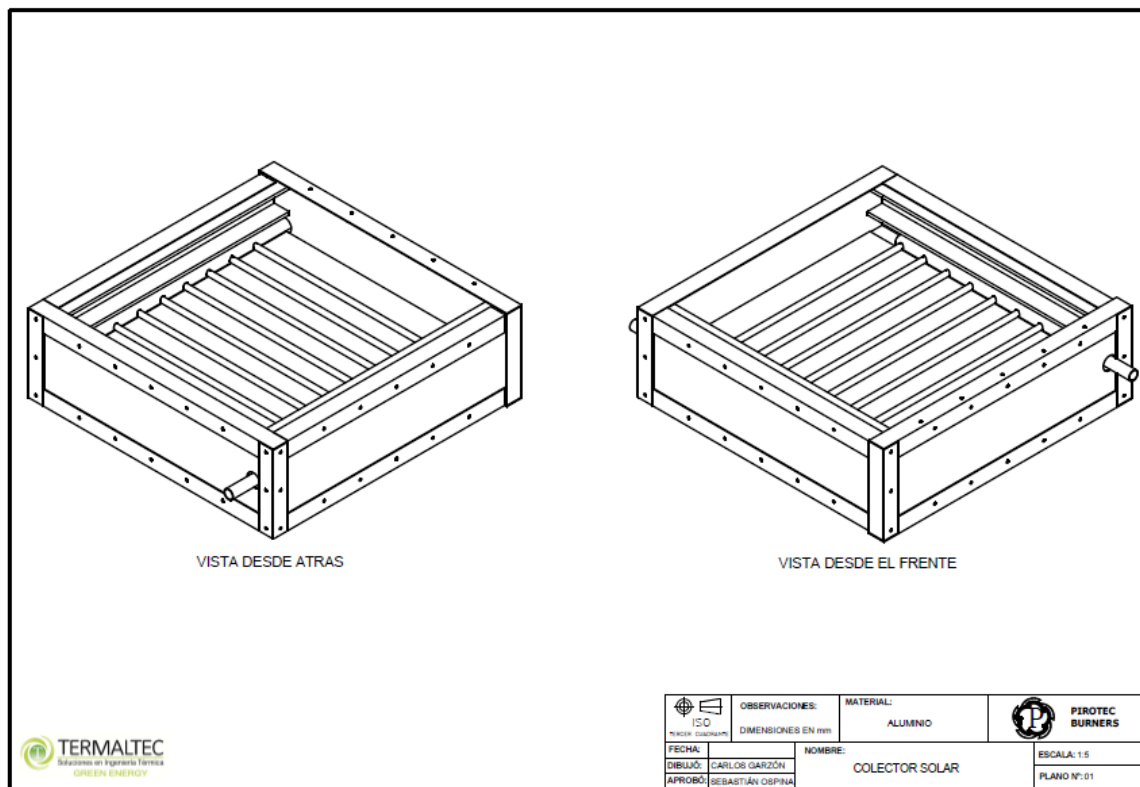
Parámetros de diseño de colectores solares de placa plana en desarrollo y comercial
continuación

Características	[9]	[10]	[11]	[12]	[13]	[14]	[15]
Área total del colector			2 m ²	1.2 m ²			

Ancho del colector	1 m	0.46 m	2 m		0.5 m	1 m	1 m
Largo del colector	2 m	0.77 m	1		0.7 m	2 m	2.5 m
Espesor del colector	7.5 cm	11 cm			6.3 cm		
Numero de tubos			9	11			8
Diámetro interno (riser tubes)		0.7 cm	10 mm	10 mm	8 mm	10 mm	15 mm
Diámetro externo (riser tubes)		0.9 cm <i>458 cm</i> <i>Longitud</i>	11 mm	11 mm	10 mm		
Espesor riser tube						1 mm	
Diámetro interno (head tubes)			25.4 mm			20 mm	
Material de los tubos			Cobre	Cobre			
Espaciamiento entre el centro de los tubos					30 mm		115 mm
Longitud de los tubos				1.5 m			2.46 m
Área del plato absorbedor	1.78 m ²					1.93*0.93 m	
Material del plato absorbedor				Aluminio k=400 W/m ² K			Cobre
Espesor del plato absorbedor		5 mm	0.6 mm	1 mm		3 mm	0.5 mm
Espesor del air gap						30 mm	28 mm
Espesor de la cubierta de vidrio	4 mm				4 mm	3.8 mm	
Material de la cubierta de vidrio				Vidrio bajo en hierro			
Espesor del aislante inferior	40 mm			50 mm	50 mm	20 mm	
Material del aislante	Lana de vidrio		Lana de roca	Lana de roca k=0.038W/mK	Lana de vidrio K = 0.04	Fibra de vidrio	Lana minera K = 0.05 W/mK

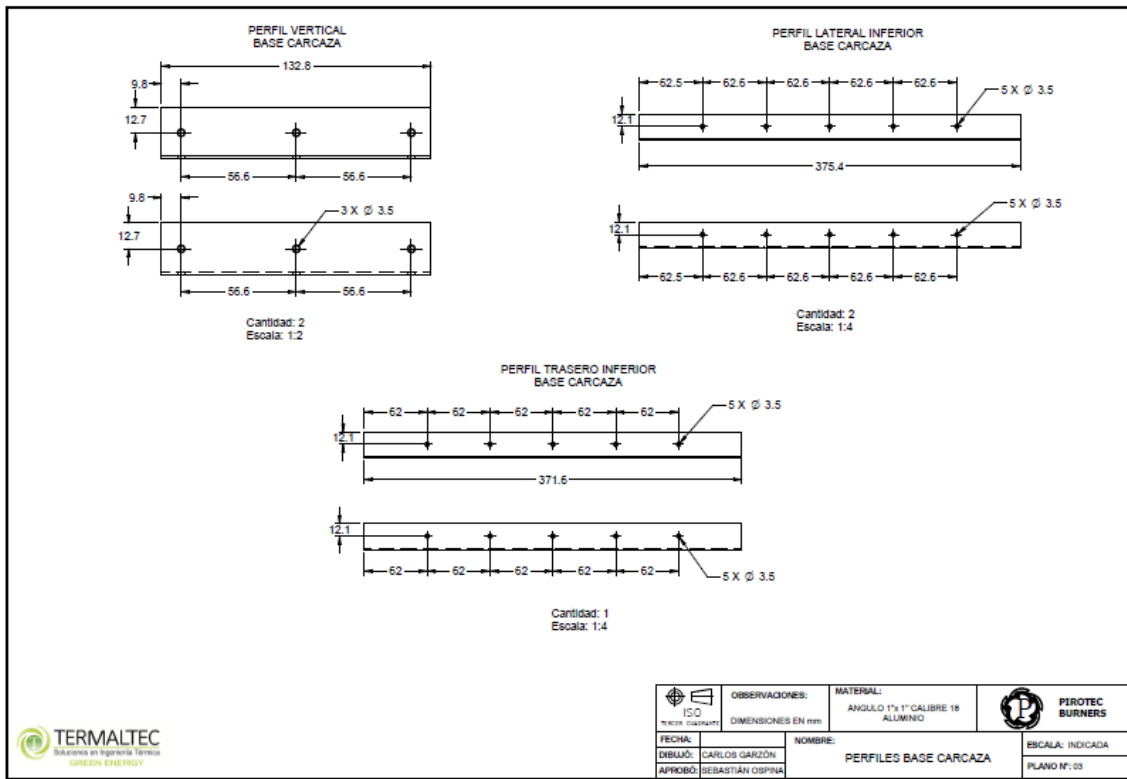
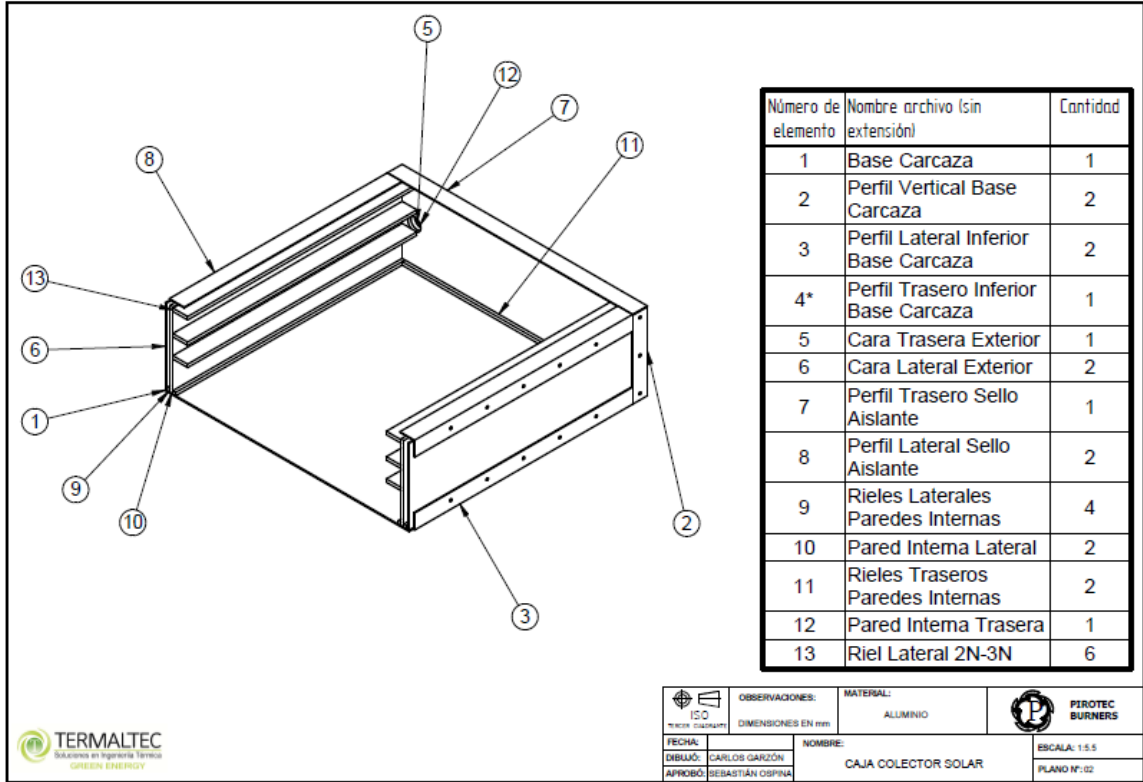
					W/m K		
Peso del colector					15 kg		
Material de cubierta			Alumini o				
Longitud del tanque		59 cm					
Amplitud del tanque		29.5 cm					
Altura del tanque		29.5 cm		1.2 m2			

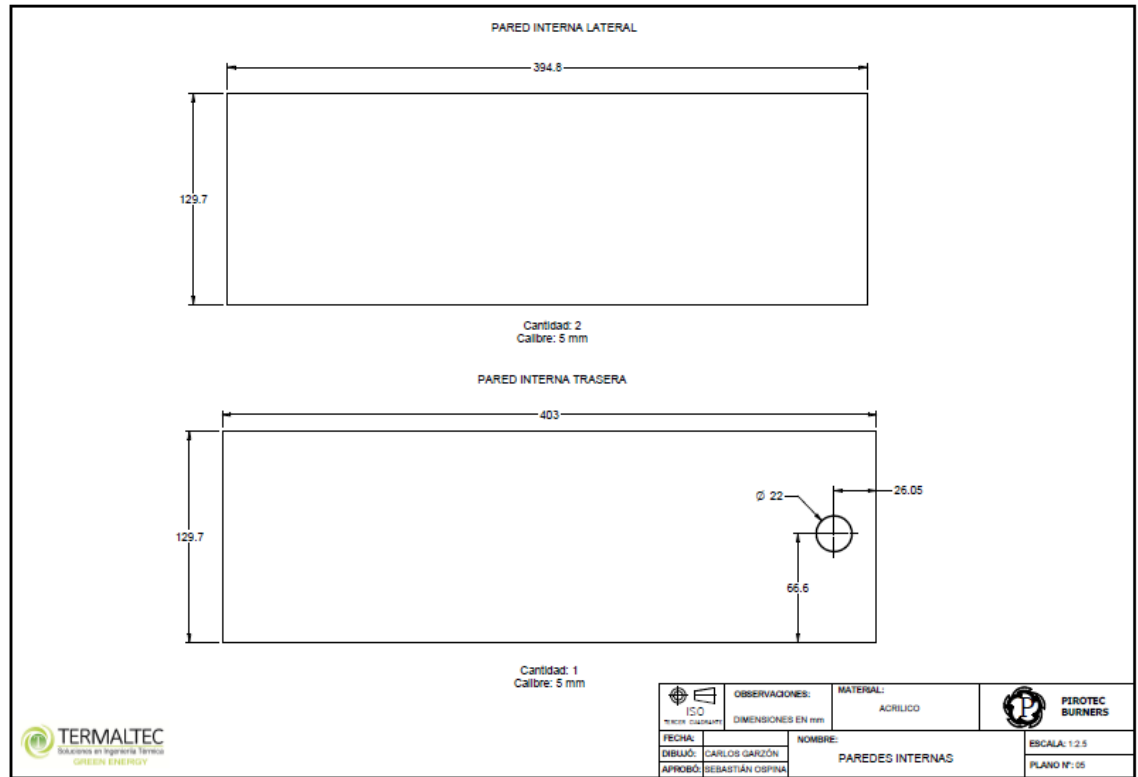
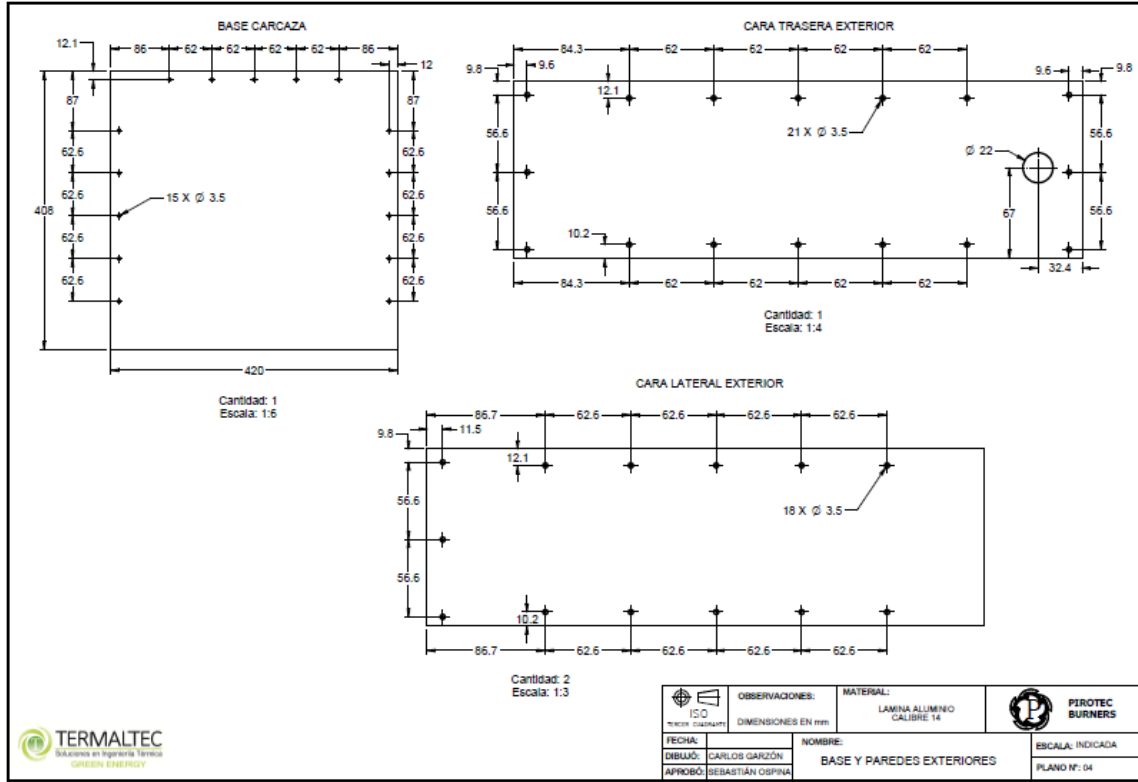
ANEXO 2. PLANOS.

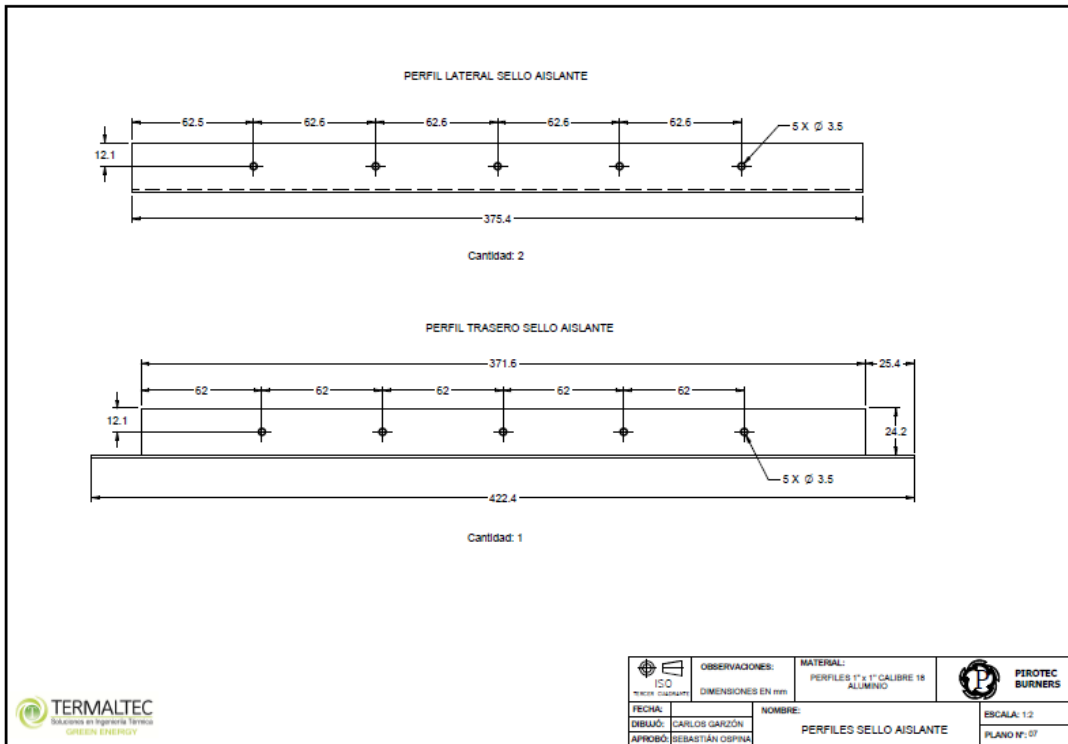
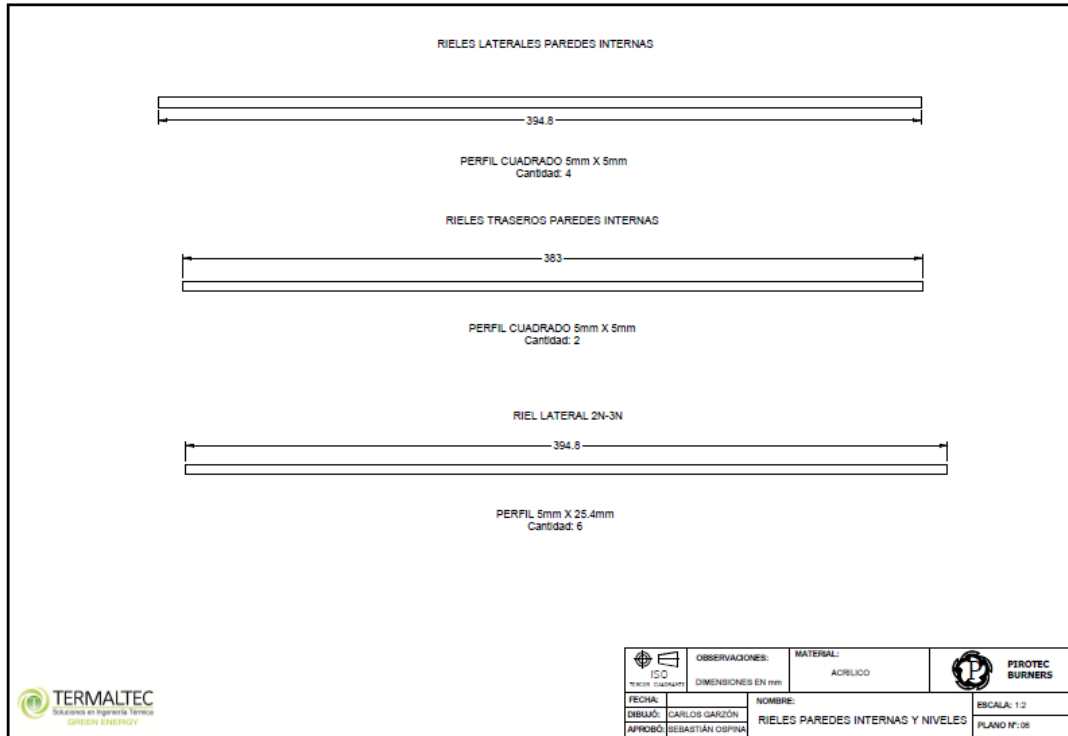


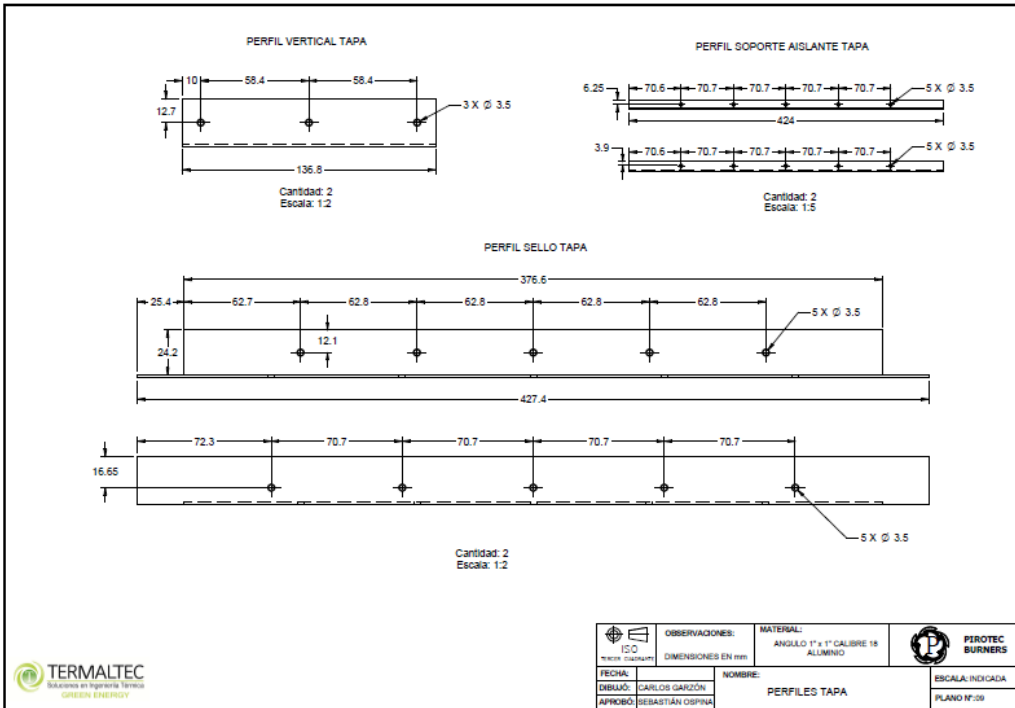
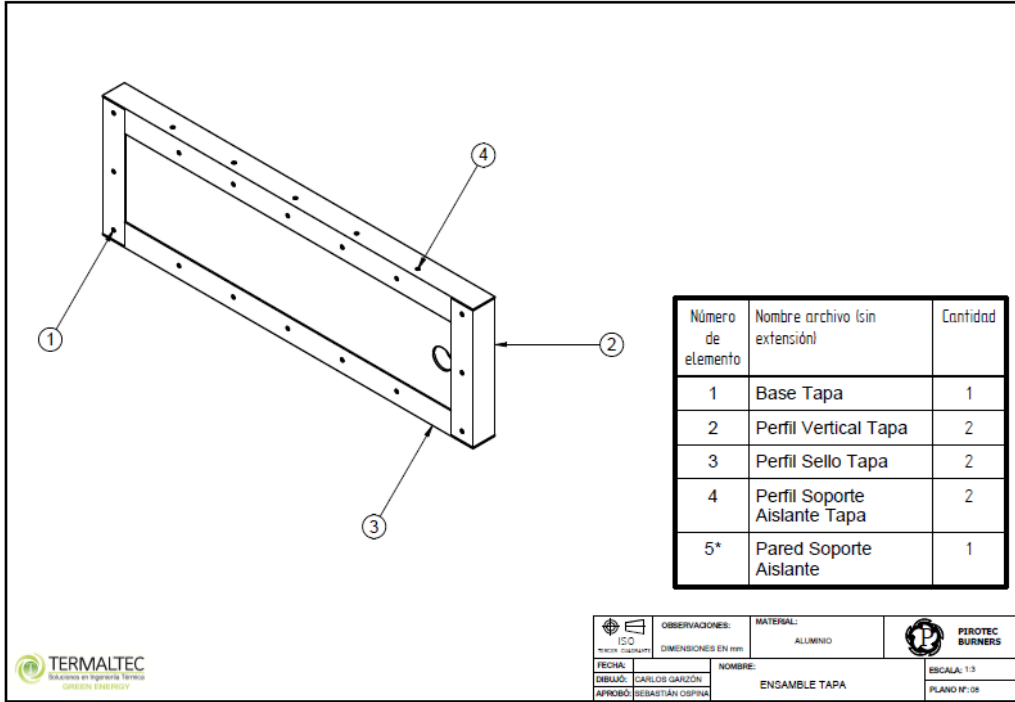
TERMALTEC
Soluciones en Ingeniería Térmica
GREEN ENERGY

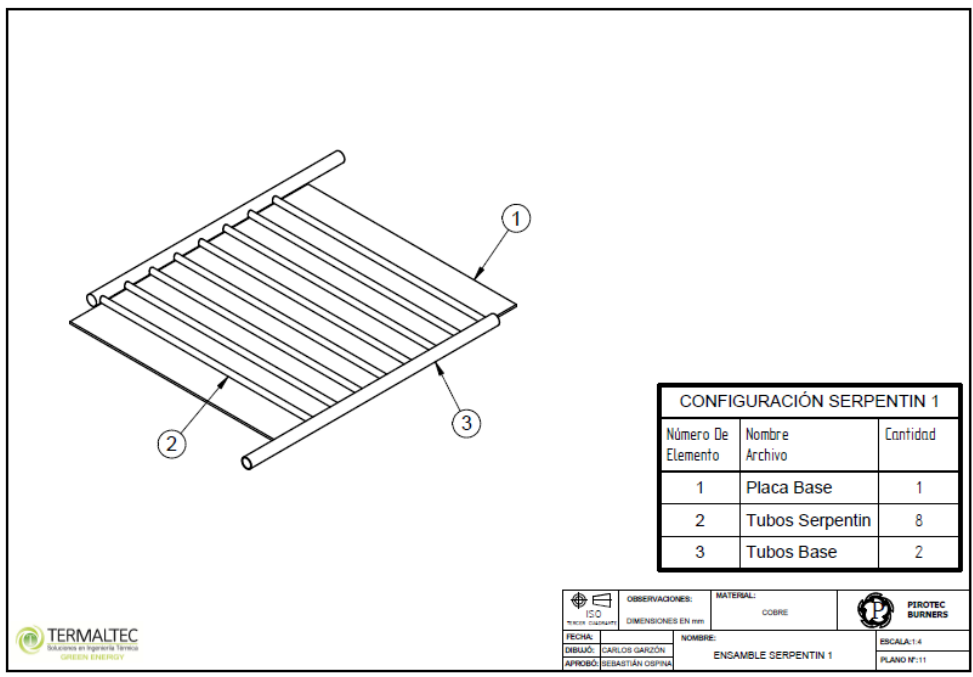
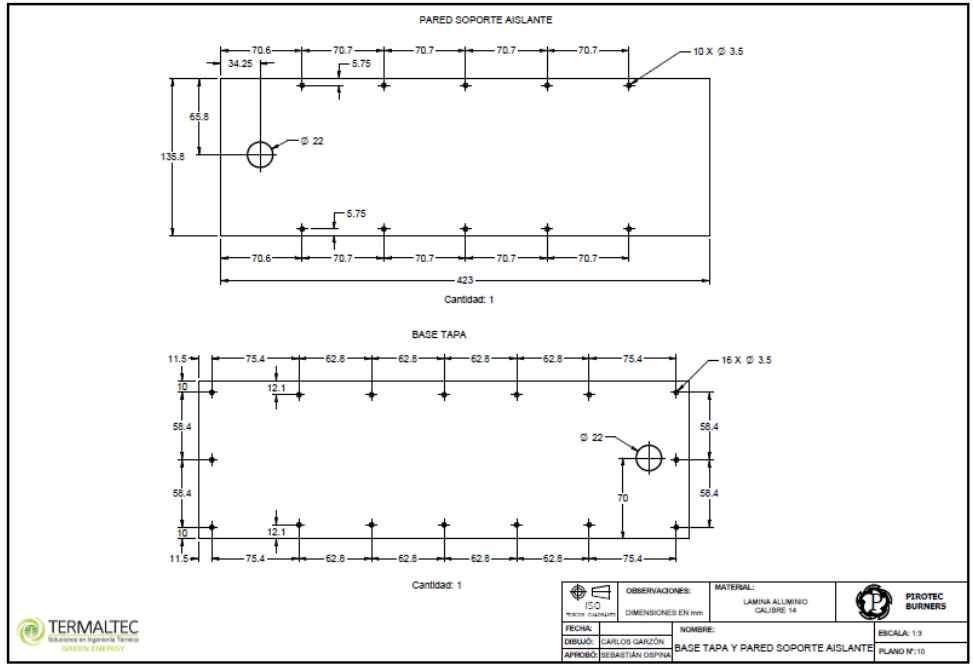
 150 TOLERANCIAS DIMENSIONES EN mm	OBSERVACIONES:	MATERIAL:	 PIROTEC BURNERS
		ALUMINIO	
FECHA:	NOMBRE:		ESCALA: 1:5
DIBUJÓ: CARLOS GARZÓN	COLECTOR SOLAR		PLANO N°: 01
APROBÓ: SEBASTIÁN OSPINA			

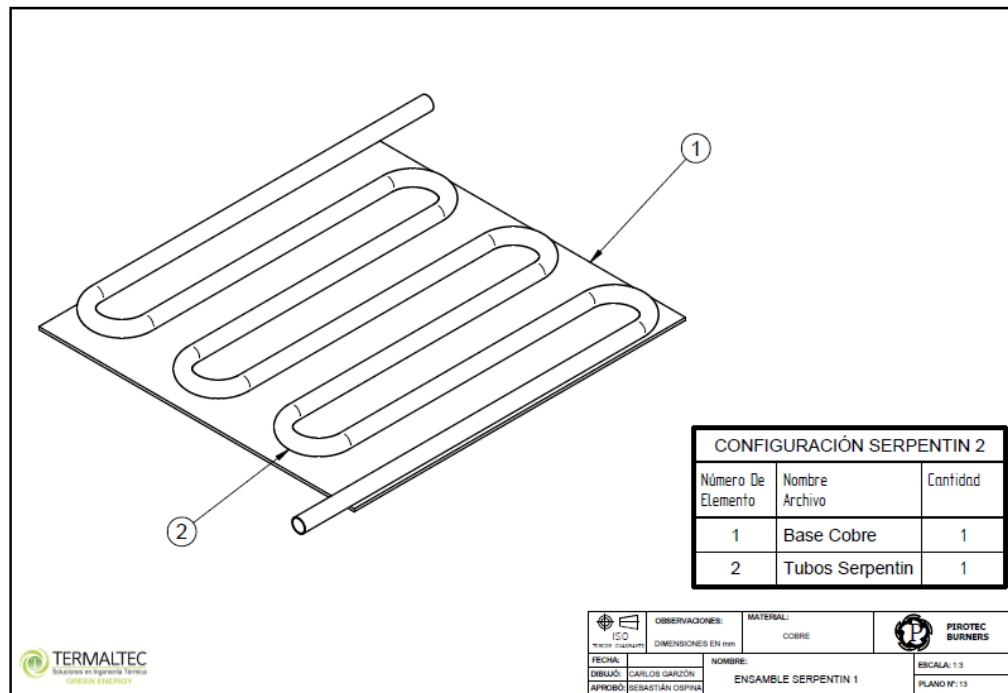
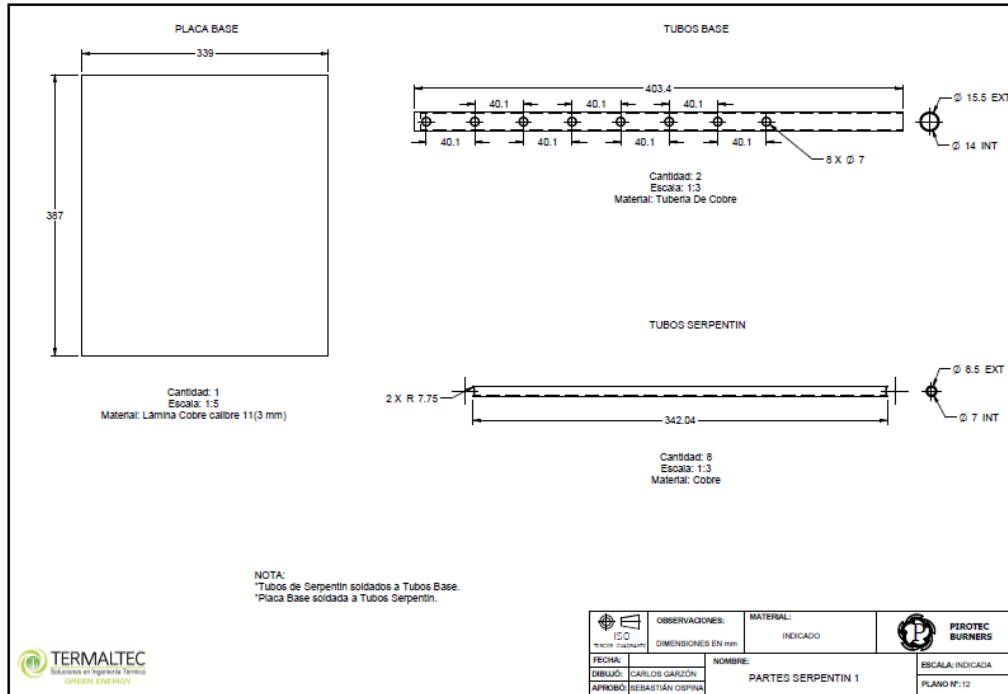


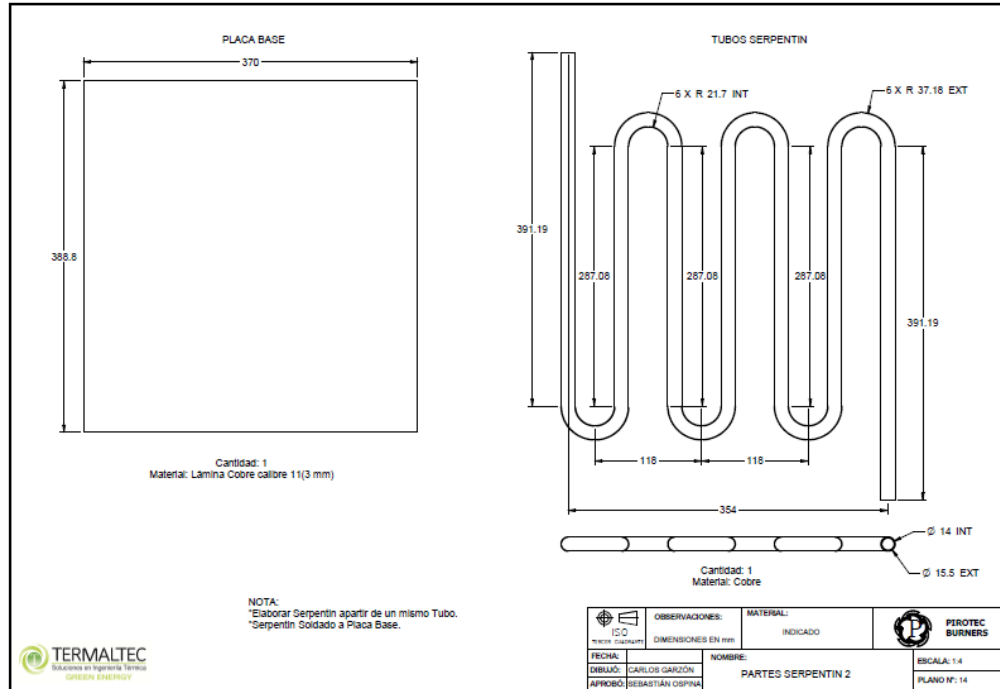












ANEXO 3. CODIGO EN MATLAB.

Anexo 3.1 Calculo de eficiencia y perdidas del colector.

```

%Solar Receiver Model
% Type 1: Flat plate collector
% Type 2: Parabolic trough collector
% Type 3: central receiver
Type = 1;
Iavg = 800; % w/m2
T7=298;T8=287;
%T1=360;
% Parameters to assess
tTIM = 6; % mm
eps_TIM=0.2;
eps3=eps_TIM;
eps4=eps_TIM;
%C = 400;
KTIM=1.25;
mu=2; % m^-1
Initial=298;
if (Type==1)
    Final=360;
end
if (Type==2)
    Final=1000;
end
if (Type==3)
    Final=1500;
end
Step=2;
nn=(Final-Initial)/Step;
Eff_r=zeros(nn+1,1);

```

```

Loss=zeros(nn+1,1);
Eff_ref=zeros(nn+1,1);
Qloss_ref=zeros(nn+1,1);
T1=zeros(nn+1,1);
Tlo=zeros(nn+1,1);
Temp=[Initial:Step:Final]';
for i = 1:nn+1
    T2=Temp(i);
    if (Type == 1)
        H=0.39;L=0.39;% units
t1=0.007;t2=0.0085;t3=0.5+t2;t4=t3+tTIM/1000;t5=t4+0.012;t6=t5+0.006;t7=t
6*1.1; % m
        m=(T2-T7)/(t2-t7);
        % T2o=T1+m*(t2-t1);
        T3o=T2+m*(t3-t2);T4o=T2+m*(t4-t2);T5o=T2+m*(t5-t2);T6o=T2+m*(t6-t2);
        Y0=[T3o T4o T5o T6o];
        Kab=385;Kgl=1.25;
        h2_3=5;h4_5=5;h7=20;
        eps2=0.1;eps5=0.87;eps6=0.87;
        Sig=5.67e-8; % W/m^2-K^4
        h1=20;
        Ldis = 0.02925; % m
        Kdis = 0.0165; % w/mK
        Adis = H*L; % m^2
        suma=t1+t1+t2+t3+t4+t5+t7+t6+Ldis;
        % 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 13 15 17 19
21
        P=[T2 T7 T8 t1 t2 t3 t4 t5 t6 t7 H L Kab KTIM Kgl h2_3 h4_5 h7 eps2
eps3 eps4 eps5 eps6 Sig h1 Ldis Kdis Adis];
        % 12 14 16 18
20
        Y=fsolve(@(Y) receivers(Y,P,Type),Y0);
        %Z0(1)=T2o;
        Z0(1)=T5o; Z0(2)=T6o;
        Z=fsolve(@(Z) receivers0(Z,P,Type),Z0);
        eta_cf = 1.0;
        C = 1.0;
        Tau=0.92; alpha=0.95; Rra=0.04;
        Aab=0.1369;
        % 1 2 3 4 5 6 7 8
        S=[Iavg eta_cf C Tau Rra mu alpha Aab];
        Q6=S(1)*S(2)*S(3)*S(8);
        Ir = Q6;
        Q5=Ir*S(4);
        Q4=Q5;
        Q3=Ir*S(4)*(1-S(5))*exp(-S(6)*(P(7)-P(6)));
        Q2=Ir*S(4)*((1-S(5))^2)*exp(-S(6)*(P(7)-P(6)));
        Q1=Ir*S(4)*S(7)*((1-S(5))^2)*exp(-S(6)*(P(7)-P(6)));
        Qr=Q1;
        Qr_0=Ir*S(4)*S(7);
        Rcd_1=(P(5)-P(4))/(P(13)*P(11)*P(12));
    end
    if (Type == 2)
        H=4;L=0.0;% units
t1=0.033;t2=0.035;t3=0.045;t4=t3+tTIM/1000;t5=t4+0.01;t6=t5+0.003;t7=t6*1
.1; % m
        m=(T2-T7)/(t2-t7);

```

```

%T2o=T1+m*(t2-t1);
T3o=T2+m*(t3-t2);T4o=T2+m*(t4-t2);T5o=T2+m*(t5-t2);T6o=T2+m*(t6-t2);
Y0=[T3o T4o T5o T6o];
Kab=400;Kgl=1.25;
h2_3=5;h4_5=5;h7=20;
eps2=0.27;eps5=0.86;eps6=0.86;
Sig=5.67e-8; % W/m^2-K^4
h1=20;
Ldis = 1.0; % m
Kdis = 10.0; % w/mK
Adis = 0.01; % m^2
% 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 13 15 17 19
21
P=[T2 T7 T8 t1 t2 t3 t4 t5 t6 t7 H L Kab KTIM Kgl h2_3 h4_5 h7 eps2
eps3 eps4 eps5 eps6 Sig h1 Ldis Kdis Adis];
% 12 14 16 18
20
Y=fsolve(@ (Y) receivers (Y,P,Type),Y0);
%Z0(1)=T2o;
Z0(1)=T5o; Z0(2)=T6o;
Z=fsolve(@ (Z) receivers0 (Z,P,Type),Z0);
eta_cf = 0.8;
C = 30;
Tau=0.92; alpha=0.95; Rra=0.04;
Aab=0.28;
% 1 2 3 4 5 6 7 8
S=[Iavg eta_cf C Tau Rra mu alpha Aab];
Q6=S(1)*S(2)*S(3)*S(8);
Ir = Q6;
Q5=Ir*S(4);%*(P(8)/P(9));
Q4=Q5;
Q3=Q4*(1-S(5))*exp(-S(6)*(P(7)-P(6)));%*(P(6)/P(7));
Q2=Q4*((1-S(5))^2)*exp(-S(6)*(P(7)-P(6)));%*(P(6)/P(7));
Qr=Q2*S(7);
Qr_0=Ir*S(4)*S(7);%*(P(6)/(P(6)+0.003));
Rcd_1=log(P(5)/P(4))/(2*pi()*P(13)*P(11));
end
if (Type == 3)
H=10.5;L=0.0;% units
t1=0.0285;t2=0.03015;t3=0.04015;t4=t3+tTIM/1000;t5=t4+0.01;t6=t5+0.003;t7
=t6*1.1; % m
m=(T2-T7)/(t2-t7);
%T2o=T1+m*(t2-t1);
T3o=T2+m*(t3-t2);T4o=T2+m*(t4-t2);T5o=T2+m*(t5-t2);T6o=T2+m*(t6-t2);
Y0=[T3o T4o T5o T6o];
Kab= 23.8; % 316 stainless steel
Kgl=1.25;
h2_3=5;h4_5=5;h7=20;
eps2=0.85;eps5=0.87;eps6=0.87;
Sig=5.67e-8; % W/m^2-K^4
h1=20;
Ldis = 4.2; % m
Kdis = Kab; % w/mK
Adis = 0.000304; % m^2
% 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 13 15 17 19
21

```

```

P=[T2 T7 T8 t1 t2 t3 t4 t5 t6 t7 H L Kab KTIM Kgl h2_3 h4_5 h7 eps2
eps3 eps4 eps5 eps6 Sig h1 Ldis Kdis Adis];
%
% 12 14 16 18
20
Y=fsolve(@(Y) receivers(Y,P,Type),Y0);
hr8=P(19)*P(24)*(P(3)+P(1))*(P(3)^2+P(1)^2);
Renv=P(26)/(P(27)*P(28));
Rr_1=1/(hr8*2*pi()*P(5)*P(11)*(1/2));
Rcv_2=1/(P(18)*2*pi()*P(5)*P(11)*(0.5));
Rtot01 = Rcv_2*Rr_1*Renv/(Rr_1*Renv+Rcv_2*Renv+Rcv_2*Rr_1);
eta_cf = 0.6;
C = 400;
Tau=0.92; alpha=0.95; Rra=0.04;
Aab=0.633;
% 1 2 3 4 5 6 7 8
S=[Iavg eta_cf C Tau Rra mu alpha Aab];
Q6=S(1)*S(2)*S(3)*S(8);
Ir = Q6;
Q5=Ir*S(4);%*(P(8)/P(9));
Q4=Q5;
Q3=Q4*(1-S(5))*exp(-S(6)*(P(7)-P(6)));%*(P(6)/P(7));
Q2=Q4*((1-S(5))^2)*exp(-S(6)*(P(7)-P(6)));%*(P(6)/P(7));
Qr=Q2*S(7);
Qr_0=Ir*S(7);
Rcd_1=log(P(5)/P(4))/(2*pi()*P(13)*P(11));
end
Rtot = resistances(Y,P,Type);
if (Type == 3)
    Rtot0=Rtot01;
else
    Rtot0 = resistances0(Z,P,Type);
end
Qloss = (P(1)-P(3))/Rtot;
Qloss_0 = (P(1)-P(3))/Rtot0;
QHTE = Qr - Qloss;
QHTE_0 = Qr_0 - Qloss_0;
T1(i)=T2-Rcd_1*QHTE;
T1o(i)=T2-Rcd_1*QHTE_0;
Eff = QHTE/Ir;
Eff_0 = QHTE_0/Ir;
Eff_r(i) = Eff;
Loss(i) = Qloss;
Eff_ref(i) = Eff_0;
Qloss_ref(i) = Qloss_0;
end
Result=cat(2,T1-273,T1o-273,Eff_r,Loss,Eff_ref,Qloss_ref);
%hold on;
%plot(Result(:,2),Result(:,5),'r',Result(:,1),Result(:,3),'b*')
%legend('Eficiencia del FPC con TIM','Eficiencia del FPC sin TIM');
hold on;
plot(Result(:,1),Result(:,6),'r',Result(:,1),Result(:,4),'b*');
%legend('perdidas de calor del FPC con TIM','perdidas de calor del FPC
sin TIM')

```

Anexo 3.2 Calculo de resistencias con TIM.

```

function Rtot = resistances(Y,P,Type)
if (Type == 1)

```

```

hr2_3=P(24)*(P(1)+Y(1))*(P(1)^2+Y(1)^2)/(1/P(19)+1/P(20)-1);
hr4_5=P(24)*(Y(2)+Y(3))*(Y(2)^2+Y(3)^2)/(1/P(21)+1/P(22)-1);
hr8=P(23)*P(24)*(P(3)+Y(4))*(P(3)^2+Y(4)^2);
Renv=P(26)/(P(27)*P(28));
Rr_1=1/(hr2_3*P(12)*P(11));
Rcv_2=1/(P(16)*P(12)*P(11));
Rcd_2=(P(7)-P(6))/(P(14)*P(12)*P(11));
Rr_2=1/(hr4_5*P(12)*P(11));
Rcv_3=1/(P(17)*P(12)*P(11));
Rcd_3=(P(9)-P(8))/(P(15)*P(12)*P(11));
Rr_3=1/(hr8*P(12)*P(11));
Rcv_4=1/(P(18)*P(12)*P(11));
Rtot =
((Rcv_2*Rr_1*Renv)/(Rcv_2+Rr_1)+Renv*Rcd_2+(Renv*Rcv_3*Rr_2)/(Rcv_3+Rr_2)
+Renv*Rcd_3+(Renv*Rcv_4*Rr_3)/(Rcv_4+Rr_3))/(Renv+(Rcv_2*Rr_1)/(Rcv_2+Rr_
1)+Rcd_2+(Rcv_3*Rr_2)/(Rcv_3+Rr_2)+Rcd_3+(Rcv_4*Rr_3)/(Rcv_4+Rr_3));
end
if (Type == 2)
hr2_3=P(24)*(P(1)+Y(1))*(P(1)^2+Y(1)^2)/(1/P(19)+(1-
P(20))/P(20))*P(5)/P(6));
hr4_5=P(24)*(Y(2)+Y(3))*(Y(2)^2+Y(3)^2)/(1/P(21)+(1-
P(22))/P(22))*P(7)/P(8));
hr8=P(23)*P(24)*(P(3)+Y(4))*(P(3)^2+Y(4)^2);
Renv=P(26)/(P(27)*P(28));
Rr_1=1/(hr2_3*2*pi()*P(5)*P(11));
Rcv_2=1/(P(16)*2*pi()*P(5)*P(11));
Rcd_2=log(P(7)/P(6))/(2*pi()*P(14)*P(11));
Rr_2=1/(hr4_5*2*pi()*P(7)*P(11));
Rcv_3=1/(P(17)*2*pi()*P(7)*P(11));
Rcd_3=log(P(9)/P(8))/(2*pi()*P(15)*P(11));
Rr_3=1/(hr8*2*pi()*P(9)*P(11));
Rcv_4=1/(P(18)*2*pi()*P(9)*P(11));
Rtot =
((Rcv_2*Rr_1*Renv)/(Rcv_2+Rr_1)+Renv*Rcd_2+(Renv*Rcv_3*Rr_2)/(Rcv_3+Rr_2)
+Renv*Rcd_3+(Renv*Rcv_4*Rr_3)/(Rcv_4+Rr_3))/(Renv+(Rcv_2*Rr_1)/(Rcv_2+Rr_
1)+Rcd_2+(Rcv_3*Rr_2)/(Rcv_3+Rr_2)+Rcd_3+(Rcv_4*Rr_3)/(Rcv_4+Rr_3));
end
if (Type == 3)
hr2_3=P(24)*(P(1)+Y(1))*(P(1)^2+Y(1)^2)/(2/(pi()*P(19))+1/P(20)-1);
hr4_5=P(24)*(Y(2)+Y(3))*(Y(2)^2+Y(3)^2)/(1/P(21)+1/P(22)-1);
hr8=P(23)*P(24)*(P(3)+Y(4))*(P(3)^2+Y(4)^2);
Renv=P(26)/(P(27)*P(28));
Rr_1=1/(hr2_3*2*P(5)*P(11));
Rcv_2=1/(P(16)*2*pi()*P(5)*P(11)*(0.5));
Rcd_2=(P(7)-P(6))/(P(14)*2*P(5)*P(11));
Rr_2=1/(hr4_5*2*P(5)*P(11));
Rcv_3=1/(P(17)*2*P(5)*P(11));
Rcd_3=(P(9)-P(8))/(P(15)*2*P(5)*P(11));
Rr_3=1/(hr8*2*P(5)*P(11));
Rcv_4=1/(P(18)*2*P(5)*P(11));
Rtot =
((Rcv_2*Rr_1*Renv)/(Rcv_2+Rr_1)+Renv*Rcd_2+(Renv*Rcv_3*Rr_2)/(Rcv_3+Rr_2)
+Renv*Rcd_3+(Renv*Rcv_4*Rr_3)/(Rcv_4+Rr_3))/(Renv+(Rcv_2*Rr_1)/(Rcv_2+Rr_
1)+Rcd_2+(Rcv_3*Rr_2)/(Rcv_3+Rr_2)+Rcd_3+(Rcv_4*Rr_3)/(Rcv_4+Rr_3));
end
end

```

Anexo 3.3. Calculo de resistencias sin TIM.

```
function Rtot0 = resistances0(Z,P,Type)
if (Type == 1)
    hr4_5=P(24)*(P(1)+Z(1))*(P(1)^2+Z(1)^2)/(1/P(19)+1/P(22)-1);
    hr8=P(23)*P(24)*(P(3)+Z(2))*(P(3)^2+Z(2)^2);
    Renv=P(26)/(P(27)*P(28));
    Rr_1=1/(hr4_5*P(12)*P(11));
    Rcv_2=1/(P(17)*P(12)*P(11));
    Rcd_3=(P(9)-P(8))/(P(15)*P(12)*P(11));
    Rr_3=1/(hr8*P(12)*P(11));
    Rcv_4=1/(P(18)*P(12)*P(11));
    RtotA = Rcv_2*Rr_1/(Rcv_2+Rr_1)+Rcd_3+Rcv_4*Rr_3/(Rcv_4+Rr_3);
    Rtot0 = RtotA/(1+(1/Renv)*RtotA);
end
if (Type == 2)
    hr4_5=P(24)*(P(1)+Z(1))*(P(1)^2+Z(1)^2)/(1/P(19)+(1-
P(22))/P(22))*P(5)/P(8));
    hr8=P(23)*P(24)*(P(3)+Z(2))*(P(3)^2+Z(2)^2);
    Renv=P(26)/(P(27)*P(28));
    Rr_1=1/(hr4_5*2*pi()*P(5)*P(11));
    Rcv_2=1/(P(17)*2*pi()*P(5)*P(11));
    Rcd_3=log(P(9)/P(8))/(2*pi()*P(15)*P(11));
    Rr_3=1/(hr8*2*pi()*P(9)*P(11));
    Rcv_4=1/(P(18)*2*pi()*P(9)*P(11));
    RtotA = Rcv_2*Rr_1/(Rcv_2+Rr_1)+Rcd_3+Rcv_4*Rr_3/(Rcv_4+Rr_3);
    Rtot0 = RtotA/(1+(1/Renv)*RtotA);
end
end
```

Anexo 3.4. Calculo de receptores con TIM.

```
function F = receivers(Y,P,Type)
if (Type == 1)
    %T2=Y(1);
    T3=Y(1);
    T4=Y(2);
    T5=Y(3);
    T6=Y(4);
    %fa=P(13)*P(12)*P(11)*(P(1)-T2)/(P(5)-P(4))-P(16)*P(12)*P(11)*(T2-T3)-
P(12)*P(11)*P(24)*(T2^4-T3^4)/(1/P(19)+1/P(20)-1)-P(27)*P(28)*(T2-
P(2))/P(26);
    fb=P(16)*P(12)*P(11)*(P(1)-T3)+P(12)*P(11)*P(24)*(P(1)^4-
T3^4)/(1/P(19)+1/P(20)-1)-P(14)*P(11)*P(12)*(T3-T4)/(P(7)-P(6));
    fc=P(14)*P(11)*P(12)*(T3-T4)/(P(7)-P(6))-P(17)*P(12)*P(11)*(T4-T5)-
P(12)*P(11)*P(24)*(T4^4-T5^4)/((1/P(21))+1/P(22))-1);
    fd=P(17)*P(12)*P(11)*(T4-T5)+P(12)*P(11)*P(24)*(T4^4-
T5^4)/((1/P(21))+1/P(22))-1)-P(15)*P(12)*P(11)*(T5-T6)/(P(9)-P(8));
    fe=P(15)*P(12)*P(11)*(T5-T6)/(P(9)-P(8))-P(18)*P(11)*P(12)*(T6-P(2))-
P(23)*P(24)*P(12)*P(11)*(T6^4-P(3)^4);
    %F=[fa;fb;fc;fd;fe];
    F=[fb;fc;fd;fe];
end
if (Type == 2)
    %T2=Y(1);
    T3=Y(1);
    T4=Y(2);
    T5=Y(3);
    T6=Y(4);
```

```

%fa=P(13)*2*pi()*P(11)*(P(1)-T2)/(log(P(5)/P(4)))-
P(16)*2*pi()*P(5)*P(11)*(T2-T3)-2*pi()*P(5)*P(11)*P(24)*(T2^4-
T3^4)/(1/P(19)+((1-P(20))/P(20))*(P(5)/P(6)))-P(27)*P(28)*(T2-
P(2))/P(26);
fb=P(16)*2*pi()*P(5)*P(11)*(P(1)-T3)+2*pi()*P(5)*P(11)*P(24)*(P(1)^4-
T3^4)/(1/P(19)+((1-P(20))/P(20))*(P(5)/P(6)))-P(14)*2*pi()*P(11)*(T3-
T4)/log(P(7)/P(6));
fc=P(14)*2*pi()*P(11)*(T3-T4)/log(P(7)/P(6))-P(17)*2*pi()*P(7)*P(11)*(T4-
T5)-2*pi()*P(7)*P(11)*P(24)*(T4^4-T5^4)/((1/P(21))+((1-
P(22))/P(22))*(P(7)/P(8)));
fd=P(17)*2*pi()*P(7)*P(11)*(T4-T5)+2*pi()*P(7)*P(11)*P(24)*(T4^4-
T5^4)/((1/P(21))+((1-P(22))/P(22))*(P(7)/P(8)))-P(15)*2*pi()*P(11)*(T5-
T6)/log(P(9)/P(8));
fe=P(15)*2*pi()*P(11)*(T5-T6)/log(P(9)/P(8))-P(18)*2*pi()*P(9)*P(11)*(T6-
P(2))-P(23)*P(24)*2*pi()*P(9)*P(11)*(T6^4-P(3)^4);
%F=[fa;fb;fc;fd;fe];
F=[fb;fc;fd;fe];
end
if (Type == 3)
%T2=Y(1);
T3=Y(1);
T4=Y(2);
T5=Y(3);
T6=Y(4);
%fa=P(13)*2*pi()*P(11)*(P(1)-T2)/(log(P(5)/P(4)))-
P(16)*2*pi()*P(5)*P(11)*(0.5)*(T2-T3)-2*P(5)*P(11)*P(24)*(T2^4-
T3^4)/(2/(pi()*P(19))+1/P(20)-1)-P(27)*P(28)*(T2-P(2))/P(26);
fb=P(16)*2*pi()*P(5)*P(11)*(0.5)*(P(1)-T3)+2*P(5)*P(11)*P(24)*(P(1)^4-
T3^4)/(2/(pi()*P(19))+1/P(20)-1)-P(14)*2*P(5)*P(11)*(T3-T4)/(P(7)-P(6));
fc=P(14)*2*P(5)*P(11)*(T3-T4)/(P(7)-P(6))-P(17)*2*P(5)*P(11)*(T4-T5)-
2*P(5)*P(11)*P(24)*(T4^4-T5^4)/((1/P(21))+1/P(22))-1);
fd=P(17)*2*P(5)*P(11)*(T4-T5)+2*P(5)*P(11)*P(24)*(T4^4-
T5^4)/((1/P(21))+1/P(22))-1)-P(15)*2*P(5)*P(11)*(T5-T6)/(P(9)-P(8));
fe=P(15)*2*P(5)*P(11)*(T5-T6)/(P(9)-P(8))-P(18)*2*P(5)*P(11)*(T6-P(2))-
P(23)*P(24)*2*P(5)*P(11)*(T6^4-P(3)^4);
%F=[fa;fb;fc;fd;fe];
F=[fb;fc;fd;fe];
end
end

```

Anexo 3.5. Calculo de receptores sin TIM.

```

function F0 = receivers0(Z,P,Type)
if (Type == 1)
%T2=Z(1);
T5=Z(1);
T6=Z(2);
% fa=P(13)*P(12)*P(11)*(P(1)-T2)/(P(5)-P(4))-P(17)*P(12)*P(11)*(T2-
T5)-P(12)*P(11)*P(24)*(T2^4-T5^4)/(1/P(19)+1/P(22)-1)-P(27)*P(28)*(T2-
P(2))/P(26);
fb=P(17)*P(12)*P(11)*(P(1)-T5)+P(12)*P(11)*P(24)*(P(1)^4-
T5^4)/(1/P(19)+1/P(22)-1)-P(15)*P(12)*P(11)*(T5-T6)/(P(9)-P(8));
fc=P(15)*P(12)*P(11)*(T5-T6)/(P(9)-P(8))-P(18)*P(11)*P(12)*(T6-P(2))-
P(23)*P(24)*P(12)*P(11)*(T6^4-P(3)^4);
F0=[fb;fc];
end
if (Type == 2)
%T2=Z(1);

```

```

T5=Z(1);
T6=Z(2);
%fa=P(13)*2*pi()*P(11)*(P(1)-T2)/(log(P(5)/P(4)))-
P(17)*2*pi()*P(5)*P(11)*(T2-T5)-2*pi()*P(5)*P(11)*P(24)*(T2^4-
T5^4)/(1/P(19)+((1-P(22))/P(25))*(P(5)/P(8)))-P(27)*P(28)*(T2-
P(2))/P(26);
fb=P(17)*2*pi()*P(5)*P(11)*(P(1)-T5)+2*pi()*P(5)*P(11)*P(24)*(P(1)^4-
T5^4)/(1/P(19)+((1-P(22))/P(25))*(P(5)/P(8)))-P(15)*2*pi()*P(11)*(T5-
T6)/log(P(9)/P(8));
fc=P(15)*2*pi()*P(11)*(T5-T6)/log(P(9)/P(8))-
P(18)*2*pi()*P(9)*P(11)*(T6-P(2))-P(23)*P(24)*2*pi()*P(9)*P(11)*(T6^4-
P(3)^4);
F0=[fb;fc];
end
if (Type == 3)
    %T2=Z(1);
    %fa=P(13)*2*pi()*P(11)*(P(1)-T2)/(log(P(5)/P(4)))-
P(18)*2*pi()*P(5)*P(11)*(1/2)*(T2-P(2))-
P(19)*P(24)*2*pi()*P(5)*P(11)*(1/2)*(T2^4-P(3)^4)-P(27)*P(28)*(T2-
P(2))/P(26);
    %F0=[fa];
end
end

```