

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN COLECTOR SOLAR DE TUBOS AL VACÍO

NELSON EDUARDO JAIMES ARDILA

SERGIO ARMANDO RIVERO GEREDA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO -MECÁNICAS

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

BUCARAMANGA

2012

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN COLECTOR SOLAR DE TUBOS AL VACÍO

NELSON EDUARDO JAIMES ARDILA

SERGIO ARMANDO RIVERO GEREDA

**Trabajo de grado para optar por el título de
Ingeniero Mecánico**

Director

OMAR A. GÉLVEZ AROCHA

Ingeniero Mecánico

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO -MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2012

DEDICATORIA

A Dios todo poderoso por su infinito amor.

A mi madre Gilma Ardila por su amor, paciencia y comprensión.

A mis hermanas Paola Andrea Jaimes y María Isabel Jaimes por su apoyo incondicional.

A mi compañero y amigo Camilo Antonio Sánchez por su ayuda incondicional.

A Katherin Natalia Acuña por su ayuda, comprensión y cariño.

Nelson Eduardo Jaimes

DEDICATORIA

A mi madre querida Esperanza Gereda Mendoza por su apoyo incondicional.

Y la musa de mi inspiración Julieth Suesca.

Sergio Armando Rivero

AGRADECIMIENTOS

Al ingeniero Omar Armando Gelvez Arocha, docente de la Escuela de Ingeniería Mecánica, por su confianza, colaboración, conocimiento, formación académica y apoyo en el desarrollo de este proyecto de grado.

A la dirección de mantenimiento tecnológico de la Universidad Industrial de Santander por su colaboración en la manufactura de los tubos de calor.

A todos nuestros amigos y compañeros de la Universidad por su amistad.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	24
1 RADIACIÓN SOLAR	27
1.1 GENERALIDADES DE LA RADIACIÓN SOLAR.....	27
1.2 DETERMINACIÓN DE LA INCLINACIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR θ RESPECTO A UNA SUPERFICIE.....	28
1.2.1 Factores dependientes del movimiento de la tierra.	28
1.2.2 Factores dependientes de la ubicación de la tierra.....	32
1.2.3 Calculo de inclinación de radiación solar θ para diferentes superficies...	34
1.3 CALCULO DE LA IRRADIANCIA (q_s) PARA UN PLANO SOBRE LA SUPERFICIE TERRESTRE.....	36
1.3.1 La constante solar I_0	37
1.3.2 Atenuación de la radiación solar.....	38
1.3.3 Métodos para la determinación de la irradiancia a nivel terrestre.	40
1.3.4 Irradiancia	44
1.4 MAPAS DE RADIACIÓN SOLAR.....	44
1.4.1 Radiación Solar Mundial.....	45
1.4.2 Radiación Solar en Colombia.....	46
2 ENERGÍAS ALTERNATIVAS	48
2.1 FUENTES DE ENERGÍA RENOVABLE.....	48
2.2 NORMAS QUE REGULAN EN COLOMBIA LA SEGURIDAD AMBIENTAL Y USO DE ENERGÍA	49
2.2.1 Protocolo de Kyoto.....	49
2.2.2 Convenio de Viena.....	50
2.2.3 ISO 50001.....	51
2.2.4 Ley URE 697 del 2001.....	51
2.3 ENERGÍA SOLAR.	51
2.3.1 Energía solar fotovoltaica.....	51

2.3.2	Aplicaciones de la energía solar fotovoltaica.....	53
2.3.3	Energía solar térmica.....	55
2.3.4	Aplicaciones de la energía solar térmica.....	55
2.4	ENERGÍA SOLAR EN COLOMBIA.	56
2.4.1	Sistemas fotovoltaicos en Colombia.....	56
2.4.2	Colectores solares en Colombia.....	57
3	COLECTORES SOLARES.....	59
3.1	CLASIFICACIÓN DE LOS COLECTORES SOLARES.....	59
3.1.1	Colector de placa plana (FPC).....	59
3.1.2	Colectores de concentración parabólicos.....	61
3.1.3	Colector de tubos de vacío (ETC).....	64
3.2	EFICIENCIA EN LOS COLECTORES SOLARES	70
3.3	APLICACIÓN DE COLECTORES SOLARES A NIVEL INDUSTRIAL	74
4	DISEÑO DE TUBOS DE CALOR	77
4.1	MATERIALES Y COMPONENTES	77
4.1.1	Fluidos de trabajo.....	78
4.1.2	Mecha o estructura capilar.....	81
4.1.3	Contenedor.....	84
4.2	PROCESO DE DISEÑO DE TUBOS DE CALOR.....	86
4.2.1	Determinación de los parámetros de diseño.....	88
4.2.2	Selección de materiales.....	89
4.2.3	Evaluación de límites de operación.....	89
4.2.4	Estudio de la transferencia de calor un tubo de calor.....	95
4.2.5	Evaluación del desempeño del tubo de calor.....	97
5	DESARROLLO DEL MODELO EXPERIMENTAL DE UN COLECTOR SOLAR DE TUBOS AL VACÍO.....	100
5.1	DESCRIPCIÓN DEL COLECTOR SOLAR DE TUBOS DE VACÍO	100
5.1.1	Estructura.....	101

5.1.2	Sistema hidráulico.....	104
5.1.3	Sistema captador de energía.	107
5.1.4	Sistema de monitoreo y control.	110
5.2	DESCRIPCIÓN DEL DISEÑO DE TUBOS CALOR.....	113
5.2.1	Determinación de los parámetros de diseño.	114
5.2.2	Selección de los materiales.	116
5.2.3	Evaluación de los límites de desempeño.	118
5.2.4	Manufactura de los tubos de calor	124
5.3	DESCRIPCIÓN DEL MONTAJE DE TUBOS DE VACÍO CON TUBOS DE CALOR.....	127
5.4	DESCRIPCIÓN DEL MONTAJE DE TUBOS DE VACÍO CON TUBOS CONDUCTORES DE FLUIDO.....	129
5.5	PROGRAMA PARA EL MONITOREO DEL COLECTOR SOLAR DE TUBOS AL VACÍO	130
5.5.1	Ventana del usuario o panel frontal.	131
5.5.2	Ventana de programación o diagrama de bloques.	134
6	ANÁLISIS TERMODINÁMICO DE COLECTORES SOLARES DE TUBOS DE VACÍO.	136
6.1	DETERMINACIÓN DE LA IRRADIANCIA SOBRE LOS TUBOS DE VACÍO.	136
6.1.1	Radiación directa sobre los tubos de vacío.	137
6.1.2	Radiación difusa sobre los tubos de vacío.....	138
6.1.3	Radiación reflejada sobre los tubos de vacío.....	139
6.2	MODELADO DEL COLECTOR SOLAR DE TUBOS AL VACÍO.....	140
6.2.1	Comportamiento teórico de colector solar de tubos al vacío con tubos conductores de fluido.	147
6.2.2	Comportamiento teórico del colector solar de tubos de vacío con tubos de calor.....	148

6.2.3	Influencia de la variación de las condiciones del sistema en la eficiencia del colector solar de tubos al vacío	149
7	DESARROLLO DE PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	154
7.1	DESCRIPCIÓN DE PRUEBAS DE DESEMPEÑO	154
7.2	DESEMPEÑO DE TUBOS AL VACÍO CON TUBOS CONDUCTORES DE FLUIDO.....	158
7.3	DESEMPEÑO DE TUBOS AL VACÍO CON TUBOS DE CALOR.....	167
7.4	EVALUACIÓN DEL MODELO TEÓRICO EN RELACIÓN AL ANÁLISIS EXPERIMENTAL	169
7.4.1	Validación del modelo de colector solar de tubos al vacío con tubos conductores de fluido.	170
7.4.2	Validación del modelo de colector solar de tubos al vacío con tubos de calor.....	171
	CONCLUSIONES.....	173
	RECOMENDACIONES.....	177
	BIBLIOGRAFÍA.....	178
	ANEXOS.....	179

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Espectro de la radiación solar.....	27
Figura 2: Movimientos de rotación, precesión y nutación terrestre.	29
Figura 3: Declinación de la tierra respecto al plano elíptico	30
Figura 4: Variación del ángulo de declinación sobre una superficie ($\varphi=0^\circ$)	30
Figura 5: Variación del ángulo horario ω	31
Figura 6: Latitud terrestre.....	32
Figura 7: Inclinación de una superficie respecto a la horizontal.....	33
Figura 8: Azimut solar y azimut de pared para una superficie inclinada.	34
Figura 9: Angulo incidente de la radiación solar sobre una superficie inclinada. .	35
Figura 10: Absorción de la radiación en la atmosfera.	38
Figura 11: Piranometro.	40
Figura 12: Pirheliómetro.....	41
Figura 13: Actinógrafo.....	42
Figura 14: Heliógrafo.....	42
Figura 15: Irradiación solar promedio global.	45
Figura 16: Promedio multianual radiación solar en Colombia.	47
Figura 17: Aumento de concentración de CO2 desde los años 60.	49
Figura 18: Posición de los países en el 2011 por el protocolo de Kioto.....	50
Figura 19: Panel solar flexible CIGS.	52
Figura 20: Satélites artificiales.	54
Figura 21: Mochila con celdas fotovoltaica para almacenar carga.....	54
Figura 22: Colector de placa plana.	60
Figura 23: Colector solar de placa plana avanzado	61
Figura 24: Colector solar de concentración parabólico.	62
Figura 25: Colector solar parabólico con seguimiento.	63
Figura 26: Clasificación de los colectores solares de tubos al vacío	64
Figura 27: Colector solar evacuado Corning.....	65
Figura 28: Colector solar evacuado Owen Illinois.	66

Figura 29: Colector solar de tubos de vacío de flujo natural.	67
Figura 30: Funcionamiento y estructura de un tubo de vacío con tubo de calor o heat pipe.	68
Figura 31: Diferencia entre un termosifón y un tubo de calor.....	69
Figura 32: Colector de tubos de vacío con tubo conductor de fluido.	69
Figura 33: Análisis de la radiación incidente sobre una placa absorbente.....	70
Figura 34: Curvas de eficiencia de colectores en función de la diferencia de temperaturas.....	74
Figura 35: Funcionamiento de un tubo de calor.....	77
Figura 36: Numero de Merit para fluidos de trabajo de temperatura media.	80
Figura 37: Estructuras capilares usadas en tubos de calor.....	81
Figura 38: Estructuras capilares homogéneas usadas comercialmente.	82
Figura 39: Estructura de una mecha arterial.	84
Figura 40: Proceso de diseño para tubos de calor.....	87
Figura 41: Límites de operación en tubos de calor.	94
Figura 42: Límites de operación para un tubo de calor con agua como fluido de trabajo.....	95
Figura 43: Caídas de temperatura y resistencia térmica equivalente en tubos de calor.....	96
Figura 44: Montaje para evaluación del desempeño en tubos de calor.	98
Figura 45: Perfil de temperatura en un tubo de calor bajo prueba.	99
Figura 46: Sub-sistemas y elementos del colector solar de tubos al vacío.....	100
Figura 47: Sub-sistemas del colector solar de tubos al vacío.	101
Figura 48: Superficies reflectoras.	103
Figura 49: Elementos del subsistema estructural.	103
Figura 50: Tanque del colector solar de tubos al vacío.....	105
Figura 51: Manifold para implementación con tubos de calor.	107
Figura 52: Aletas para tubos evacuados.....	109
Figura 53: Tubos de calor y tubos en U.	109
Figura 54: Modulo de Field Point FP-1000.....	111

Figura 55: Modulo de Field point FP-TC-120.....	112
Figura 56: Ubicación de las termocupas en el colector solar.	113
Figura 57: Dimensiones requeridas del tubo de calor.....	114
Figura 58: Radiación total y radiación difusa. (Laboratorio de sistemas térmicos UIS).....	115
Figura 59: Límite capilar Vs temperatura de operación para el tubo de calor diseñado.	118
Figura 60: Límite viscoso Vs temperatura de operación para el tubo de calor diseñado.	120
Figura 61: Límite sónico Vs temperatura de operación para el tubo de calor diseñado.	121
Figura 62: Límite evaporativo Vs temperatura de operación para el tubo de calor diseñado.	122
Figura 63: Límite de arrastre Vs temperatura de operación para el tubo de calor diseñado.	123
Figura 64: Influencia de los límites de operación en el desempeño del tubo de calor.	124
Figura 65: Limpieza del contenedor.....	125
Figura 66: Introducción de la mecha o estructura capilar.....	125
Figura 67: Sellado y carga del fluido de trabajo.	126
Figura 68: Procedimiento de vacío.	127
Figura 69: Montaje de tubos de calor en el interior de los tubos de vacío.	128
Figura 70: Ensamble de tubos de calor con el Manifold.	128
Figura 71: Montaje de tubos en U en el interior de los tubos de vacío.	129
Figura 72: Ensamble de tubos de colector solar de tubos de vacío con tubo conductor de fluido.....	130
Figura 73: Ventana de presentación.	131
Figura 74: Ventana “Colector solar de tubos al vacío”	132
Figura 75: Ventana de programación.....	134
Figura 76: Radiación directa sobre una superficie cilíndrica.	137

Figura 77: Radiación difusa sobre una superficie cilíndrica.	138
Figura 78: Diagrama de flujo para la determinación del comportamiento del colector solar de tubos de vacío.....	141
Figura 79: Diagrama de flujo para la determinación del calor ganado por el fluido.	143
Figura 80: Esquema de resistencias térmicas para colector con conductos de flujo.	144
Figura 81: Esquema de resistencias térmicas para tubos de calor.	145
Figura 82: Eficiencia teórica del colector solar de tubos de vacío con tubos conductores de fluido.....	147
Figura 83: Eficiencia teórica del colector solar de tubos de vacío con tubos de calor.....	148
Figura 84: Influencia del caudal en la eficiencia del colector solar de tubos al vacío.	150
Figura 85: Influencia de la emisividad de la superficie en la eficiencia del colector solar de tubos al vacío.	151
Figura 86: Influencia del $\tau\alpha$ de los tubos de vacío en la eficiencia del colector solar.....	152
Figura 87: Influencia del aislamiento del tanque en la eficiencia del colector solar de tubos al vacío.....	153
Figura 88: Variación de la eficiencia en función de la radiación.....	155
Figura 89: Eficiencia del colector solar de tubos al vacío con tubos conductores de fluido (Superficie en acero inoxidable y flujo másico de 0.04 Kg/s)	160
Figura 90: Eficiencia del colector solar de tubos al vacío con tubos conductores de fluido (Superficie en acero inoxidable y flujo másico de 0.02 Kg/s)	161
Figura 91: Eficiencia del colector solar de tubos al vacío con tubos conductores de fluido (Superficie blanca y Flujo másico de 0.04 Kg/s).....	163
Figura 92: Eficiencia del colector solar de tubos al vacío con tubos conductores de fluido (Superficie negra y Flujo másico de 0.04 Kg/s)	164
Figura 93: Eficiencia del colector solar con variación del caudal.	165

Figura 94: Eficiencia del colector solar con variación en la superficie reflectora.	166
Figura 95: Eficiencia del colector solar con variación en la superficie reflectora (Influencia de la reflectividad).	167
Figura 96: Eficiencia del colector solar de tubos al vacío con tubos de calor (Superficie en acero inoxidable y Flujo másico de 0.062 Kg/s).....	168
Figura 97: Comparativo eficiencia de colector con tubo conductor de fluido y tubos de calor (Superficie en acero inoxidable).	169
Figura 98: Eficiencia del colector solar de tubos al vacío con tubos conductores de fluido (Resultado experimental Vs Modelo teórico).....	170
Figura 99: Eficiencia del colector solar de tubos al vacío con tubos de calor (Resultado experimental Vs Modelo teórico)	171

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Comparación de la eficiencia en los nuevos paneles solares.	53
Tabla 2: Características de un colector solar de placa plana FPC	60
Tabla 3: Características de un colector de placa plana avanzado AFP.	61
Tabla 4: Características de un colector solar parabólico CPC.	62
Tabla 5: Características de un colector solar parabólico con seguimiento PTC....	63
Tabla 6: Rango de temperaturas en diversos procesos industriales.	75
Tabla 7: Rangos de temperatura de operación para fluidos de trabajo en tubos de calor.	79
Tabla 8: Datos de radio de efectivo de poro y permeabilidad para diversos tipos materiales.	83
Tabla 9: Datos de compatibilidad para fluidos de trabajo de bajas temperaturas.	85
Tabla 10: Características de operación de la bomba roto dinámica.	105
Tabla 11: Características de la tubería de cpvc ½”	106
Tabla 12: Características de manguera parker ½”	106
Tabla 13: Características de tubos de vacío implementados para el colector solar.	108
Tabla 14: Características de operación de los tubos de calor	115
Tabla 15: Características de fibra de vidrio usada como estructura capilar.	117
Tabla 16: Tubería rígida de cobre tipo I.....	117
Tabla 17: Datos para determinar el límite viscoso a 100°C.....	119
Tabla 18: Datos para determinar el límite sónico a 100°C.....	120
Tabla 19: Datos para determinar el límite evaporativo a 100°C.	121
Tabla 20: Datos para determinar el límite de arrastre a 100°C.....	123
Tabla 21: Pruebas de desempeño de colector solar de tubos al vacío.	157
Tabla 22: Datos promedio para pruebas con tubos conductores de fluido y superficie en acero inoxidable (Flujo másico de 0.04 kg/s).....	159
Tabla 23: Datos promedio para pruebas con tubos conductores de fluido y superficie en acero inoxidable (Flujo másico de 0.02 kg/s).....	160

Tabla 24: Datos promedio para pruebas con tubo conductor de fluido y superficie blanca (Flujo másico de 0.04 kg/s).	162
Tabla 25: Datos promedio para pruebas con tubos conductores de fluido y superficie negra (Flujo másico de 0.04 kg/s).....	163
Tabla 26: Datos promedio para pruebas con tubos de calor y superficie en acero inoxidable (flujo másico 0.062 kg/s).	168

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A: RESISTENCIAS TÉRMICAS PARA ANÁLISIS DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN TUBOS DE CALOR.	180
ANEXO B: DATOS DE HORA, RADIACIÓN DIRECTA, RADIACIÓN DIFUSA Y TEMPERATURA AMBIENTE REGISTRADOS EN EL LABORATORIO DE SISTEMAS TÉRMICOS DE LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER (SABADO 11 DE FEBRERO DE 2012).....	183
ANEXO C: GUÍA DE PRACTICA DE LABORATORIO DE SISTEMAS TÉRMICOS	193
ANEXO D: PLANOS DEL COLECTOR SOLAR DE TUBOS AL VACÍO.	218

RESUMEN

TITULO:

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN COLECTOR SOLAR DE TUBOS AL VACÍO*

AUTORES:

Nelson Eduardo Jaimes Ardila

Sergio Armando Rivero Gereda.**

PALABRAS CLAVES:

Transferencia de calor, tubos de calor, colector solar, tubos de vacío, energía alternativa.

DESCRIPCIÓN:

En la actualidad la búsqueda de nuevas alternativas energéticas que permitan mitigar el impacto ambiental causado por las fuentes convencionales de energía se ha convertido en un amplio campo de estudio a nivel ingenieril en búsqueda de la sostenibilidad energética.

Reconociendo a la energía solar como la fuente de energía renovable con mayor potencial debido a los grandes avances presentes en el desarrollo de nuevas tecnologías, la reducción de los costos de producción y el aumento en la eficiencia de los sistemas se establece como objetivo de este proyecto de grado el diseño y construcción de un sistema de captación de energía solar térmica basados en los últimos elementos disponibles para esta aplicación como lo son los colectores solar de tubos de vacío, mediante el cual se procede a desarrollar un modelo experimental para el desarrollo de pruebas de desempeño teniendo en cuenta la aplicación de tubos conductores de fluido o tubos de calor como medio para transferir el calor desde los tubos de vacío hacia el fluido calo-portador. Además, se procede al desarrollo de un modelo teórico de estos sistemas con el objetivo de establecer herramientas para su diseño.

Como resultado de la investigación se pudo evidenciar una mayor eficiencia del colector solar de tubos de vacío implementando flujo directo, el cual disminuye las pérdidas de calor por radiación en comparación a la implementación de tubos de calor, además se estableció un modelo teórico que representa de forma adecuada el comportamiento del sistema respecto al análisis experimental. Por último, se establece un referente en cuanto al diseño de tubos calor y su aplicación como elementos con una conductividad muy superior a los materiales convencionales.

*Proyecto de grado

**Facultad de ingenierías Físico-mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica, Director Omar Armando Gelvez Arocha.

ABSTRACT

TITLE:

DESIGN AND CONTRUCCTION OF AN EVACUATED TUBE COLLECTOR*

AUTHORS:

Nelson Eduardo Jaimes Ardila

Sergio Armando Rivero Gereda**

KEY WORDS:

Heat transfer, heat pipe, solar collector, evacuated tube, renewable energy.

DESCRIPTION:

Currently seeking energetic alternatives to mitigate the environmental impact of conventional energy sources has become a large field for engineering study in pursuit of energy sustainability.

Recognizing the solar renewable energy with the greatest potential due to the great advances in new technologies, reducing production costs and increased efficiency of the systems, is goal of this project the design and construction of a solar thermal system with evacuated tubes to develop performance tests considering the application of direct flow or heat pipes as a means to transfer heat from the vacuum tubes to the heat-transfer fluid. In addition, was necessary to develop a theoretical model of these systems in order to establish design tools.

As result of the investigation the evacuated tube collector with direct flow was more efficient because of the reduction of heat loss by radiation compared to the implementation of heat pipes, in addition established a theoretical model that represents properly the behavior of the system with respect to experimental analysis. Finally, establishing a benchmark for the design of heat pipes and its application as elements with conductivity much higher than conventional materials.

* Graduation Project

** Faculty of Physics-Mechanic Engineerings, School of Mechanic Engineering, Director Omar Armando Gelvez Arocha.

INTRODUCCIÓN

En pleno siglo XXI el creciente desarrollo económico al que apuntan los estándares en Latino América y el mundo provoca un aumento en la demanda energética, emisión de gases contaminantes a la atmósfera que contribuyen al calentamiento global y la destrucción de capa de ozono y por lo tanto un mayor interés en el estudio de energía utilizando recursos renovables y amigables con el medioambiente, haciendo de esta labor una de las áreas de mayor estudio ingenieril.

En la actualidad la producción energética se basa en centrales hidroeléctricas, termoeléctrica y plantas nucleares las cuales proveen la gran mayoría de la energía consumida a nivel mundial, pero presentan grandes problemas a nivel ambiental, pues afectan en diversos modos nuestro planeta, ya sea por la destrucción de ecosistemas, la alta emisión de gases contaminaste o la creación de residuos altamente radiactivos y perjudicales para la salud. Por esta razón la búsqueda de alternativas que reduzcan el impacto a través de la utilización de tecnologías no convencionales y el interés por mejorar sus procesos de obtención, plantean grandes retos.

La energía solar se ha convertido en emblema de las energías renovables y ha conseguido un gran progreso debido a: mejoras de la tecnología, la reducción de costos, el aumento de la eficiencia y el manejo de temperaturas más altas de operación, avances y consecuencias principalmente del apoyo e interés de las administraciones de diferentes países en pro de encontrar la sostenibilidad energética.

La Universidad Industrial de Santander en conjunto con la escuela de Ingeniería Mecánica ven la necesidad de plantear proyectos investigativos que permitan desarrollar las últimas tecnologías en la obtención de energías no convencionales y promocionar proyectos con el fin de estudiar el comportamiento de sistemas de captación solar, entre ellos, colectores solares y celdas fotovoltaicas. Por esta

razón se realiza una propuesta didáctica para el diseño de un sistema de obtención de energía usando como fuente la radiación solar implementando colectores solares con tubos de vacío, planteando un estudio de las diferentes tecnologías utilizadas, tubos de calor y colectores con tubo conductor de fluido, donde se pueda identificar fácilmente la aplicación de cada uno de los elementos y su diferencia respecto a los sistemas de captación de energía tradicionales. Implementando así una herramienta de vital importancia de investigación en la Universidad Industrial de Santander y contribuir con la formación de personal competente en esta área.

De esta forma se dispondrá de un sistema térmico moderno basado en energías alternativas donde los estudiantes de la escuela de ingeniería mecánica contarán con las herramientas necesarias para enfrentar de forma práctica los nuevos retos que plantea el mundo a nivel energético.

Lo relacionado con este colector solar implementando tubos de vacío se mostrará en este libro el cual cuenta con los siguientes capítulos:

Capítulo 1, en este capítulo se describen las generalidades acerca de la radiación solar y los elementos necesarios para evaluar el potencial solar.

Capítulo 2, en este capítulo se desarrolla una breve descripción y clasificación de las energías alternativas desarrollando un énfasis en la energía solar.

Capítulo 3, en este capítulo se describen los colectores solares, estableciendo el método para la evaluación de su eficiencia y describiendo su aplicación en ambientes industriales.

Capítulo 4, en este capítulo se desarrolla el proceso de diseño y selección de materiales para la implementación de tubos de calor.

Capítulo 5, en este capítulo se hace una descripción del colector solar de tubos al vacío diseñado y construido, se describe en detalle el proceso de diseño de tubos

de calor para su implementación en el colector solar, además se describe el montaje del mismo con tubos conductores de fluido o tubos de calor y por último se presenta una descripción del programa para el monitoreo y control del colector solar de tubos al vacío.

Capítulo 6, en este capítulo se describe el modelo teórico implementado para el estudio del colector solar de tubos al vacío implementando tubos conductores de fluido o tubos de calor, además se presentan los resultados obtenidos del análisis teniendo en cuenta las condiciones reales del sistema.

Capítulo 7, en este capítulo se describen cada una de las pruebas experimentales desarrolladas para el análisis de la eficiencia del colector solar, aquí se desarrolla la comparación entre cada una de las pruebas implementadas, además se plantea la validación del modelo teórico.

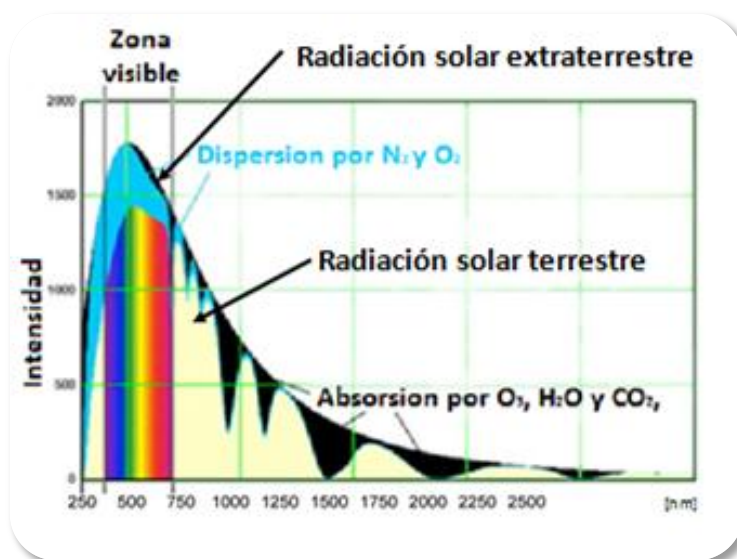
1 RADIACIÓN SOLAR

La radiación solar comprende el conjunto de radiaciones electromagnéticas emitidas por sol, que se comporta como un cuerpo negro el cual emite energía siguiendo la ley de Planck a una temperatura de unos 6000 K.

1.1 GENERALIDADES DE LA RADIACIÓN SOLAR.

La cantidad total de energía emitida por el Sol en forma de radiación sustenta todas las formas de vida en la tierra, esta energía emitida por el sol es constante y se genera en las profundidades del Sol por la acción de fusión nuclear con la cual los núcleos de los átomos de hidrógeno individuales actúan entre sí. El resultado neto de estos procesos es que cuatro núcleos de hidrógeno se combinan para formar un núcleo de helio, y la energía surge en forma de radiaciones gamma. Una enorme cantidad de núcleos reacciona cada segundo, generando una energía equivalente a la que se produciría por la explosión de 100.000 millones de bombas de hidrógeno de un megatón por segundo.

Figura 1: Espectro de la radiación solar



Fuente: LFN photovoltaics, Modificado por los Autores.

El espectro de radiación electromagnética producida por el sol (Ver Figura 1.) comprende la región ultravioleta (rayos UV) con longitudes de onda λ menor a los 400 nm, la región visible entre longitudes de onda λ entre 400 y 750 nm, y la región infrarroja (rayos IR) con longitudes de onda λ mayores 750 nm. Sin embargo no toda la radiación electromagnética alcanza la superficie de la Tierra a causa de la capa de ozono y partículas presentes en la atmosfera, parte de esta radiación es absorbida o reflejada, mientras muchas otras penetran y tocan la superficie terrestre. Conocemos hoy en día como irradiancia, a la unidad que mide la energía por unidad de tiempo que toca la superficie terrestre en un área determinada.

1.2 DETERMINACIÓN DE LA INCLINACIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR θ RESPECTO A UNA SUPERFICIE.

En el estudio de la geometría de un plano no perpendicular a la radiación solar es necesario determinar la radiación total en función a un plano equivalente que permita facilitar el análisis. Este procedimiento depende de muchos parámetros entre ellos:

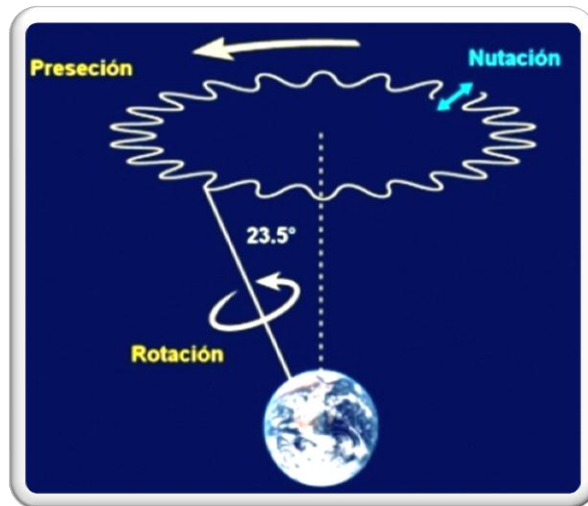
- Factores dependientes del movimiento de la tierra.
- Factores dependientes de la ubicación sobre tierra.

1.2.1 Factores dependientes del movimiento de la tierra: La Tierra posee cuatro movimientos: traslación, rotación, precesión y nutación (Ver Figura 2).

- **Traslación:** es el movimiento de la tierra alrededor del sol, dicho movimiento describe una trayectoria elíptica.
- **Rotación terrestre:** es el giro de la tierra sobre un eje entre el polo sur magnético y el polo norte magnético en sentido anti horario.
- **Precesión de los equinoccios:** es un movimiento lento de la inclinación del eje de la Tierra con respecto a la elíptica. Este movimiento retrasa la llegada de los equinoccios lentamente. Completa una vuelta cada 25.790 años.

- **Nutación:** es un bamboleo menor del eje de la Tierra con respecto a la elíptica. Tiene un ciclo de 19 años en el que la inclinación varía entre 6 y 9 segundos.

Figura 2: Movimientos de rotación, precesión y nutación terrestre.

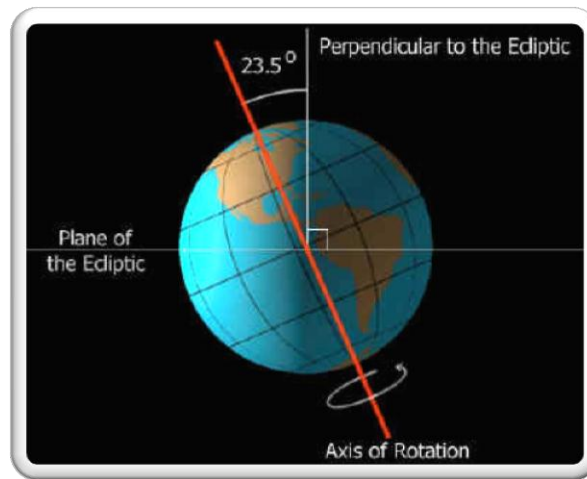


Fuente: Autores.

Dentro del estudio de la radiación solar sobre una superficie los movimientos con mayor importancia en la determinación de la irradiancia sobre una superficie son el de translación y el de rotación que influyen en el ángulo de declinación $[\delta]$ y el ángulo de inclinación horaria $[\omega]$ respectivamente.

1.2.1.1 Ángulo de declinación δ : Al ubicar un plano sobre la trayectoria elíptica de la tierra alrededor del sol se observa como el eje de rotación de la tierra se encuentra inclinado aproximadamente 23.5° (ver figura 3) este valor varía de 21.5° a 24.5° causado por el movimiento de nutación.

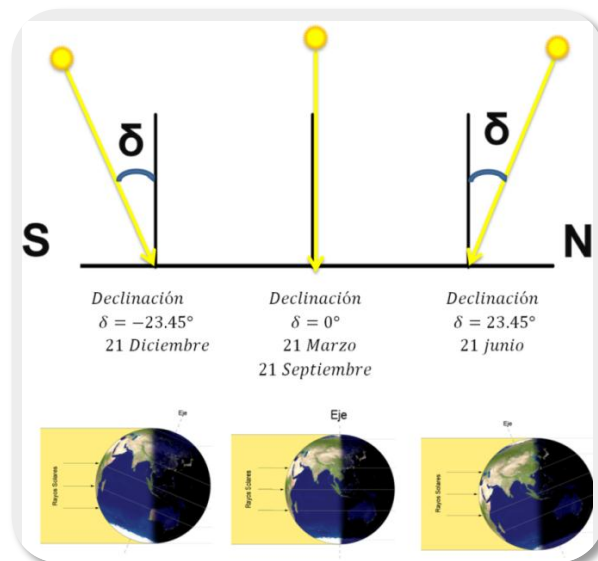
Figura 3: Declinación de la tierra respecto al plano elíptico



Fuente: ovnisultimahora.blogspot.com

Debido al movimiento de la translación el ángulo de declinación influye en la forma en que los rayos solares tocan una superficie vertical con sus caras de frente a los polos y cambia en todo su recorrido desde -23.5° el 21 de diciembre a 23.5° el 21 de junio aproximadamente (ver figura 4).

Figura 4: Variación del ángulo de declinación sobre una superficie ($\varphi=0^\circ$)



Fuente: Wikipedia modificada por los autores.

La declinación (δ) de la radiación solar varía durante de todo el año encontrando su máximo en cada solsticio (21 de Junio y 21 de Diciembre aproximadamente) y valores mínimos en los equinoccios (21 de Marzo y 21 de Septiembre a aproximadamente). La forma más fácil de calcular esta inclinación en el año se realiza por medio de la expresión:

$$\delta = 23,45 * \sin\left(360 * \frac{284 + n}{365}\right) [8]$$

Donde n representa el día del año (Con $n = 1$ el 1^{ro} de Enero).

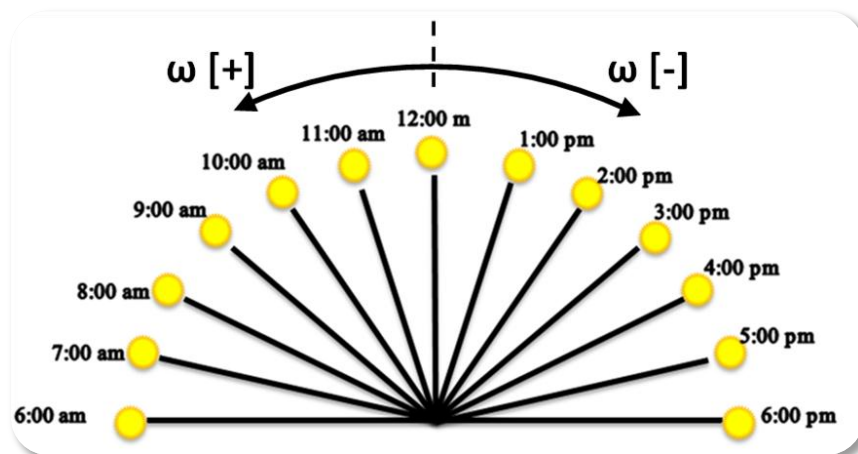
1.2.1.2 Angulo de inclinación horaria ω : El ángulo horario depende de la rotación terrestre y mide el desplazamiento angular del sol respecto al mediodía (Ver figura 5). En el instante en que el Sol se encuentra más alto en el cielo y el ángulo cenital solar es mínimo, el ángulo horario es igual a 0° . Cada hora es igual a 15° de longitud, tomando un valor positivo (+) por las mañanas y negativos (-) por las tardes:

$$6:00 \text{ AM } \omega = 90$$

$$12:00 \text{ M } \omega = 0$$

$$6:00 \text{ PM } \omega = -90$$

Figura 5: Variación del ángulo horario ω



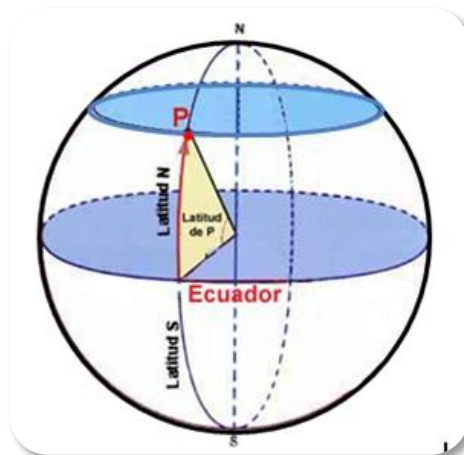
Fuente: Autores.

1.2.2 Factores dependientes de la ubicación de la tierra: La ubicación y orientación de un plano, cambia en toda la superficie terrestre, pues un plano horizontal ubicado en el Ecuador (Latitud 0°) cambia completamente con respecto a un plano horizontal situado en los polos (Latitud 90°), además si el plano presenta una inclinación respecto a la horizontal y su normal no apunta al sur, las variaciones del área efectiva para el estudio de la irradiancia deben ser consideradas. De esta forma, los factores que afectan la radiación solar sobre una superficie en función de su ubicación son:

- Latitud terrestre (φ).
- Angulo de inclinación superficial (β).
- Azimut superficial de la pared (γ_p).
- Azimut solar (γ_s).

1.2.2.1 Latitud terrestre (φ): Es el ángulo entre el plano de la línea ecuatorial y punto P ubicado sobre la superficie terrestre medido a lo largo del meridiano del lugar (Ver Figura 6).

Figura 6: Latitud terrestre.



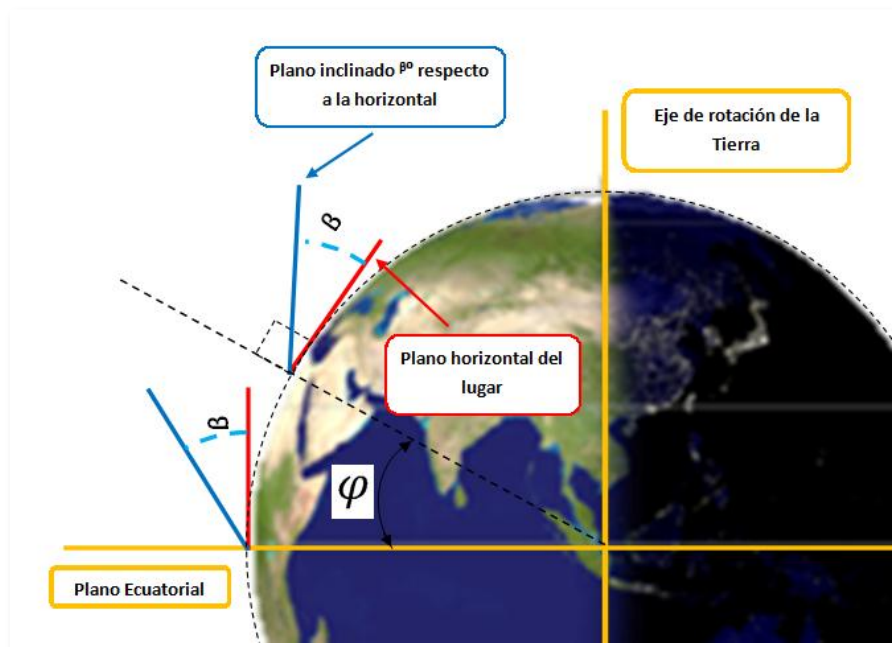
Fuente: Definición ABC.

La latitud se mide en grados sexagesimales de 0° a 90° y puede representarse de dos formas:

- Indicando el hemisferio: norte o sur.
- Mediante el signo: $(-)$ para el hemisferio sur y $(+)$ para el hemisferio norte

1.2.2.2 Angulo de inclinación de la superficie (β): es el ángulo formado entre una superficie y la horizontal del lugar (Ver figura 7).

Figura 7: Inclinación de una superficie respecto a la horizontal

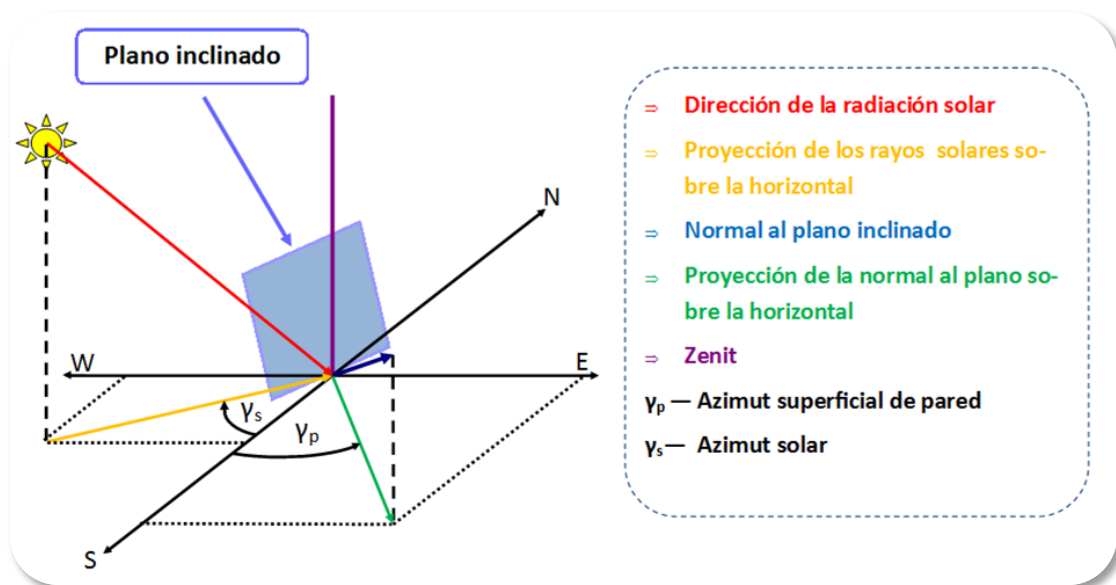


Fuente: Wikipedia, modificada por los autores.

1.2.2.3 Azimut superficial de pared γ_p : es el ángulo formado entre la línea norte-sur y una proyección sobre la horizontal de la normal de una superficie, negativo hacia el este y positivo hacia el oeste (Ver figura 8).

1.2.2.4 Azimut solar γ_s : es el ángulo formado entre la línea norte-sur y una proyección sobre la horizontal de la dirección de la radiación solar, es negativo hacia el este y positivo hacia el oeste.

Figura 8: Azimut solar y azimut de pared para una superficie inclinada.



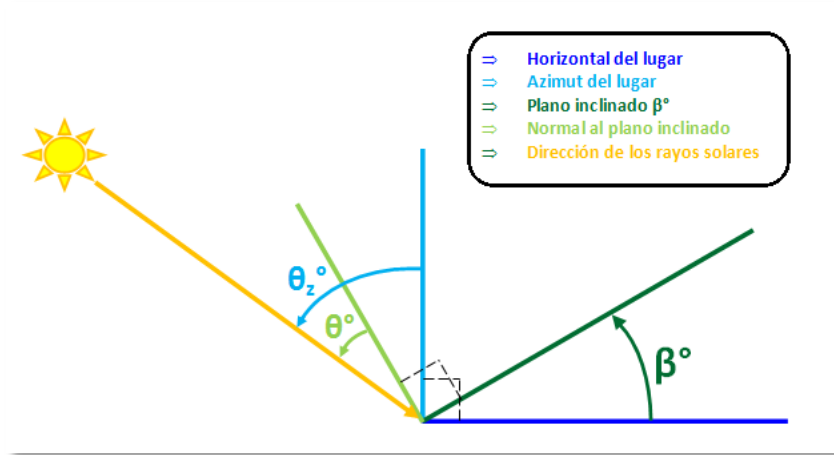
Fuente: Autores.

1.2.3 Cálculo de inclinación de radiación solar θ para diferentes superficies:

La inclinación de la radiación solar (θ) es el ángulo formado entre la normal del plano y la dirección de la radiación, se puede determinar para tres tipos de planos diferentes:

- Superficies horizontales ($\beta = 0$)
- Superficie inclinada mirando al sur ($\beta \neq 0 \rightarrow \gamma_p = 0$)
- Superficie inclinada indiferentemente ($\beta \neq 0 \rightarrow \gamma_p \neq 0$)

Figura 9: Angulo incidente de la radiación solar sobre una superficie inclinada.



Fuente: Autores.

1.2.3.1 Superficies horizontales: para una superficie horizontal se puede demostrar que la inclinación de la radiación solar es independiente del azimut de pared γ_p y la inclinación de la radiación solar, de esta forma el ángulo θ para una superficie horizontal es igual al ángulo de inclinación de la radiación cenital del lugar (θ_z) que es el ángulo formado entre el cenit y la dirección de los rayos solares. Por tanto $\theta = \theta_z$ y es función de la declinación, el ángulo horario y la latitud ($\theta_z = f(\delta, \omega, \varphi)$).

$$\cos \theta_z = \sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos \omega$$

1.2.3.2 Superficies inclinadas mirando al sur: para una superficie inclinada ($\beta \neq 0$) y con un azimut de pared igual a cero ($\gamma_p = 0$), la inclinación de la radiación solar sobre la superficie se ve influenciada por la declinación, el ángulo horario, el ángulo de inclinación de la superficie y la latitud ($\theta = f(\delta, \omega, \varphi, \beta)$).

$$\cos \theta = \sin \delta \sin(\varphi - \beta) + \cos \delta \cos(\varphi - \beta) \cos \omega$$

1.2.3.3 Superficie inclinada indiferentemente: una superficie inclinada ($\beta \neq 0$) con azimut de pared diferente de cero ($\gamma_p \neq 0$) presenta un estudio más complejo pues la inclinación de los rayos solar tiene en cuenta todos los factores que afectan la radiación solar de modo que el ángulo θ es función de la declinación, el ángulo horario, la inclinación del plano, el azimut de pared y el azimut solar ($\theta = f(\delta, \omega, \varphi, \beta, \gamma_p, \gamma_s)$).

$$\cos \theta_z = \sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos \omega$$

$$\alpha_s = 90 - \theta_z$$

$$\cos \gamma_s = \frac{\cos \theta_z * \sin \varphi - \cos \delta}{\cos \theta_z * \sin \varphi}$$

$$\cos \theta = \cos(\gamma_s - \gamma_p) \cos \alpha_s \sin(\beta) + \sin \alpha_s \cos(\beta)$$

1.3 CÁLCULO DE LA IRRADIANCIA (q_s) PARA UN PLANO SOBRE LA SUPERFICIE TERRESTRE.

Se define como irradiancia a la energía que incide sobre una superficie en determinado tiempo. De esta manera, una vez determinados los parámetros necesarios para conocer la inclinación de la radiación con respecto a una superficie, es necesario determinar la energía radiada sobre esta. Para ello se realiza una evaluación de la intensidad con la cual la radiación solar llega a la tierra.

1.3.1 La constante solar I_0 : La cantidad de energía recibida en forma de radiación solar por unidad de tiempo y unidad de superficie incidente en un plano perpendicular a la radiación y a la distancia media entre el Sol y la Tierra, se conoce como Constante Solar o Irradiancia Extraterrestre. Esta tiene un valor estimado 1367 [W/m²] medidos por satélites con una incertidumbre del 1% a causa de los cambios en la distancia entre el sol y la tierra por la trayectoria elíptica de esta y la variación de energía producida en el sol.

Mediante estudios continuos de la radiación se ha logrado determinar una forma práctica para calcular esta constante:

$$I_0 = 1353 \left(1 + 0,034 \cos \frac{360n}{365} \right) [8]$$

Donde n es el día del año partiendo de 1 el 1^{ro} de Enero.

Existen puntos muy importantes en la trayectoria elíptica de la tierra dentro de ello el Afelio conocido como el punto más alejado de la órbita de la tierra sucede a principios del mes de julio (generalmente, el día 4). Su opuesto es el perihelio, sucede a principios de Enero (2 al 3 de Enero) es el punto más cercano al Sol. A causa de esto la intensidad solar extraterrestre es máxima en Enero y mínima en Julio.

La intensidad de la radiación solar permite calcular la irradiancia (h_o) en un plano situado en la parte externa de la atmosfera mediante la ecuación:

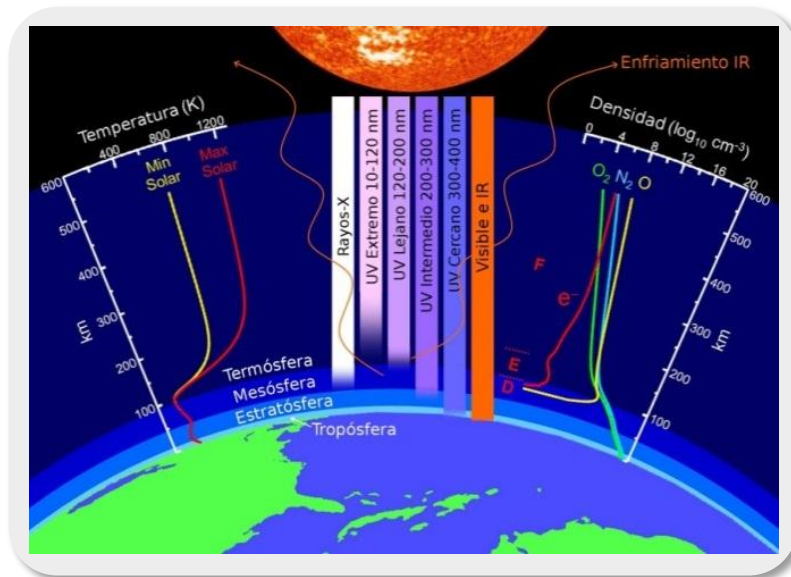
$$h_o = I_0 \cos \theta_z$$

Al llevar este mismo plano a la superficie terrestre la irradiancia se ve atenuada debido a su paso por la atmosfera.

1.3.2 Atenuación de la radiación solar: En el estudio de la radiación solar a nivel terrestre se debe determinar la proporción con que la radiación llega. Pues la radiación solar se ve atenuada debido a diferentes fenómenos que disminuyen la intensidad de la radiación solar (Ver Figura 10). Algunos de ellos son:

- Variaciones de la difusión debidas al vapor de agua, gases del aire y partículas en el aire.
- Variaciones en la absorción atmosférica por el Ozono (O₃), Agua (H₂O), Monóxido de carbono (CO) y algunos gases presentes en la atmosfera.

Figura 10: Absorción de la radiación en la atmosfera.



Fuente: John Emmert.

Es importante definir algunos términos relacionados con la atenuación de la radiación solar al pasar por la atmosfera.

- **Masa atmosférica:** Relación entre la masa del aire a través de la cual la radiación directa pasa para llegar a la superficie terrestre y la masa que pasaría si el sol estuviera ubicado en el cénit.

- **Albedo (ρ):** Es la capacidad de reflexión o fracción de la radiación reflejada por la superficie de la tierra o cualquier otra superficie.
- **Radiación reflejada:** Es la radiación recibida, ya sea de tipo directa o difusa, que ha sido reflejada por alguna superficie.
- **Radiación directa (H_b):** Es la radiación recibida cuando los rayos solares no se difuminan o se desvían a su paso por la atmósfera terrestre.
- **Radiación difusa (H_d):** es la componente de la radiación solar que al encontrar pequeñas partículas en suspensión en la atmósfera en su camino hacia la tierra es reflejada y dispersada en todas las direcciones
- **Radiación Global (H):** Es la potencia energética solar que incide sobre una superficie, se define como:

$$\text{Radiación Global } (H) = R.\text{Directa } (H_b) + R.\text{Difusa}(H_d) + R \text{ reflejada}$$
- **Dispersión:** la radiación solar tiene una trayectoria recta pero los gases y partículas la desvían cambiando la dirección de su recorrido. Esta depende de la longitud de onda, pues entre más corta sea ésta, mayor será la dispersión.
- **Irradiancia:** Es la potencia instantánea de radiación solar recibida por unidad de superficie y sus unidades según el Sistema Internacional (SI) son los kW/m^2 .

El estudio de todos estos factores de atenuación nos permiten encontrar la constante de claridad K_T definida como la relación entre la radiación medida a nivel de la tierra y la radiación extraterrestre.

$$K_T = \frac{h}{h_0}$$

Esta constante es variante en el tiempo pues una simple nube afecta esta relación, por esta razón a nivel mundial se mide la irradiancia a nivel superficial y se calcula de manera indirecta esta constante.

1.3.3 Métodos para la determinación de la irradiancia a nivel terrestre: Ya que la constante de claridad es difícil de medir de forma directa, hoy en día se han desarrollado procedimientos e instrumentos que permiten determinar un valor para la radiación directa y difusa, necesarios para el estudio del calor incidente sobre una superficie (Q_s). Estas variables pueden obtenerse de dos maneras distintas, midiéndolas o estimándolas.

1.3.3.1 Instrumentos para medición de la radiación solar: Son equipos que nos permite registra la intensidad de la radiación directa o difusa, el brillo solar y las horas en la que se da. Dentro de los instrumentos de medición de la radiación solar se encuentran:

- **Piranómetro:** Instrumento para medir de manera muy precisa la irradiancia incidente sobre una superficie horizontal. Se trata de un sensor diseñado para medir la densidad del flujo de radiación solar en un campo de 180 grados, este genera un voltaje proporcional a la irradiancia y permite determina la radiación total (H).

Figura 11: Piranómetro.



Fuente: Rumtor, Aparatos meteorológicos.

- **Pirheliómetro:** Es un instrumento muy similar a un piranómetro pero a diferencia de este no mide la radiación en un campo de 180 grados sino se encarga de medir solamente la radiación directa (H_b) hacia donde se encuentra orientado, posee el mismo sensor del piranómetro en la parte inferior

de un ducto y de esta manera la radiación reflejada y difusa no influye en su medida.

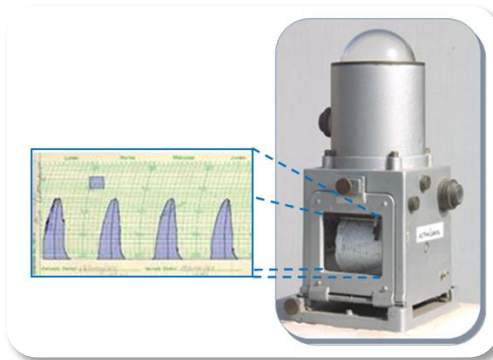
Figura 12: Pirheliómetro.



Fuente: <http://www.labsolar.utfsm.cl>.

- **Actinógrafo o piranógrafo:** Registra la radiación solar global directa y difusa mediante diferencias de temperatura entre una banda metálica pintada de negro y dos bandas metálicas similares pintadas de blanco expuestas a la radiación solar. Hace falta un planímetro para medir el área que queda bajo la curva, valor que multiplicado por el factor de calibración, proporciona la suma diaria de la radiación global [Watt/m²].

Figura 13: Actinógrafo.



Fuente: <http://meteorologia.pucp.edu.pe>, modificada por los autores.

- **Heliógrafo:** Es un aparato meteorológico que mide el tiempo de insolación diaria. La duración de la insolación se halla concentrando los rayos solares sobre una banda de cartulina teñida de azul que se quema en el punto que se forma la imagen del sol. Mientras el cielo este despejado se formara una línea continua sobre la banda de cartulina. Para calcular las horas de insolación solo hace falta sumar la distancia total carbonizada en la banda.

Con este instrumento es posible determinar cuántas y durante qué horas se presentó radiación solar por encima de cierta intensidad.

Figura 14: Heliógrafo.



Fuente: <http://www.labsolar.utfsm.cl>.

1.3.3.2 Métodos para la estimación de la radiación solar: Muchas veces es difícil contar con los instrumentos necesarios para determinar la radiación directa y difusa incidentes sobre una superficie, por esta razón se presentan algunos métodos para estimar estos valores.

- **Constante de claridad:** Relaciona la radiación normal total terrestre con la radiación normal total extraterrestre.

$$H = K_t * H_0$$

- **Estimación de I_b por contante de claridad:** Relaciona la radiación total incidente sobre una superficie con la contante de claridad:

$$I_b = (-520 + 1800k_t)[8]$$

$$H_b = I_b * \cos(\theta_z)$$

I_b – Radiacion por unidad de

area sobre una superficie perpendicular a los rayos solares

- **Estimación de I_b por masa de aire y ubicación:** Cuando no se cuenta con instrumentos para medir la radiación, se puede determinar de acuerdo a las condiciones del aire y la ubicación terrestre:

$$I_b = A * e^{\left[\frac{-P}{P_0} * \frac{B}{\cos \theta_z}\right]} [8]$$

$$\frac{-P}{P_0} = \exp(0,0001184 + Z)$$

$$A = 1183 - 1230$$

$$B = 0,15 - 0,2$$

Donde Z es la altura de la zona y A, B son constantes dependientes del sitio.

- **Estimación de la radiación difusa H_d :** Relaciona la radiación difusa normal terrestre con la radiación normal total terrestre en función de la constante de claridad:

$$\frac{H_d}{H} = \begin{cases} = 0,99 \rightarrow & k_t < 0,17 \\ = 1,188 - 2,272k_t + 9,473k_t^2 - 21,865k_t^3 + 14,1648k_t^4 \rightarrow & 0,35 < k_t < 0,75 \\ = -0,54k_t + 0,632 \rightarrow & 0,75 < k_t < 0,8 \\ = 0,2 \rightarrow & k_t > 0,8 \end{cases} [8]$$

1.3.4 Irradiancia ($q_{S\beta}$): Para el cálculo de la irradiancia sobre una superficie plana inclinada ($q_{S\beta}$) ubicada sobre la superficie terrestre se debe determinar la componente de la radiación directa, la radiación difusa y la radiación reflejada. De esta forma $q_{S\beta}$ se determina a partir de:

$$q_{S\beta} = H_b * \frac{\cos(\theta)}{\cos(\theta_z)} + H_d * \cos^2\left(\frac{\beta}{2}\right) + H * \rho * \sin^2\left(\frac{\beta}{2}\right)$$

Teniendo en cuenta los métodos de medición y estimación de la radiación total, difusa y reflejada es posible determinar el calor útil sobre la superficie teniendo en cuenta los siguientes casos:

1. Medir la radiación total con un piranometro y medir la radiación directa con un pirheliómetro.
2. Medir la radiación total con un piranometro y medir la radiación difusa con un piranometro bloqueando la radiación directa.
3. Medir la radiación total, determinar la constante de claridad y estimar la radiación directa.
4. Medir la radiación total, determinar la constante de claridad y estimar la radiación difusa.
5. Estimar la constante de claridad, determinar la radiación total y determinar la radiación directa mediante ecuaciones.
6. Estimar la radiación directa en función de la ubicación del lugar, calcular la constante de claridad y calcular la radiación total.

1.4 MAPAS DE RADIACIÓN SOLAR

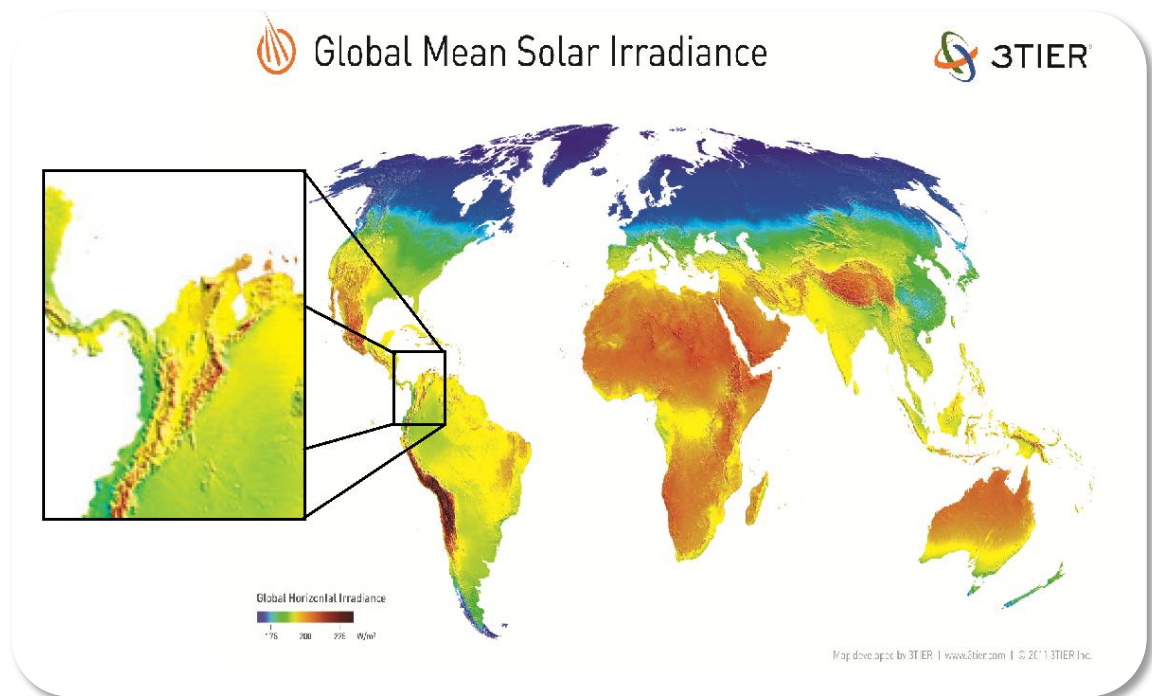
Los mapas de radiación solar son documentos que permiten determinar de forma indirecta un promedio de irradiancia para diferentes épocas del año, estos mapas se han diversificado de tal forma que la irradiancia en cualquier parte del mundo puede ser estimada. Sin embargo, los mapas de radiación solar representan solo

una tendencia de la irradiancia, por tanto es indispensable contar con la medición de la irradiancia en el lugar con el objetivo de desarrollar análisis complejos.

1.4.1 Radiación Solar Mundial: Es claro que la irradiancia no es una constante en nuestro planeta pues presenta variación a lo largo de la tierra ya sea de tipo geográfico, climático y ambiental. Esto permite ventajas en algunas zonas del planeta para la implementación de proyectos con energía solar como fuente alternativa (Ver Figura 15).

El estudio global de energía solar permite determinar las zonas con mayor irradiancia promedio en todo el año y se puede ver como las zonas ubicadas en los trópicos tiene mayor potencial solar con un valor de irradiancia que oscila entre los 200 W/m^2 y los 250 W/m^2 .

Figura 15: Irradiación solar promedio global.

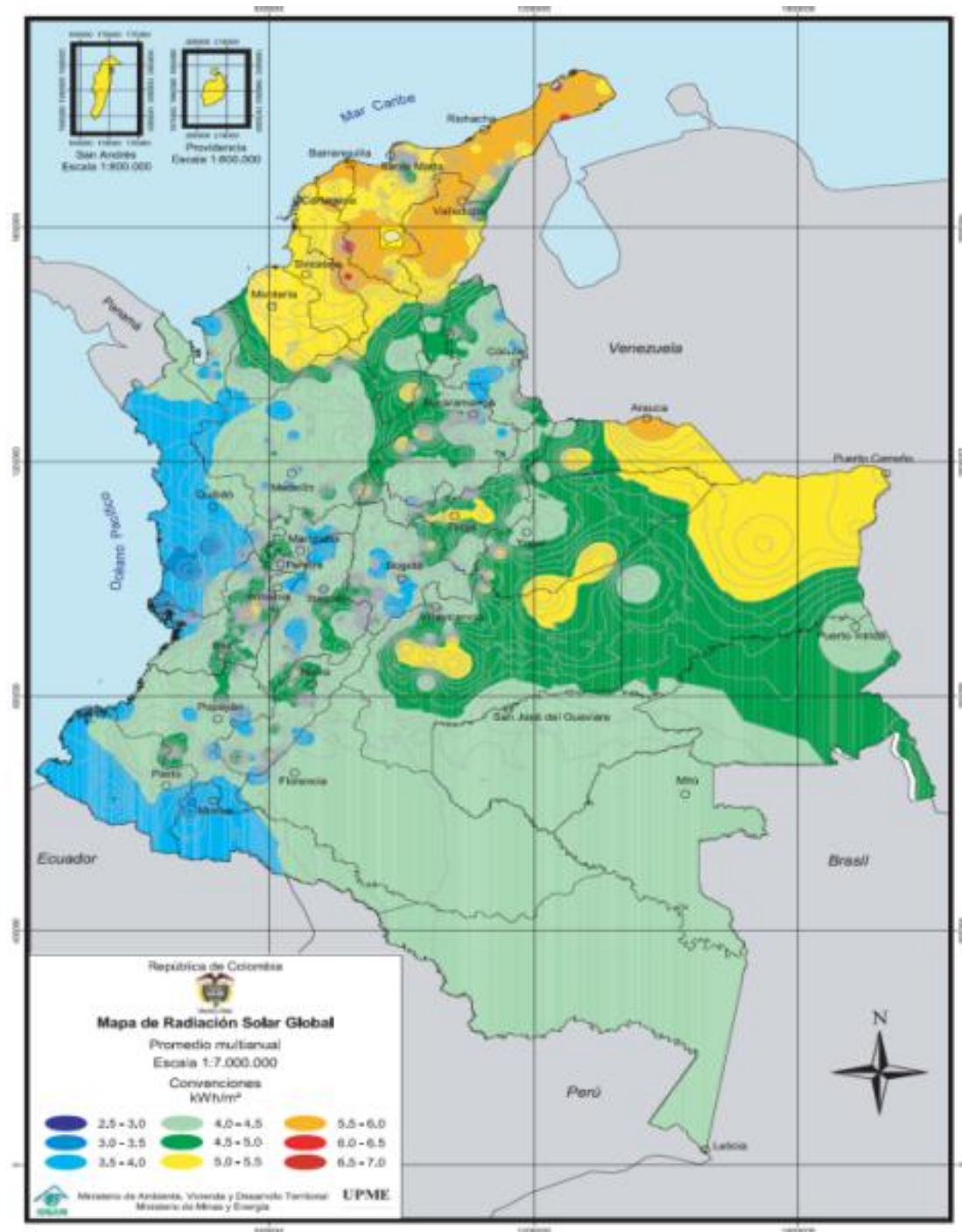


Fuente: 3TIER.

1.4.2 Radiación Solar en Colombia: Colombia al estar localizado cerca de la línea del ecuador presenta ventaja en su potencia solar (Ver figura 16). Por esta razón, impulsar proyectos en la obtención de energía por medios no convencionales como colectores solares y celdas fotovoltaicas representa un reto que requiere de un avance en investigación y tecnología que permita mostrar las ventajas de este recurso.

Al realizar un estudio general de la radiación en Colombia, se encuentra un promedio multianual de irradiancia de 4.5 KWh/m²/día. Además zonas como la Guajira debido a su geografía y ubicación en el territorio colombiano cuenta con un valor aproximado de 6 KWh/m²/día siendo la región con mayor irradiancia en Colombia (ver Figura 16).

Figura 16: Promedio multianual radiación solar en Colombia.



Fuente: Atlas de radiación solar de Colombia

2 ENERGÍAS ALTERNATIVAS

Se conoce como energía renovable o energía verde, aquellas fuentes que no implican la quema de combustibles fósiles dentro de los cuales están el carbón, el gas y el petróleo. Hay dos grandes grupos: fuentes de energía renovable y la energía nuclear.

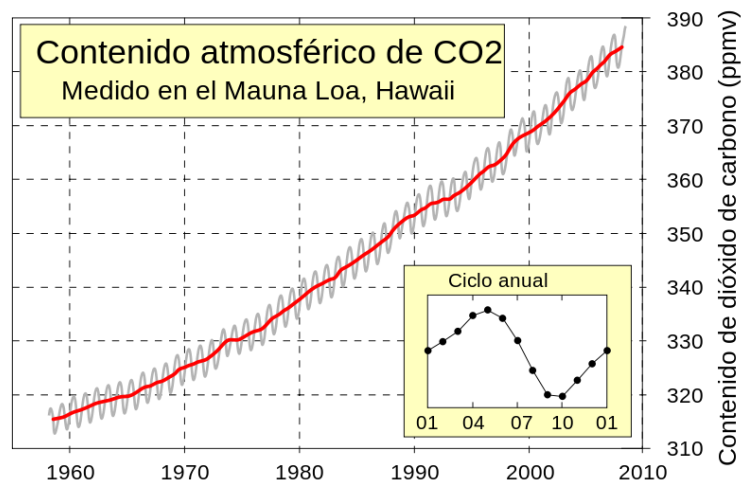
2.1 FUENTES DE ENERGÍA RENOVABLE

Se denomina energía renovable a la energía que se obtiene de fuentes naturales virtualmente inagotables, ya sea por la inmensa cantidad de energía que contienen, o porque se regeneran por medios naturales. Entre las energías renovables están la hidroeléctrica, eólica, geotérmica, mareomotriz, la biomasa, los biocombustibles y la solar.

El desarrollo constante de nuevas fuentes energéticas, plantea un gran reto en la comunidad mundial, ya que la sostenibilidad energética es algo que debe buscarse con el desarrollo de fuentes renovables y amigables con el medio ambiente, permitiendo que los ecosistemas no corran más riesgo en el afán de la humanidad por cubrir la demanda energética.

Hoy en día es claro ver como la concentración de dióxido de carbono (CO_2) ha crecido de 315 partículas por millón (PPM) en 1960 a 385 en el 2010 esto ha provocado un gran cambio a nivel mundial, pues estos gases aumentan los efectos de dispersión y absorción en la atmosfera para longitudes de onda no deseadas captando parte del espectro de radiación electromagnética provocando un calentamiento lento de la atmosfera terrestre (Ver figura 17).

Figura 17: Aumento de concentración de CO2 desde los años 60.



Fuente: Wikipedia, Keeling Curve.

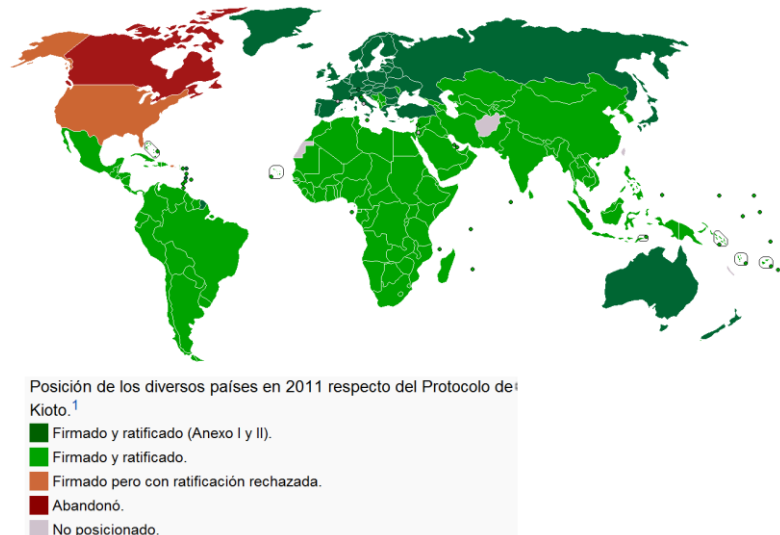
2.2 NORMAS QUE REGULAN EN COLOMBIA LA SEGURIDAD AMBIENTAL Y USO DE ENERGÍA

Las entidades gubernamentales con el fin de buscar soluciones a muchos de los problemas que provoca el crecimiento industrial han desarrollado algunos tratados con el objetivo disminuir los problemas actuales. Algunos de los tratados y leyes más importantes a nivel mundial y nacional son:

2.2.1 Protocolo de Kyoto: Fue inicialmente adoptado el 11 de diciembre de 1997 en Kioto, Japón pero no entró en vigor hasta el 16 de febrero de 2005. Este acuerdo internacional busca reducir la emisión gases causantes del efecto invernadero en un porcentaje aproximado de un 5%. Los seis gases que mayor impacto son:

- Dióxido de carbono (CO₂).
- Gas metano(CH₄).
- Óxido nitroso (N₂O).
- Hidrofluorocarbonos (HFC).
- Perfluorocarbonos (PFC).
- Hexafluoruro de azufre (SF₆).

Figura 18: Posición de los países en el 2011 por el protocolo de Kioto.



Fuente: Wikipedia, Protocolo de Kioto sobre el cambio climático.

2.2.2 Convenio de Viena: Mediante este convenio la comunidad internacional busca adoptar medidas para la recuperación de la capa de ozono. Algunas de las actividades que se deben realizar son:

- Investigar acerca de los procesos tanto físicos como químicos que puedan afectar la capa de ozono.
- Indagar sobre sustancias y tecnologías alternativas que puedan ayudar a la protección y recuperación de la capa de ozono.
- Observar cualquier modificación en la capa de ozono que pueda alterar el clima terrestre.
- Investigar los efectos que puedan tener la radiación ultravioleta baja (UV-B) sobre los seres vivos debido a la contaminación de la capa de ozono.

2.2.3 ISO 50001: Es una norma creada por la Organización Internacional de Normalización en sistemas de gestión de la energía, que especifica los requisitos para establecer, implementar, mantener y mejorar un sistema de gestión de la energía, cuyo propósito es permitir a una empresa promover un enfoque sistemático para mejorar la eficiencia energética, la seguridad energética y el uso de la energía y el consumo.

2.2.4 Ley URE 697 del 2001: El gobierno de la República de Colombia expide esta ley en el 2001 con el fin de generar conciencia en el uso racional y eficiente de la energía en la comunidad en general.

Todo este proceso se realiza por el ministerio de minas y energía como lo dispone la ley y cuyos objetivos son:

- Desarrollar proyectos y asesorar a personas naturales o jurídicas de derecho público o privado, en el programa de Uso Racional y Eficiente de la Energía.
- Incentivar proyectos que conlleven al uso de energías no convencionales dentro del programa de Uso Racional y Eficiente de la Energía.

2.3 ENERGÍA SOLAR.

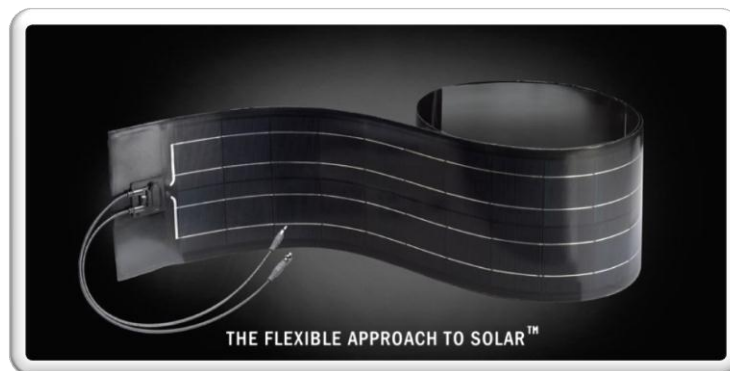
En el desarrollo y estudio de energías alternativas se distingue a la energía solar como la más ecológica y amigable con el ecosistema, esta presenta dos grandes campos, la energía solar térmica y la energía solar fotovoltaica, que representan un gran interés para la investigación.

2.3.1 Energía solar fotovoltaica: Este tipo de sistemas se encarga de captar la radiación solar y convertirla en energía eléctrica que es obtenida por medio de la foto-detección cuántica de un dispositivo; normalmente una lámina metálica semiconductor llamada célula fotovoltaica, o una deposición de metales sobre un sustrato llamada capa fina.

La energía solar fotovoltaica ha fundamentado sus avances mejorando los materiales y su versatilidad.

2.3.1.1 Paneles solares desplegados: Estos nuevos módulos fotovoltaicos están fabricados con materiales semiconductores distinguiendo al cobre, galio, indio y selenio (CIGS), los cuales mejoran las condiciones de operación del panel, además se encuentran ubicados sobre un papel de aluminio flexible de alto rendimiento el cual permite al panel adoptar formas irregulares (Ver figura 19). Por otro lado, se han implementado nuevas técnicas para la manufactura, permitiéndose la obtención continua de la celda fotovoltaica.

Figura 19: Panel solar flexible CIGS.



Fuente: Solo Power TM.

2.3.1.2 Celdas de materiales Bi_2S_3 (Bismuto de sulfuro) y Cu_3BiS_3 (wittichenit): Estas nuevas celdas fotovoltaicas son menos tóxicas y sus materiales para la fabricación son más abundantes en la naturaleza que los usados actualmente. En especial tienen aportes en la síntesis de películas delgadas de Bi_2S_3 y Cu_3BiS_3 como de Aluminio y Plata (Al /Ag) depositadas mediante co-evaporación y por sputtering D.C.

2.3.1.3 Celdas de materiales orgánicos: Corresponden a células fotovoltaicas orgánicas que tienen un muy bajo costo de fabricación y no contaminan el medio ambiente a diferencia de las celdas convencionales.

Estas nuevas celdas orgánicas buscan nuevos métodos de conversión de la energía solar en energía eléctrica. Para esto se han desarrollado celdas sensibilizadas por colorantes que no causan daños en el medio ambiente. Estas celdas producen electricidad mediante un principio foto-electro-químico, que cambia la energía luminosa en energía eléctrica.

Tabla 1: Comparación de la eficiencia en los nuevos paneles solares.

Tipo de panel solar	Eficiencia
celda con Bi ₂ S ₃ , Cu ₃ BiS ₃	12-15%
Panel solar desplegable	10-12%
celdas materiales orgánicos	7,5-10%

Fuente: Autores.

2.3.2 Aplicaciones de la energía solar fotovoltaica: En la actualidad la utilización de esta tecnología es muy poco viable ya que requiere de mucho capital para su desarrollo y las utilidades son muy bajas. Sus usos pueden ser muy variados debido a que generan energía eléctrica, solo hace falta agregar algunos dispositivos como inversores, transformadores y rectificadores.

Hoy en día la energía solar fotovoltaica presenta aplicaciones en lugares donde la electricidad no llega de forma sencilla, dentro estas aplicaciones encontramos:

- **Aeroespacial:** Debido a la gran intensidad de la radiación solar en el espacio las celdas fotovoltaicas presentan un mayor rendimiento, esto permite que los sistemas de los satélites funcionen por largos periodos con pequeños sistemas de respaldo.

Figura 20: Satélites artificiales.



Fuente: [www. MCpro.com](http://www.MCpro.com).

- **Zonas rurales:** en lugares alejados de la civilización y en expediciones resulta muy difícil transportar una planta generadora y el combustible, por esta razón el uso de paneles solares permite grandes ventajas y facilidades para su uso.

Figura 21: Mochila con celdas fotovoltaica para almacenar carga.



Fuente: <http://www.voltaicsystems.com/>

2.3.3 Energía solar térmica: Este tipo de energía funciona mediante la captación de la irradiancia que permite calentar un fluido y puede aprovecharse para cocinar alimentos, para la producción de agua caliente de uso domiciliario, calefacción de recintos, precalentar fluido para posteriormente generar energía eléctrica y emplearse para alimentar un sistema de refrigeración por absorción.

Dentro de los tipos de colectores encontramos colectores de placa plana, colectores de concentración y colectores de tubos de vacío. Estos últimos han presentados grandes avances en la reducción de pérdidas de calor por convección y conducción, además aprovechan mejor la radiación difusa, aumentando la eficiencia del sistema.

2.3.4 Aplicaciones de la energía solar térmica: La energía solar térmica requiere menor inversión, sus aplicaciones no son tan diversas como las celdas fotovoltaicas, pero si son más sencillas, algunas de las cuales son:

- **Aeroespacial:** Debido a la baja temperatura que se presentan en el espacio es necesario acondicionar la temperatura de las naves. De otra manera la temperatura descenderían tanto que podrían causar problemas físicos a los tripulantes, por otro lado la humedad presente dentro de la cabina se condensaría y congelaría los circuitos.
- **Zonas rurales:** Los colectores solares tienen muchas aplicaciones en zonas rurales ya que la radiación ultravioleta UV permite esterilizar el agua y de esta manera obtener agua potable, además proporciona una forma de precalentar el agua para la cocción de alimentos.
- **Zonas urbanas:** Hoy en día es fácil ver en lugares como Japón, España y muchos otros países las viviendas cuentan con colectores de tubos de vacío que permiten calentar el agua en épocas del año donde las temperaturas son muy bajas.

- **Refrigeración:** en la actualidad se realizan investigaciones en sistemas de refrigeración por adsorción y absorción que utilizan como fuente de calor la energía solar.

2.4 ENERGÍA SOLAR EN COLOMBIA.

A nivel nacional la implementación de sistemas no convencionales para la obtención de energía se remonta a mediados de siglo XX, cuando la influencia extranjera y la problemática mundial incentivaron la investigación e implementación de estos sistemas.

2.4.1 Sistemas fotovoltaicos en Colombia: En la década de los 80 la empresa de telecomunicaciones Telecom en Colombia se enfrentó al reto de llevar su servicio a las zonas rurales, encontrando problema a nivel nacional pues la dificultad de no contar con suministro de energía eléctrica convencional en la zona, requería de un capital elevado. Por esta razón nace la alternativa implementar un serie de paneles fotovoltaicos que permitirían poner en funcionamiento los radioteléfonos rurales. Este programa avanzó entre 1985 y 1994 con ayuda la Universidad Nacional y Telecom. Pero la falta de apoyo económico, el avance investigativo, el poco control y mantenimiento de los paneles provocaron que en la actualidad, de los 248 sistemas fotovoltaicos instalados cerca del 8% se encuentran fuera de servicio y un 37% presenta algún problema.

Aunque Colombia es un país con muy poco apoyo a la investigación en este tipo de energía, pues no se cuenta ni con la capacidad tecnológica, ni con el apoyo económico en el campo, el Instituto para la Promoción de Soluciones Energéticas (IPSE) se está encargando de investigar y desarrollar nuevas ideas en el campo energético para áreas rurales a nivel nacional. Además, el ministerio de minas y energía por medio del Fondo De Apoyo Financiero Para La Energización De Las

Zonas No Interconectadas (FAZNI) está instalando sistemas fotovoltaicos en zonas rurales.

2.4.2 Colectores solares en Colombia: A continuación se exponen los hechos más relevantes en la implementación de colectores solares en Colombia.

- 1957-1959 En Santa Bárbara, las Bananeras, se instalan colectores solares en las casas para proveer de agua caliente a los hogares.
- 1976-1978 La Universidad Industrial de Santander motivado por la crisis del petróleo de 1973 instalan calentadores solares para desarrollar una investigación sobre la viabilidad en uso domésticos de estos sistemas.
- 1979 Los colectores solares encuentran su apogeo con una aplicación masiva de calentadores en urbanizaciones en Medellín (Villa Valle de Aburrá) y Bogotá (Ciudad Tunal, Ciudad Salitre) en donde fueron instalados miles de calentadores, desarrollados y fabricados por la Fundación Centro Experimental las Gaviotas.
- 1985 En el Palacio de Nariño, en Bogotá, se instalan grandes calentadores.
- 1986 Surgen varias compañías nacionales en Bogotá, Manizales y Medellín que fabricaron e instalaron calentadores solares de diversas capacidades en esas ciudades. Muchas instituciones religiosas montaron calentadores solares en sus conventos y también algunas cadenas hoteleras.
- 1987-1989 El programa PESENCA (Programa Especial de Energía de la Costa Atlántica), un proyecto realizado por CORELCA (Corporación de Energía Eléctrica de la Costa Atlántica), el ICA (Instituto Colombiano Agropecuario) y la GTZ (Sociedad Alemana de Cooperación Técnica), introduce calentadores solares en la Costa Atlántica y desarrolló un campo experimental en Turipaná, Córdoba, en donde se realizaron pruebas y ensayos para determinar la eficiencia de estos sistemas.
- 1989 Este momento puede considerarse el origen de las normas sobre calentadores solares, iniciativa que siguió su desarrollo por parte del ICONTEC

(Instituto Colombiano de Normas Técnicas) y que ha dado origen a las normas existentes en el país sobre tales dispositivos (NTC 2461).

- 1989 El Banco Central Hipotecario, realizó un análisis de valor presente neto y comprendió que era más económico emplear calentadores solares que emplear electricidad para calentar agua y dotó a varias de sus urbanizaciones con estos equipos.
- 1996 se habían instalado 48 901 m² de calentadores solares, principalmente en Medellín y Bogotá, y en barrios con financiación del Banco Central Hipotecario.

Fue la introducción de un energético más barato, el gas natural, lo que desplazó del mercado esta naciente industria desde mediados de los noventa hasta la actualidad.

3 COLECTORES SOLARES

Los colectores solares son dispositivos cuya finalidad es la de aprovechar la energía solar convirtiéndola en energía térmica generalmente asociada al aumento de temperatura de un fluido.

3.1 CLASIFICACIÓN DE LOS COLECTORES SOLARES

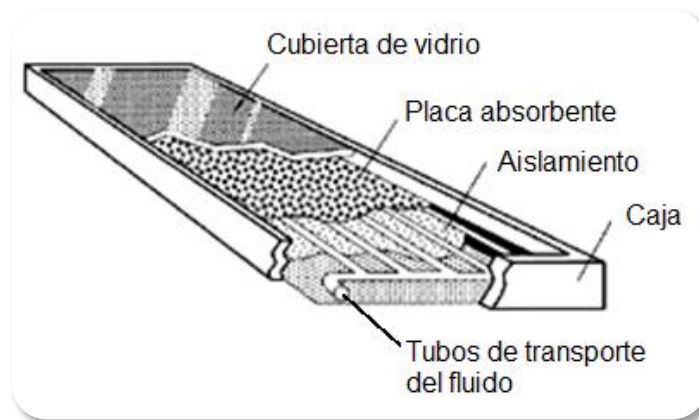
Los colectores solares son clasificados principalmente en función de la tecnología usada para la transformación de la energía solar en energía térmica. De esta forma se pueden distinguir tres tipos principales de colectores solares usados comúnmente:

- Colectores solares de placa plana.
- Colectores solares de concentración parabólicos.
- Colectores solares de tubos al vacío.

3.1.1 Colector de placa plana (FPC): Los colectores solares de placa plana son los sistemas de captación solar más sencillos construidos en la actualidad, estos sistemas constan de una superficie absorbente y una cubierta transparente entre los cuales se produce un efecto de invernadero, lo cual consiste en que parte de la radiación que atraviesa la cubierta y llega a la placa captadora es reflejada hacia la cubierta transparente, con una longitud de onda para la cual esta es opaca, reteniendo la radiación en el interior. Sobre la superficie absorbente se encuentran unidos o soldados una serie de conductos por los cuales fluye algún fluido, encargado de retener el calor captado.

El funcionamiento del colector depende en gran medida de la forma en que los tubos se fijan a la placa absorbente. Pueden ser soldados o ser parte integral de la placa. A continuación se presentan algunas características que definen el comportamiento de este tipo de colectores.

Figura 22: Colector de placa plana.



Fuente: <http://www.blipposol.com>, modificado por los autores.

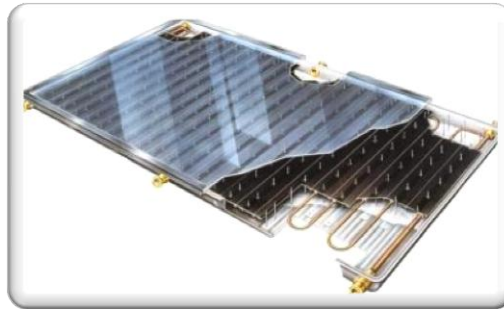
Tabla 2: Características de un colector solar de placa plana FPC.

Characteristics of the flat plate collector (FPC) system	
Parameter	Value
Fixing of risers on the absorber plate	Embedded
Absorber coating	Black mat paint
Glazing	Low-iron glass
Efficiency mode	n vs $(T_i - T_a)/G$
G_{test} —flow rate per unit area at test conditions (kg/s m^2)	0.015
a_0 —intercept efficiency	0.79
a_1 —negative of the first-order coefficient of the efficiency ($\text{W/m}^2\text{C}$)	6.67
b_0 —incidence angle modifier constant	0.1

Fuente: The potential of solar industrial process heat applications [6].

Algunas de las técnicas de fabricación modernas han sido mejoradas introduciendo el uso de soldadura ultrasónica mejorando la velocidad y la calidad de la soldadura. Esto es usado en la soldadura de aletas a los tubos dentro de los colectores solares con el fin de mejorar la conducción de calor. La ventaja de este método es que la soldadura se desarrolla a temperatura ambiente, por lo cual la deformación de las piezas se evita. Este tipo de colectores son denominados colectores de placa plana avanzados (AFP), cuyas características se presentan a continuación (Ver tabla 3).

Figura 23: Colector solar de placa plana avanzado



Fuente: Sinersol, Sistemas integrales de la energía solar.

Tabla 3: Características de un colector de placa plana avanzado AFP.

Characteristics of the advanced flat-plate (AFP) collector system	
Parameter	Value
Fixing of risers on the absorber plate	Ultrasonically welded
Absorber coating	Chromium selective coating
Glazing	Low-iron glass
Efficiency mode	n vs $(T_i - T_a)/G$
G_{test} —flow rate per unit area at test conditions (kg/s-m ²)	0.015
a_0 —intercept efficiency	0.80
a_1 —negative of the first-order coefficient of the efficiency (W/m ² °C)	4.78
b_0 —incidence angle modifier constant	0.1

Fuente: The potential of solar industrial process heat applications [6].

3.1.2 Colectores de concentración parabólicos: Este tipo de colector solar concentra la energía en un área reducida aumentando la intensidad energética. Similar a una lupa enfocando su luz en un punto, los concentradores reflejan la luz solar por medio de un arreglo de espejos alineados hacia un objetivo capaz de captar dicha energía para su aprovechamiento. Este tipo de colectores solares no logran un aprovechamiento extenso de la radiación difusa, por lo cual su funcionamiento se basa en los rayos directos del sol (Radiación directa).

El mantenimiento de estos sistemas se basa principalmente en garantizar la reflexión de los sistemas de concentración, los cuales son afectados por las condiciones ambientales en las cuales se desarrolla su instalación.

Este tipo de colectores solares pueden constituirse en configuraciones fijas, denominados colectores solares parabólicos compuestos (CPC).

Figura 24: Colector solar de concentración parabólico.



Fuente: SCHOTT Solar A. G.

Para estos tipos de colectores se consideran las siguientes características de operación:

Tabla 4: Características de un colector solar parabólico CPC.

Characteristics of the compound parabolic collector (CPC) system	
Parameter	Value
F' — collector's fine efficiency factor	0.9
U_L —overall loss-coefficient of collector per unit aperture area ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$)	1.5
ρ_R —reflectivity of walls of CPC	0.85
θ_c —half-acceptance angle of CPC ($^\circ$)	45
h_{av}/h —ratio of truncated to full height of CPC	0.67
Axis orientation	Receiver axis is horizontal and in a plane with a slope of 35° (transverse)
a —absorbance of absorber plate	0.95
N_G —number of cover plates	1
η_R —index of refraction of cover material	1.526
K_L —product of extinction coefficient and the thickness of each cover plate	0.0375

Fuente: The potential of solar industrial process heat applications [6].

Por otro lado los colectores solares de concentración móviles (PTC), siguen la posición del sol con el objetivo de aprovechar al máximo la radiación directa y

operar en su estado óptimo a lo largo del día. Este tipo de colectores permiten temperaturas por encima de 400⁰C, siendo óptimos para la operación en plantas de generación de energía eléctrica.

Figura 25: Colector solar parabólico con seguimiento.



Fuente: Kramer Junction Operating Company.

Tabla 5: Características de un colector solar parabólico con seguimiento PTC.

Characteristics of the parabolic-trough collector (PTC) system	
Parameter	Value/type
Collector rim angle	70°
Reflective surface	Silvered acrylic
Receiver material	Steel
Collector aperture	2.3 m
Receiver surface treatment	Highly selective blackened nickel
Absorptance	0.97
Emittance (80 °C)	0.18
Glass envelope transmittance	0.96
Absorber outside diameter	50.8 mm
G_{test} —flow rate per unit area at test conditions (kg/s m ²)	0.015
a_0 —intercept efficiency	0.762
a_1 —negative of the first-order coefficient of the efficiency (W/m ² °C)	0.2125
a_2 —negative of the second-order coefficient of the efficiency (W/m ² °C)	0.001672
b_0 —incidence angle modifier constant	0.958
b_1 —incidence angle modifier constant	-0.298
Tracking mechanism accuracy	0.05°
Collector's orientation	Axis in N-S direction
Mode of tracking	E-W horizontal

Fuente: The potential of solar industrial process heat applications [6].

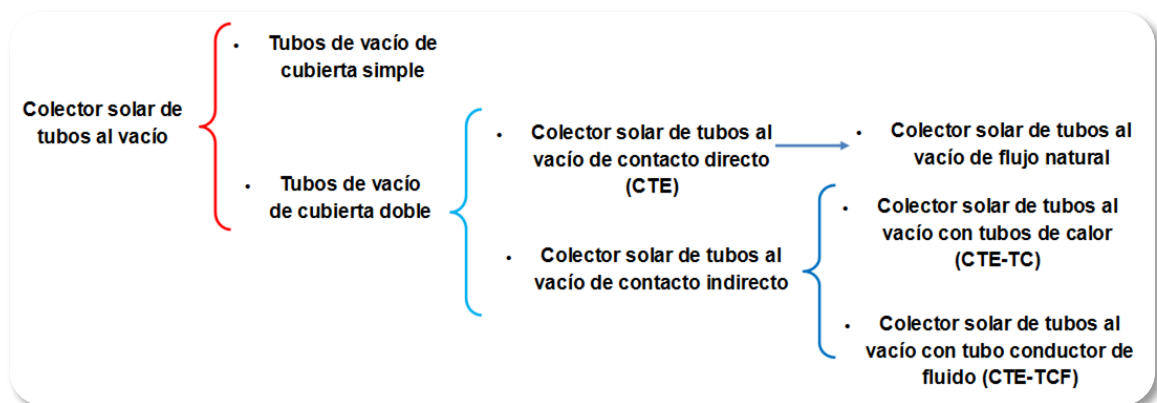
3.1.3 Colector de tubos de vacío (ETC): La idea de evacuar el espacio entre la superficie transparente y la placa absorbente es muy atractiva ya que logra reducir las pérdidas de calor por convección y conducción. Además, con la implementación de una superficie selectiva la pérdida por radiación podría también ser reducida, produciendo el colector solar ideal.

Algunas de las ventajas ofrecidas por estos nuevos sistemas de captación solar son:

- Mínimas pérdidas por transmisión de calor por convección y conducción.
- Su forma cilíndrica aprovecha mejor la radiación a lo largo del día, a primera y última hora.
- Absorbe más cantidad de radiación difusa.
- Ofrece una línea mucho más estética.

Los colectores solares de tubos de vacío presentan una clasificación en función del tipo de tubos de vacío implementados.

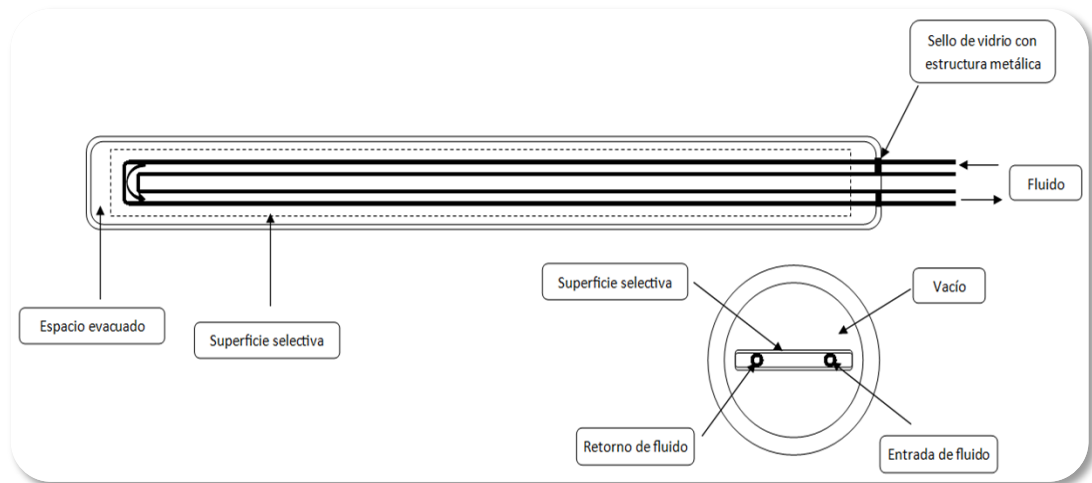
Figura 26: Clasificación de los colectores solares de tubos al vacío



Fuente: Autores.

3.1.3.1 Tubos de vacío de cubierta simple: conocido como Corning Collector en este tipo de tubos de vacío se usa un tubo de vidrio simple en cuyo interior se aloja un tubo en forma de U soldado con un aleta longitudinal tratada con una película absorbente, los extremos del tubo de vidrio son sellados y el vacío se desarrolla en la sección libre entre el tubo de vidrio y el tubo en U.

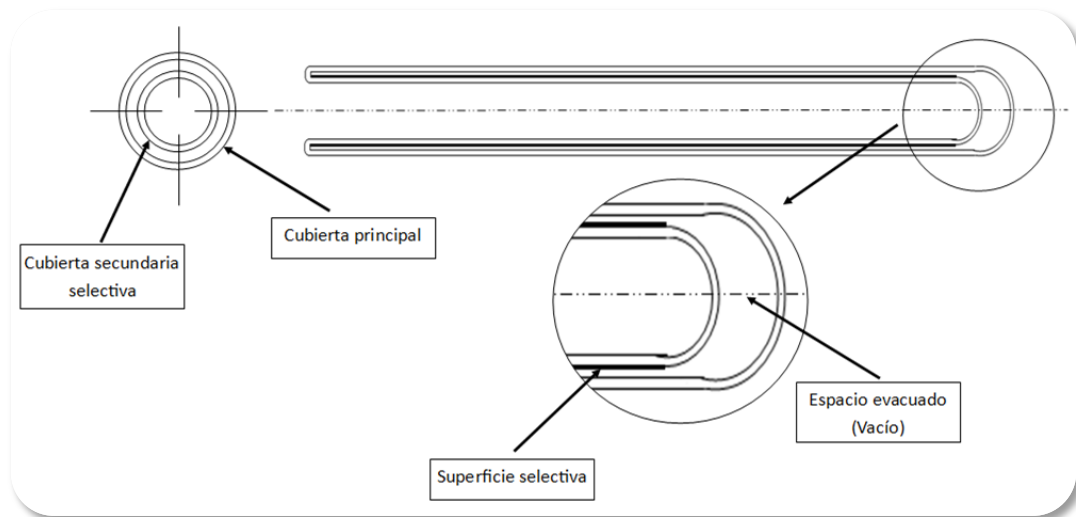
Figura 27: Colector solar evacuado Corning.



Fuente: Autores.

3.1.3.2 Tubo de vacío de cubierta doble: Este tipo de tubos de vacío se conoce con el nombre de Owen Illinois, consiste en dos tubos concéntricos de vidrio cuyos extremos han sido sellados y en la sección anular presente entre los tubos se crea vacío. La superficie exterior del tubo interno de vidrio es tratada con una película absorbente encargada de retener la radiación solar.

Figura 28: Colector solar evacuado Owen Illinois.

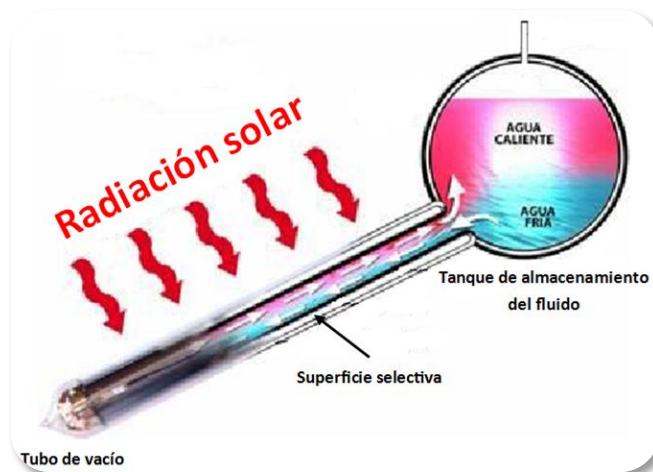


Fuente: Autores.

Es posible obtener la energía absorbida por los tubos de vacío de cubierta doble mediante la implementación de contacto directo del tubo de vacío con el fluido calo-portador o mediante la introducción de un elemento intermedio para el desarrollo de la transferencia de calor desde el tubo de vacío hacia el fluido de trabajo, de esta forma se tiene:

- **Colector de tubos al vacío de contacto directo:** En este tipo de colector (ETC) el fluido de trabajo entra en contacto directo con la superficie captadora, presentado mayor eficiencia en la transferencia de calor. El fluido se mueve a través de los tubos debido al cambio de densidad que presenta a medida que se calienta.

Figura 29: Colector solar de tubos de vacío de flujo natural.



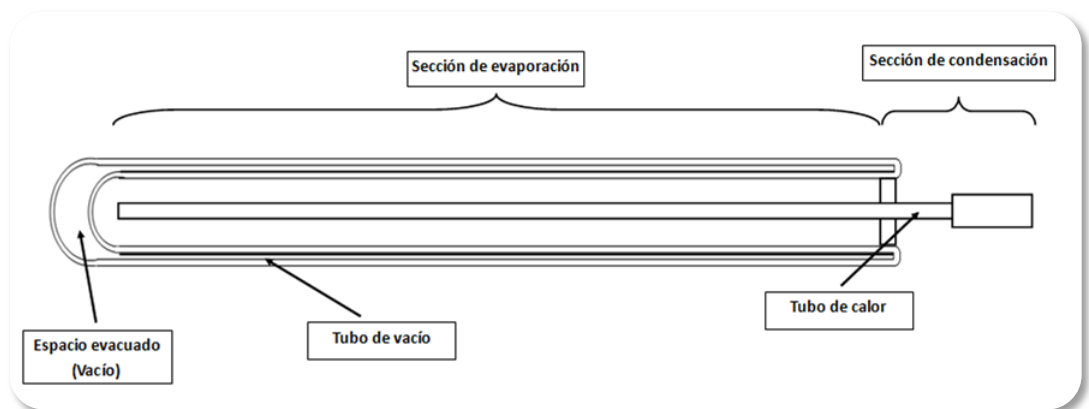
Fuente: <http://www.xinergia.com.uy>, modificado por los autores.

- **Colector de tubos al vacío de contacto indirecto:** En este tipo de colector solar de tubos al vacío la transferencia del calor desde la superficie absorbente hacia el fluido calo-portador se realiza mediante la implementación de un elemento intermedio, de esta forma el fluido no estará en contacto directo con el tubo de vacío. En este caso los métodos de transferencia de calor puede ser con tubos de calor o tubos conductores de fluido.
- **Colectores de tubos de vacío con tubos de calor (Heat pipe).** Este mecanismo consiste en un tubo cerrado en el cual se introduce un fluido de propiedades específicas. Cuando el Sol incide sobre el tubo de vacío, el fluido se evapora, ganando calor (calor latente). Como gas asciende sobre el líquido hasta lo alto del tubo donde se sitúa el foco frío, allí se licua (condensa) y cede su calor latente al fluido de trabajo. Este proceso se repite mientras dure la radiación del Sol o hasta que el colector ha alcanzado una temperatura muy alta.

Dentro de esta tecnología se distinguen dos métodos, el primero reconocido como termosifones en los cuales el líquido condensado en el extremo frío del

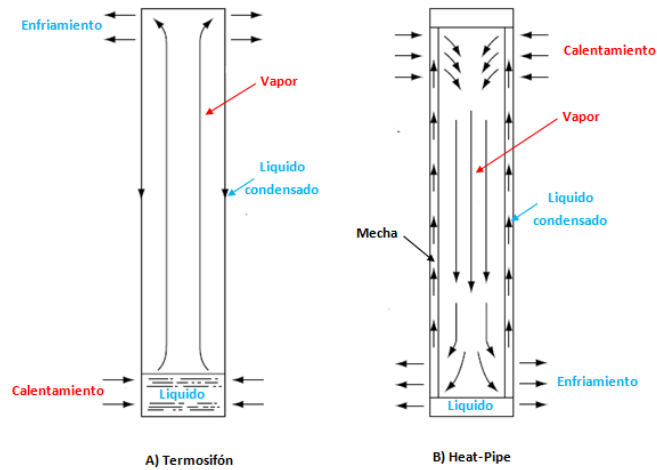
tubo de calor regresa al extremo caliente del mismo por la acción de la gravedad, por lo tanto su efecto se establece en una posición específica (Foco frío en la parte superior y foco caliente en la posición inferior). El segundo, conocido como “heat pipe” en el cual la acción de regresar el fluido del extremo frío al caliente se implementa mediante un proceso de capilaridad introduciendo en el tubo de calor una mecha (Material poroso). En contraste con los termosifones los “heat pipe” pueden operar en cualquier posición. De igual forma, estas dos tecnologías son consideradas superconductores térmicos por lo eficaz de su funcionamiento.

Figura 30: Funcionamiento y estructura de un tubo de vacío con tubo de calor o heat pipe.



Fuente: Autores.

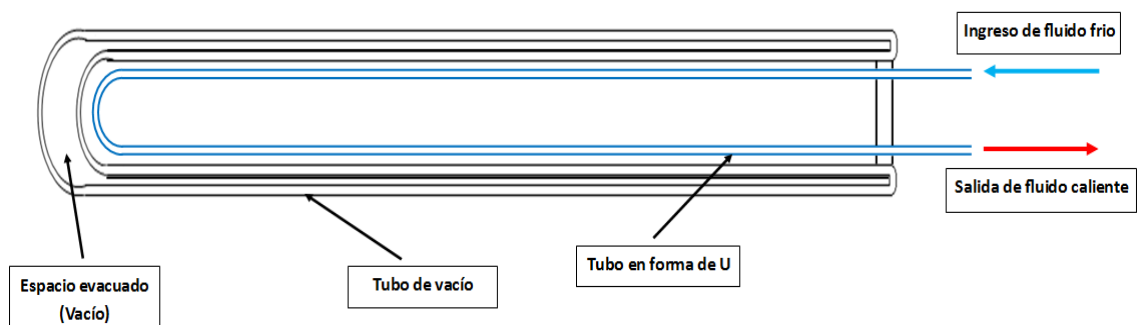
Figura 31: Diferencia entre un termosifón y un tubo de calor.



Fuente: Autores.

- Colectores de tubos de vacío con tubo conductor de fluido:** En este tipo de colectores de tubos de vacío el calor captado se obtiene mediante el ingreso del fluido calo-portador en el tubo interior de vidrio mediante la introducción de tubos en forma de U o tubos coaxiales que transfieren el calor al fluido en tránsito.

Figura 32: Colector de tubos de vacío con tubo conductor de fluido.



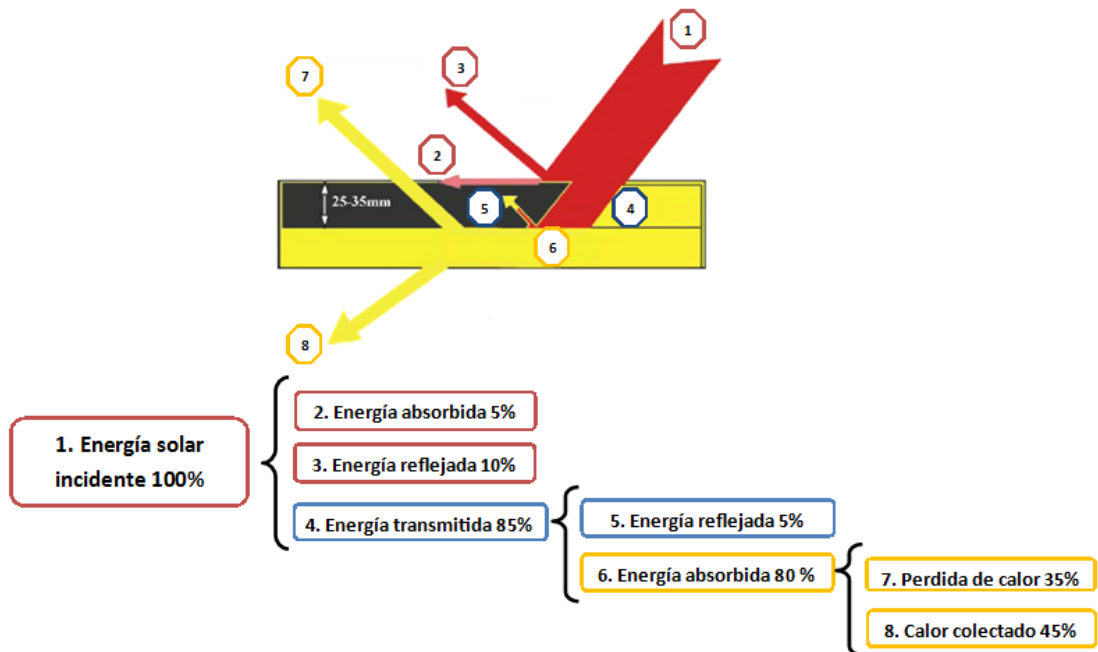
Fuente: Autores.

3.2 EFICIENCIA EN LOS COLECTORES SOLARES

La eficiencia de un colector solar se define como la relación entre la ganancia de energía útil (Q_u) y la energía solar incidente (Q_i) sobre el colector en un determinado tiempo. De esta forma es importante definir como puede ser determinados cada uno de estos factores.

En general un colector solar puede ser esquematizado como se presenta en la Figura 33.

Figura 33: Análisis de la radiación incidente sobre una placa absorbente.



Fuente: Review on solar water heater collector and thermal energy performance of circulating pipe. [10].

Cierta cantidad de calor se incide sobre la superficie externa del colector, cuya cubierta formada por un vidrio o superficie protectora refleja, absorbe y transmite la energía incidente hacia la placa absorbente. Seguidamente, la placa absorbente

también presenta la misma condición del vidrio, en donde se refleja y se absorbe el calor transmitido por el vidrio.

De esta forma se determina el calor incidente sobre el colector como:

$$Q_i = q_{s\beta} * A$$

Donde $q_{s\beta}$ representa la irradiancia ($\frac{W}{m^2}$) y A representa el área de la superficie captadora (m^2).

Sin embargo como fue ilustrado en la figura anterior, parte de este calor incidente sobre el colector se refleja a la atmosfera, el vidrio absorbe parte de este calor y el remanente es transmitido a la placa absorbidora. De esta forma el porcentaje de la irradiancia que es transmitida por la placa transparente y el porcentaje de irradiancia que es absorbida, se indica mediante el factor de conversión $\tau\alpha$, el cual representa el producto de la tasa de transmisión del vidrio y la absorción de la placa:

$$Q_{ia} = q_{s\beta} * \tau\alpha * A$$

Sin embargo a medida que el colector absorbe calor, la temperatura de la placa absorbidora aumenta más que en los alrededores, por lo tanto cierta cantidad de calor es transmitido a la atmosfera por efectos de radiación y convección, para lo cual se define una tasa de calor perdido como:

$$Q_0 = U_L * A * (T_c - T_a)$$

Con U_L representando al coeficiente global de perdida, T_c la temperatura media del colector y T_a la temperatura del ambiente.

De esta forma el calor útil extraído por el colector Q_u , es proporcional a la cantidad de calor absorbido por la placa menos la cantidad de calor perdido con los alrededores.

$$Q_u = Q_{ia} - Q_o = q_{s\beta} * \tau\alpha * A - U_L * A(T_c - T_a)$$

Por otro lado se puede expresar este calor útil en función del fluido que retiene el calor o lo almacena.

$$Q_u = m * C_p * (T_o - T_i)$$

Teniendo T_o como la temperatura de salida del fluido, T_i la temperatura de entrada, m como el flujo másico y C_p el Calor específico del fluido a la temperatura media entre la entrada y la salida.

Sin embargo para determinar el calor se presenta cierta dificultad de establecer la temperatura media del colector, para lo cual se recurre a definir un factor que relaciona la energía útil en la superficie absortiva en función de la temperatura de entrada del fluido en el colector, este factor se conoce como el factor de remoción de calor.

$$F_r = \frac{(m * C_p * (T_o - T_i))}{A * (\tau\alpha - U_L * (T_i - T_a))} [10]$$

Así, cuando todo el colector se encuentra a la temperatura de entrada del fluido se alcanza la máxima ganancia de calor, por lo tanto la energía útil del sistema puede ser determinada como:

$$Q_u = A_c * F_r * (q_{s\beta} * \tau\alpha - U_L(T_i - T_a)) [10]$$

De esta forma es posible definir la eficiencia del colector.

$$\eta = \frac{Q_u}{A * I} = A_c * F_r * \frac{q_{s\beta} * \tau\alpha - U_L(T_i - T_a)}{A * q_{s\beta}} [10]$$

$$\eta = F_r * (\tau\alpha) - F_r * U_L * \frac{T_i - T_a}{q_{s\beta}}$$

$$\eta = F_r * (\tau\alpha) - F_r * U_L * I$$

I – Factor potencial de perdida por unidad de calor incidente

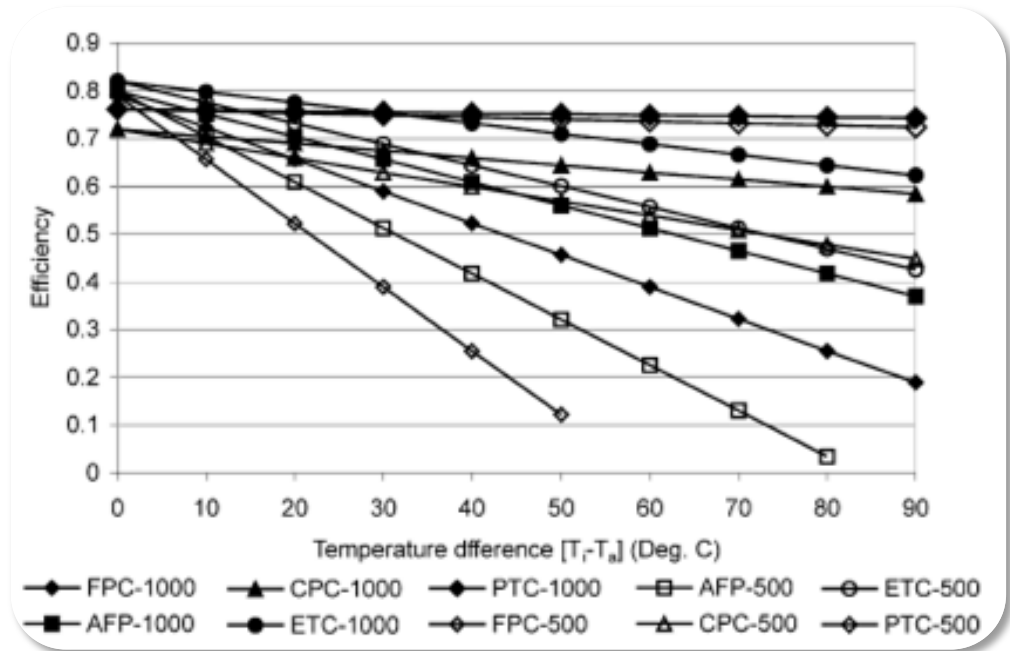
Sin embargo, es posible definir una correlación que establezca la eficiencia para cualquier tipo de colector.

$$\eta = a_0 * K_{\alpha\tau} - a_1 * \frac{\Delta T}{q_{s\beta}} - a_2 * \left(\frac{\Delta T^2}{q_{s\beta}} \right) [10]$$

En este caso se define ΔT como $(T_i - T_a)$. De esta forma la ecuación presenta la misma forma que la ecuación determinada previamente, sin embargo se considera un tercer elemento a_2 el cual hace referencia a colectores solares con seguimiento solar. En este caso los factores a_0 y a_1 son función de las propiedades ópticas del colector y el factor de perdida de calor respectivamente.

Considerando la ecuación anterior y las propiedades definidas para cada tipo de colector solar (Ver sección 3.1), es posible desarrollar un proceso comparativo permitiendo establecer la eficiencia en función del diferencial de temperatura para dos casos en particular, el primero definido cuando se presenta una irradiancia de $1000 \frac{W}{m^2}$ y el segundo considerando una irradiancia de $500 \frac{W}{m^2}$.

Figura 34: Curvas de eficiencia de colectores en función de la diferencia de temperaturas.



Fuente: The potential of solar industrial process heat applications [6].

3.3 APLICACIÓN DE COLECTORES SOLARES A NIVEL INDUSTRIAL

De los numerosos estudios en las necesidades industriales en cuanto a las demandas de fuentes de calor, ciertos sectores industriales han sido identificados con las condiciones para la aplicación de la energía solar como fuente alternativa. Los procesos industriales que usan fuentes de calor en niveles medios de temperatura son:

- Esterilización
- Pasteurización
- Secado
- Destilación y evaporación
- Lavado
- Polimerización

La industria alimenticia y textil presentan condiciones favorables para la implementación de fuentes energéticas solares (Ver tabla 6), en donde la esterilización, pasteurización y pre-cocción de los productos pueden representar un consumo energético elevado y tiempos de proceso considerablemente largos.

Tabla 6: Rango de temperaturas en diversos procesos industriales.

Industria	Proceso	Temperatura (°C)
Lácteos	Presurización	60-80
	Esterilización	100-120
	Secado	120-180
	Evaporación de agua	60-90
Comida enlatada	Esterilización	110-120
	Pasteurización	60-80
	Cocción	60-90
	Blanqueo	60-90
Textil	Blanqueo	60-90
	Secado	100-130
	Teñido	70-90
	Fijación	160-180
	Prensado	80-100
Papel	Cocción y secado	60-80
	Blanqueo	60-90
	Evaporación de agua	60-90
bebidas	Lavado y Esterilización	60-80
	Pasteurización	60-70
	Lavado y Esterilización	60-90
Cárnica	Cocción	90-100

Fuente: The potential of solar industrial process heat applications [6].

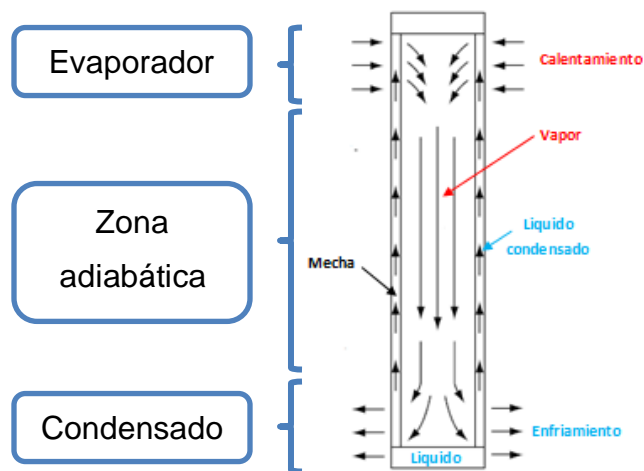
Por otro lado la implementación de sistemas solares está siendo realizada en aplicaciones tales como la refrigeración y acondicionamiento de viviendas, oficinas y hospitales; con el uso de sistemas de absorción. De esta forma el sistema de

refrigeración es independiente de fuentes convencionales de energía, y por lo tanto pueden representar un ahorro energético significativo.

4 DISEÑO DE TUBOS DE CALOR

El tubo de calor es en esencia un recipiente (Contenedor) del cual ha sido extraído el aire y cuyas paredes están revestidas con una estructura capilar (Mecha) la cual es saturada con un fluido volátil. El funcionamiento de un tubo de calor combina dos principios tales como la transferencia de calor por cambio de estado y el efecto de capilaridad. La transferencia de calor por condensación es la responsable de transportar la energía en forma de calor desde la sección del evaporador en un extremo del tubo hacia la sección del condensador en el otro extremo. Por otro lado, el efecto capilar es el encargado de enviar de vuelta el fluido de trabajo del condensado al evaporador, sin necesidad de una fuente de energía externa.

Figura 35: Funcionamiento de un tubo de calor.



Fuente: Autores.

4.1 MATERIALES Y COMPONENTES

Un tubo de calor se encuentra constituido principalmente por tres componentes: el fluido de trabajo, el cual puede variar desde nitrógeno hasta amoníaco para tubos de calor que operan a bajas temperaturas, a mercurio y plata que permiten la

implementación de tubos de calor en aplicaciones en temperaturas elevadas; una estructura absorbente o mecha, construida por tejidos de fibra, mallas de cobre o acero inoxidable, metal sinterizado, fieltro o espumas metálicas; y un recipiente o contenedor construido en cobre, acero inoxidable, vidrio o aluminio. La selección adecuada de cada uno de estos tres componentes juega un papel muy importante en el desempeño del tubo de calor, por lo cual es importante considerar sus propiedades termo físicas y la compatibilidad entre ellos, de tal forma que se ajuste a la aplicación que se desea.

4.1.1 Fluidos de trabajo: Una consideración inicial en el diseño de tubos de calor, debe ser la identificación del fluido de trabajo en el rango de temperaturas en el cual va a operar el tubo de calor. De esta forma, para un rango de temperaturas dadas se pueden identificar varios fluidos de trabajo, por lo cual es importante evaluar algunas características con el objetivo de determinar el fluido más adecuado para la aplicación que se está considerando. Para este caso las características más relevantes del fluido de trabajo deben ser:

- **Compatibilidad con la mecha y el contenedor:** los problemas asociados con la vida útil de los tubos de calor son relación directa con la compatibilidad de los materiales que los constituyen.
- **Buena estabilidad térmica:** Para algunos fluidos de trabajo es necesario considerar las temperaturas a las cuales la descomposición del fluido puede ser un problema.
- **Capacidad para mojar la mecha y el contenedor.**
- **Calor latente alto:** Permite una mayor transferencia de calor con flujos más bajos, lo cual reduce las pérdidas de presión en el tubo de calor.
- **Conductividad térmica alta:** Es deseable con el objetivo de minimizar el gradiente de temperatura radial al tubo de calor.
- **Viscosidad en líquido y vapor bajas:** esto permite mínimas pérdidas de presión por el flujo del fluido de trabajo en estado líquido a lo largo de la mecha.

- **Tensión superficial alta:** es deseable con el objetivo de operar contra la gravedad o para crear una fuerza capilar alta.

Tabla 7: Rangos de temperatura de operación para fluidos de trabajo en tubos de calor.

Fluido	Punto de Congelación	Punto de ebullición a presión atmosférica	Rango de temperatura de operación
Helio	-271	-261	-271 a -269
Nitrógeno	-210	-196	-203 a -160
Amoniaco	-78	-33	-60 a 100
Pentano	-130	28	-20 a 120
Acetona	-95	57	0 a 120
Metanol	-98	64	10 a 130
Etanol	-112	78	0 a 130
Heptano	-90	98	0 a 150
Agua	0	100	30 a 200
Tolueno	-95	110	50 a 200
Mercurio	-39	361	250 a 650

Fuente: Heat Pipes: Theory, Design and applications [1].

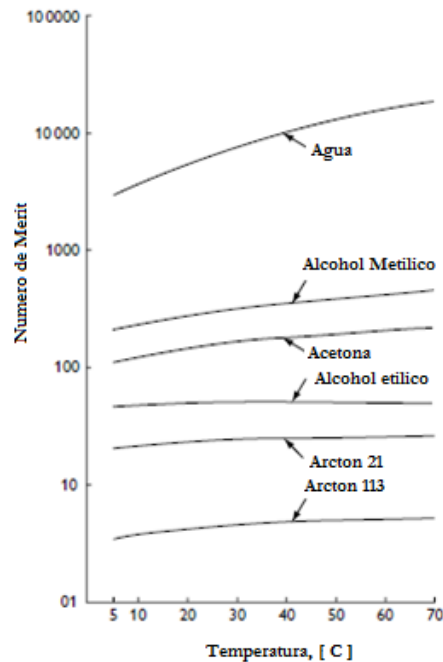
Considerando algunas de las propiedades más importantes del fluido de trabajo, se puede desarrollar una primera comparación de los mismos mediante la evaluación del número de Merit, definido como:

$$M = \frac{\sigma_L * L * \rho_L}{\mu_L} [1]$$

Donde σ_L representa la tensión superficial de líquido, L el calor latente de vaporización, ρ_L la densidad del líquido y μ_L la viscosidad del líquido. Considerando el número de Merit, se puede observar la superioridad del agua sobre muchos otros fluidos de trabajo para trabajar en un rango de temperaturas de 30 a 200 °C (Ver figura 36).

La selección final del fluido de trabajo, será entonces no solo la consideración del número de Merit, sino también se deben considerar aspectos tales como: costo, asequibilidad, compatibilidad y seguridad.

Figura 36: Numero de Merit para fluidos de trabajo de temperatura media.

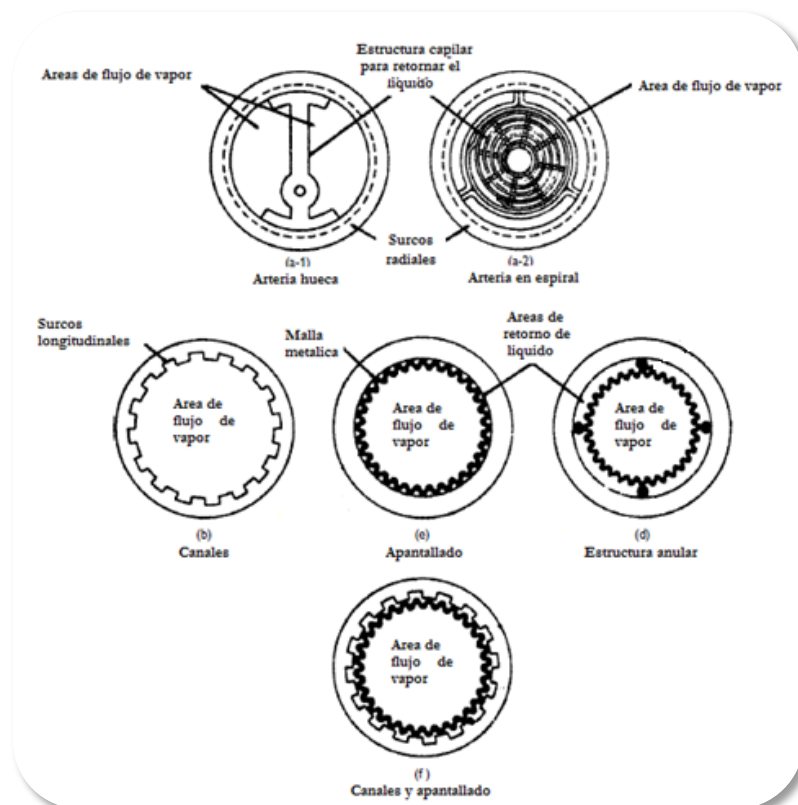


Fuente: Advanced Cooling Technologies, Inc. (ACT).

4.1.2 Mecha o estructura capilar: El propósito fundamental de la mecha es la de generar presión capilar para transportar el fluido de trabajo desde el condensador hasta el evaporador. Además, debe tener la capacidad de distribuir el líquido alrededor de la sección del evaporador en las áreas en las que el calor ha de ser recibido por el tubo de calor.

La selección de la mecha o estructura capilar para un tubo de calor depende de varios factores relacionados con las propiedades del fluido de trabajo. Sin embargo, es de destacar que una estructura capilar presenta un incremento en el efecto de la capilaridad en función de la disminución del tamaño efectivo de poro de la misma. Por otro lado, otro factor importante a tener en cuenta es la permeabilidad, la cual se mejora con un aumento del tamaño efectivo de poro.

Figura 37: Estructuras capilares usadas en tubos de calor.



Fuente: Heat Pipes: Theory, Design and applications [1].

Considerando la selección de la estructura capilar, se distinguen dos tipos de estructuras capilares tales como mechas homogéneas y mechas arteriales.

➤ **Mecha homogénea** Este tipo de estructura capilar esta comúnmente construida por mallas o telas cruzadas de diversos materiales incluyendo cobre, acero inoxidable, níquel y aluminio que permiten tamaños efectivos de poro distintos.

Recientemente, se vienen implementando las espumas metálicas, metales sinterizados o fieltros como mechas homogéneas las cuales permiten variar el tamaño de poro durante la fabricación del tubo de calor.

El uso de fibras ha sido ampliamente usado en la manufactura de tubos de calor, debido a que presentan un tamaño de poro pequeño, su desventaja radica en la necesidad de usar una estructura de soporte debido a su baja rigidez. Dentro de estas estructuras capilares se destaca la fibra de vidrio y la fibra de carbono, esta última contiene filamentos con finas muescas longitudinales en su superficie, lo cual mejora su capacidad capilar.

Figura 38: Estructuras capilares homogéneas usadas comercialmente.



Fuente: <http://www.frostytech.com>, Heatpipe Wick Structures.

A continuación, se presentan las características de tamaño de poro, permeabilidad y porosidad para diversas estructuras capilares homogéneas.

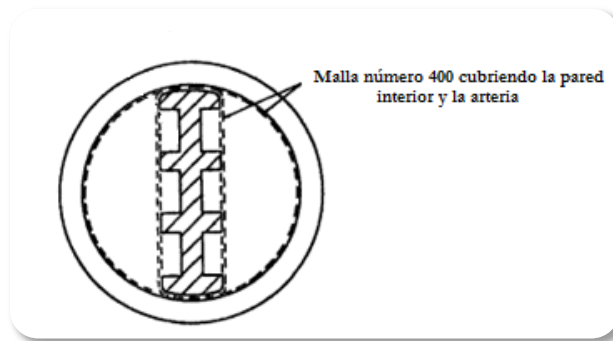
Tabla 8: Datos de radio de efectivo de poro y permeabilidad para diversos tipos materiales.

Material	Altura capilar [cm]	Radio efectivo de poro [cm]	Permeabilidad [m ²]	Porosidad [%]
Fibra de vidrio	25,4	-	0,61*10 ⁽⁻¹¹⁾	-
Filtro metálico				
FM1006	10	0,004	1,55*10 ⁽⁻¹⁰⁾	-
FM1205	-	0,008	2,54*10 ⁽⁻¹⁰⁾	-
Níquel sinterizado				
200µm	24,6	0,038	0,027*10 ⁽⁻¹⁰⁾	-
500µm	>40,0	0,004	0,081*10 ⁽⁻¹¹⁾	-
Espuma de cobre				
Amporcop 220,5	-	0,021	1,9*10 ⁽⁻⁹⁾	91
Cobre sinterizado				
45-56 µm	-	0,009	-	28,7
100-145 µm	-	0,0021	-	30,5
150-200 µm	-	0,0037	-	35
Malla de níquel (mesh 50)	4,8	0,0305	6,635*10 ⁽⁻¹⁰⁾	-
Malla de acero inoxidable				
mesh 80	-	0,013	2,57*10 ⁽⁻¹⁰⁾	-
mesh 90	-	0,011	1,28*10 ⁽⁻¹⁰⁾	-
mesh 120	-	0,008	0,79*10 ⁽⁻¹⁰⁾	-
mesh 250	-	0,0051	-	-

Fuente: Heat Pipes: Theory, Design and applications [1].

- **Mechas arteriales:** Este tipo de mechas se implementan en tubos de calor de alto rendimiento, en donde los gradientes de temperatura en el tubo de calor deben ser minimizados para contrarrestar los efectos de la baja conductividad térmica de los fluidos de trabajo. El propósito de este sistema capilar es la de generar el transporte del fluido a lo largo del tubo de calor minimizando la caída de presión.

Figura 39: Estructura de una mecha arterial.



Fuente: Heat Pipes: Theory, Design and applications [1].

4.1.3 Contenedor: La función del contenedor es el aislamiento del fluido de trabajo del exterior. De esta forma debe ser a prueba de fugas, soportar la presión diferencial que se presenta en sus paredes y claramente debe tener la capacidad de permitir la transferencia de calor del exterior hacia el fluido de trabajo.

La selección del material del contenedor depende de varios factores, entre los cuales se encuentran:

- Compatibilidad con el fluido de trabajo y la estructura capilar.
- Buena conductividad térmica, con el objetivo de garantizar mínima caída de temperatura entre la fuente de calor y la estructura capilar.
- Facilidad de fabricación, considerando soldabilidad, maquinabilidad y ductilidad.
- Facilidad para ser mojado.

La compatibilidad del contenedor es uno de los factores más importantes en la selección del contenedor ya que la corrosión y la generación de gases no condensables en el interior del tubo de calor pueden deteriorar considerablemente el funcionamiento y la capacidad del mismo. De esta forma si el contenedor o la estructura capilar son solubles en el fluido de trabajo la transferencia de masa puede ocurrir depositando material en el condensador degradando la acción capilar de la mecha. Por otro lado, la generación de gases no condensables es el indicador de falla más común en un tubo de calor, lo cual se puede identificar mediante la presencia de una disminución brusca en la temperatura en la interface gas/vapor.

La evaluación experimental de la vida útil de diversos tubos de calor ha permitido la obtención de datos relevantes de compatibilidad para diversos materiales operando en rangos de temperatura controlados. Sin embargo es importante reconocer que la compatibilidad de ciertos materiales es función de los procedimientos de manufactura, en los cuales la limpieza del contenedor y la mecha o la pureza del fluido de trabajo son factores que determinan la vida útil de un tubo de calor. Considerando estos efectos la tabla 9 presenta algunos datos de compatibilidad para algunos materiales.

Tabla 9: Datos de compatibilidad para fluidos de trabajo de bajas temperaturas.

d	Fluidos de trabajo			
	Agua	Acetona	Amoniaco	Metanol
Cobre	RU	RU	D	RU
Aluminio	GNC	RL	RU	NR
Acero Inoxidable	GNT	PC	RU	GNT
Níquel	PC	PC	RU	RL
Fibra Refrasil	RU	RU	RU	RU

Continuación tabla 9.

RU	Recomendado por aplicaciones pasadas
RL	Recomendado por la literatura
PC	Probablemente compatible
D	Desconocido
GNC	Generación de gases no condensables en todas las temperaturas
GNT	Generación de gases no condensables a temperaturas elevadas con presencia de oxidación

Fuente: Heat Pipes: Theory, Design and applications [1].

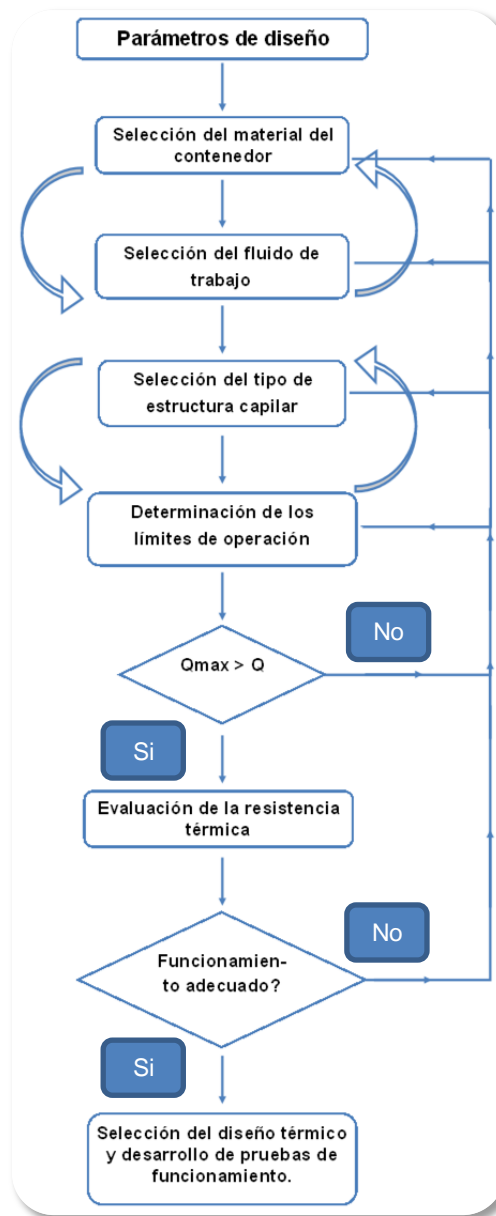
4.2 PROCESO DE DISEÑO DE TUBOS DE CALOR

El diseño de tubos de calor para cumplir con una aplicación especial se desarrolla mediante la implementación de cuatro etapas:

1. Determinación de los parámetros de diseño.
2. Selección de los materiales.
3. Evaluación de los límites de desempeño.
4. Evaluación del desempeño.

Considerando estos aspectos se presenta a continuación el proceso de diseño que debe ser llevado a cabo, con el objetivo de cumplir con los requerimientos estipulados por las condiciones de trabajo.

Figura 40: Proceso de diseño para tubos de calor.



Fuente: Autores.

Considerando el diagrama de flujo presentado en la figura 40 se puede ver que el diseño de un tubo de calor, puede ser un proceso en que muchas de las decisiones se encuentran relacionadas y en que el proceso es iterativo. A

continuación se determinará con detalle cada uno de los pasos a seguir en el proceso de diseño.

4.2.1 Determinación de los parámetros de diseño: El diseño de tubos de calor se debe basar en primera instancia en un número de aplicaciones específicas en las que los tubos de calor pueden presentar cierta ventaja frente a otros sistemas de transferencia de calor, entre los cuales se encuentran:

- **Separación de la fuente de calor y el disipador:** La alta conductividad térmica que presentan los tubos de calor les permiten transferir calor a lo largo de distancias considerables. De esta forma si se requiere separar la fuente caliente de la fuente de disipación, los tubos de calor representa una opción adecuada. En muchas ocasiones esta condición es requerida debido a que los componentes que rodean la fuente caliente pueden verse afectados por el calor y por tanto la disipación del calor debe desarrollarse en un lugar apartado del sistema.
- **Temperatura isotérmica en el proceso de transferencia de calor:** En su operación los tubos de calor presentan un funcionamiento casi isotérmico, lo cual puede ser aprovechado en aplicaciones especiales en las que se desea esta condición.
- **Transformación del flujo de calor:** En este caso se describe la capacidad que tiene un tubo de calor para aumentar o disminuir el flujo de calor mediante la selección del área de transferencia de calor de la sección condensadora o evaporadora.
- **Control de temperatura:** Hace referencia a la capacidad que presentan algunos tubos de calor para mantener una temperatura constante en la sección del evaporador, lo cual puede ser implementado en aplicaciones en las que aunque se presenta un aumento o disminución del flujo de calor, la temperatura se conservara constante.

- **Diodos e interruptores térmicos:** En este caso se recurre a una de las propiedades de los tubos de calor en la cual el flujo de calor se desarrolla en una única dirección.

Reconociendo las aplicaciones de los tubos de calor el diseño de los mismos inicia con la determinación de los parámetros de operación, entre ellos:

- Geometría
- Temperaturas de operación
- Flujo de calor
- Orientación

4.2.2 Selección de materiales: Como fue descrito con anterioridad (Ver sección 4.1), los componentes de los tubos de calor son en general el contenedor, la mecha o estructura capilar y el fluido de trabajo, de esta forma la selección de los mismos debe desarrollarse teniendo en cuenta las condiciones de operación bajo las cuales se encontrarán. Sin embargo, la selección es susceptible de ser afectada por la compatibilidad entre cada uno de los componentes.

4.2.3 Evaluación de límites de operación: Reconociendo a los tubos de calor como elementos notablemente versátiles y adecuados para el desarrollo de procesos de transferencia de calor, estos deben operar bajo ciertas limitaciones de diseño, las cuales determinarán el máximo calor que puede ser transferido en un rango de temperaturas dado. De esta forma cada uno de los límites de operación debe ser evaluado por separado

Los límites de operación de los tubos de calor son:

4.2.3.1 Limite capilar: Con el objetivo de que el tubo de calor opere de forma adecuada, la máxima presión capilar debe ser mayor que las caídas de presión en el tubo de calor. Para lo cual se debe cumplir que:

$$\Delta P_c \geq \Delta P_L + \Delta P_V + \Delta P_g [1]$$

ΔP_c – Presion capilar

ΔP_L – Presion de liquido

ΔP_V – Presion de vapor

ΔP_g – Presion gravitacional

Es así como las caídas de presión en el tubo de calor se consideran a causa de:

- Caída de presión requerida para retornar el líquido desde el condensador al evaporador (ΔP_L).
- Caída de presión que provoca el movimiento del vapor del evaporador al condensador (ΔP_V).
- La presión requerida para vencer la acción gravitacional, la cual puede ser cero, positiva o negativa dependiendo de la inclinación del tubo de calor (ΔP_g).

Cada uno de estos valores pueden ser evaluados por separado para determinar la capacidad de un tubo de calor, de esta forma tenemos que la presión capilar desarrollada por una mecha homogénea puede ser estimada como:

$$\Delta P_c = 2 * \sigma_L * \left(\frac{\cos(\theta_c)}{r} \right) [1]$$

Donde σ_L representa la tensión superficial del fluido de trabajo en estado líquido a la temperatura de trabajo, θ_c es el ángulo de contacto entre la estructura capilar y el fluido de trabajo, y r representa el radio efectivo de poro de la mecha o estructura capilar.

Seguidamente, considerando como base la ecuación de flujo laminar de Hagen-Poiseuille, puede ser determinada la caída de presión a causa del flujo de líquido a lo largo de la mecha, desde la sección del condensador al evaporador.

$$\Delta P_L = \frac{b * \mu_L * Q * L_{eff}}{\pi * (r_w^2 - r_v^2) * \varepsilon * r^2 * \rho_L * L} [1]$$

En este caso b representa una constante adimensional relacionada con la mecha, μ_L es la viscosidad cinemática del fluido de trabajo en estado líquido a la temperatura de trabajo, Q representa el calor transferido a lo largo del tubo de calor, $\pi * (r_w^2 - r_v^2) * \varepsilon$ expresa el área transversal de flujo a través de la estructura capilar, r es el radio efectivo de poro de la estructura capilar, ρ_L establece la densidad de líquido, L representa el calor latente de vaporización y finalmente L_{eff} establece una longitud efectiva de flujo, ya que el flujo en las secciones del evaporador y el condensador puede variar.

$$L_{eff} = L_a + \frac{L_e + L_c}{2} [1]$$

L_a – Longitud de la sección adiabática

L_e – Longitud de la sección del evaporador

L_c – Longitud de la sección del condensador

De forma similar al análisis desarrollado con anterioridad, se puede determinar la caída de presión a causa del flujo de vapor en el tubo de calor, en este caso, es importante reconocer que el análisis presente a continuación considera un flujo incompresible y unidimensional, en cada una de la sección del tubo de calor (Evaporador, condensador y sección adiabática):

$$\Delta P_v = \frac{8 * \dot{m} * \mu_v}{\rho * \pi * r_v^4} * L_{eff} [1]$$

En este caso las propiedades se evalúan en estado de vapor, y el radio r_v representa el radio de la sección de flujo de vapor.

Finalmente, es importante evaluar la presión gravitacional, ya que esta determina en gran medida la capacidad del tubo de calor.

$$\Delta P_g = \rho_L * g * L_{eff} * \sin(\theta) [1]$$

Para este caso se evalúa la presión relacionada con la altura de columna de líquido necesaria para el transporte del fluido de trabajo desde la sección del condensador al evaporador, de esta forma se considera ρ_L la densidad de líquido, g aceleración de la gravedad, L_{eff} representa la longitud efectiva del tubo de calor y ϕ el ángulo de inclinación del tubo de calor respecto a la horizontal.

4.2.3.2 Límite de arrastre: En este caso se analiza el fenómeno que se presenta en la interfaz líquido vapor en la cual la velocidad del vapor del tubo de calor puede ser lo suficientemente alta como para arrancar líquido de la superficie de la mecha y transportarlo al condensador, con lo cual se limita la capacidad de transporte de calor. De esta forma el límite de arrastre puede ser evaluado en función del número de Weber, el cual representa la relación entre las fuerzas de inercia presentes en el vapor y la fuerza de tensión superficial del líquido:

$$We = \frac{\rho_V * v^2 * z}{2 * \pi * \sigma_L} [1]$$

Para este caso ρ_V representa la densidad del vapor, v establece la velocidad del vapor, σ_L es el valor de la tensión superficial de líquido y por ultimo z es una dimensión que caracteriza la superficie entre el vapor y el líquido.

De esta forma, si se relaciona el número de Weber con el calor transportado por el tubo de calor de la forma $q = \rho_V * L * v$ es posible determinar el calor máximo permisible como:

$$Q_a = \sqrt{\frac{2 * \pi * \rho_V * L^2 * \sigma_L}{z}} [1]$$

4.2.3.3 Limite sónico: En algunos casos especiales en los que el fluido de trabajo es un metal líquido, y por tanto las temperaturas de operación son elevadas, el vapor puede llegar a alcanzar valores sónicos o supersónicos en la

parte final de la sección del evaporador, lo cual tiende a aumentar la presión, y por tanto el tubo de calor tendería a trabajar en dirección contraria, de esta forma se define un límite de calor permitido para esta condición.

$$Q_s = \frac{\rho_v * A * C_0 * L}{\sqrt{(2 * (\gamma + 1))}} [1]$$

En este caso se introducen valores tales como el factor de compresibilidad del fluido de trabajo (γ), el valor de la velocidad del sonido como referencia (C_0) y el valor del área de transferencia de calor de la sección del evaporador (A).

4.2.3.4 Limite viscoso: Cuando en un tubo de calor se presenta un baja temperatura de operación, la diferencia de presiones entre el condensador y el evaporador no serán los suficientes como para vencer las fuerzas viscosas presentes, de esta forma el vapor del evaporador no se moverá hacia el condensador y por tanto el ciclo a lo largo del tubo de calor no se cumplirá. Es así como la máxima capacidad de un tubo de calor para sobre llevar esta condición se desarrolla cuando:

$$Q_v = \frac{\pi * r_v^4 * L * \rho_v * P_v}{12 * \mu_v * L_{eff}} [1]$$

En este caso r_v representa el radio de la sección circular por la cual circula el vapor y P_v la presión de vapor a la temperatura de operación.

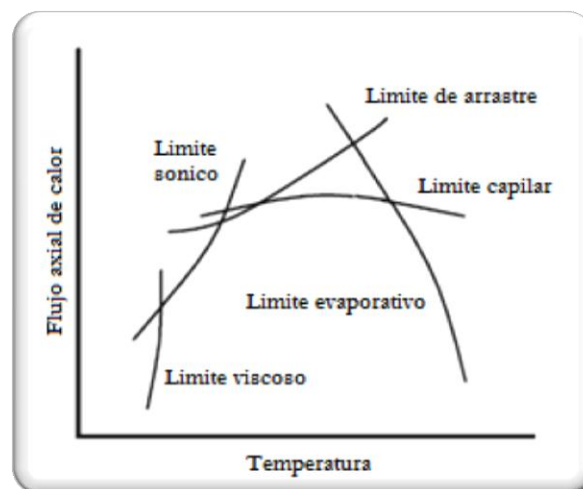
4.2.3.5 Limite evaporativo: Este límite se evalúa cuando la rata de transferencia de calor en el evaporador es lo suficientemente elevada como para crear una evaporación nucleada en la mecha. Esto crea burbujas de vapor que parcialmente bloquean la acción de la mecha de regresar el fluido de trabajo de la sección del condensador al evaporador generando el secado de la mecha. El calor máximo permitido bajo esta condición puede ser evaluado como:

$$Q_b = \frac{4 * \pi * L_{eff} * T_v * \sigma_v}{L * \rho_v * \ln \frac{r_i}{r_e}} * \left(\frac{1}{r_n} - \frac{1}{r_c} \right) [1]$$

Para este caso se reconoce a r_i y r_e como los radios internos y externos del contenedor, r_c es el radio efectivo de poro para la estructura capilar, T_v es la temperatura de vapor y r_n radio interno de la estructura capilar.

Con base en la determinación de los límites de operación citados con anterioridad, es posible establecer el comportamiento de un tubo de calor en función de la temperatura de operación, evaluando cada uno de los límites en el rango de temperaturas apropiado (Ver Figura 41).

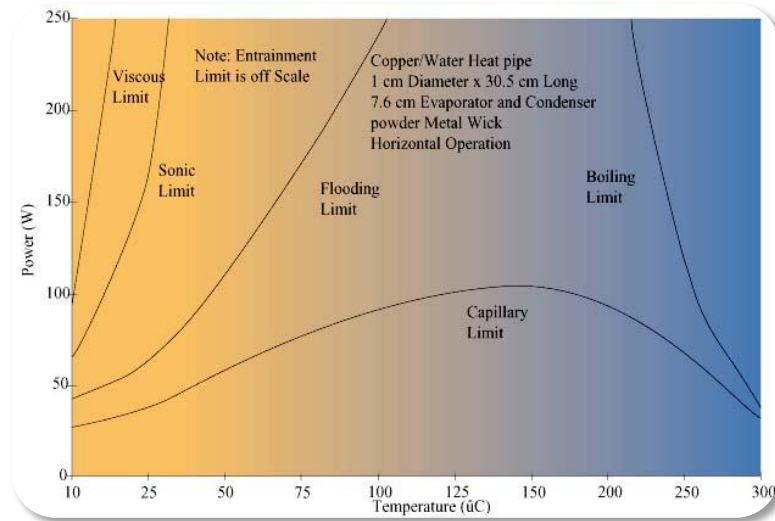
Figura 41: Límites de operación en tubos de calor.



Fuente: Heat Pipes: Theory, Design and applications [1].

Finalmente es importante destacar que los límites que representan una mayor influencia en el comportamiento del tubo de calor son el límite evaporativo y el límite capilar.

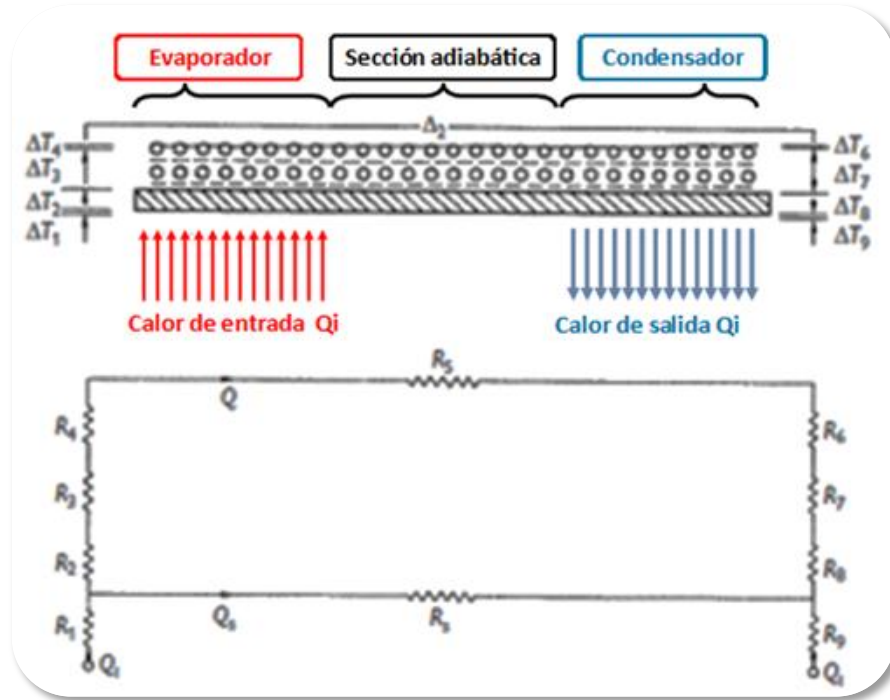
Figura 42: Límites de operación para un tubo de calor con agua como fluido de trabajo.



Fuente: <http://china-heatpipe.net>

4.2.4 Estudio de la transferencia de calor un tubo de calor: En este caso se considerara la transferencia de calor y las caídas de temperatura asociadas a los elementos que constituyen un tubo de calor. Lo anterior puede ser representado por el circuito equivalente de resistencias térmicas presentes en la figura 43.

Figura 43: Caídas de temperatura y resistencia térmica equivalente en tubos de calor.



Fuente: Heat Pipes: Theory, Design and applications [1].

En este caso cada una de las resistencias térmicas presentes se encuentra asociada a un fenómeno de transferencia de calor, para lo cual se tiene que:

- R1 y R9 son resistencias térmicas relacionadas al calentamiento de superficies sólidas, las cuales pueden estar gobernadas por fenómenos de conducción, convección o radiación.
- R2 y R8 representan la resistencia térmica que se presenta en la pared del contenedor, en este caso se asocia a un fenómeno conductivo.
- R3 y R7 establecen la resistencia térmica presente en la estructura capilar, en este caso se incluye la diferencia de temperaturas entre la pared del contenedor y el líquido hasta lograr atravesar la estructura capilar.

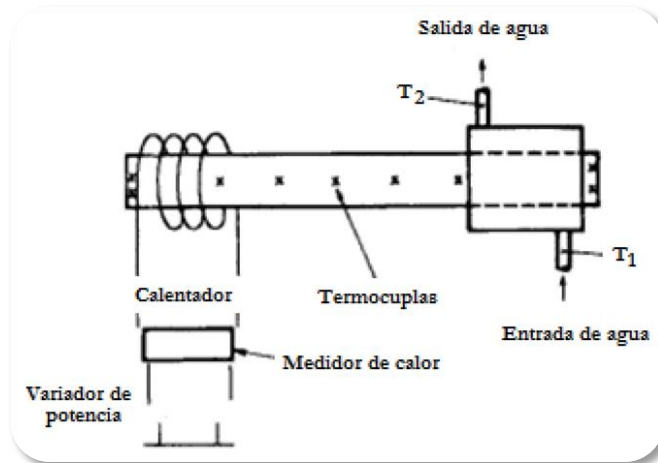
- R4 y R5 son las resistencias térmicas correspondientes a la caída de temperatura en la interfaz líquido vapor, sin embargo en ocasiones puede ser despreciada.
- R6 se relaciona con la caída de presión a lo largo del tubo de calor.
- Rs es la resistencia térmica asociada con la transferencia de calor a lo largo del contenedor, en muchas ocasiones puede ser despreciada, sin embargo hace parte importante de los análisis de arranque.

De esta forma es posible evaluar cada una de las resistencias anteriormente mencionadas teniendo en cuenta la tabla presente en el anexo A.

4.2.5 Evaluación del desempeño del tubo de calor: Con el objetivo de determinar la capacidad de un tubo de calor, es importante desarrollar un análisis experimental de su desempeño la cual permite establecer que el tubo de calor cumple con las especificaciones establecidas en el diseño; por otro lado, es posible desarrollar procesos de investigación en los que se pueden incluir la compatibilidad de los materiales, la variación de la capacidad del tubo de calor en función de la orientación, variación de la temperatura de vapor en el tubo de calor, vibraciones y el análisis del funcionamiento transitorio del tubo de calor en el proceso de arranque.

Un aparejo normalmente usado para la experimentación en tubos de calor se presenta a continuación.

Figura 44: Montaje para evaluación del desempeño en tubos de calor.



Fuente: Heat Pipes: Theory, Design and applications [1].

En este sistema representado en la figura 44 se deben integrar los siguientes elementos:

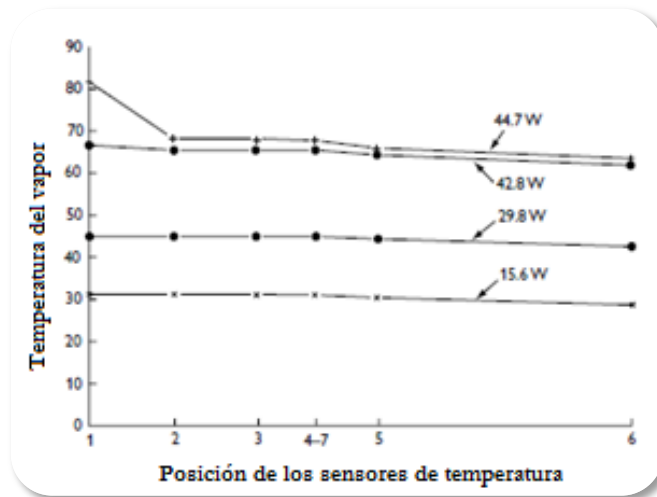
- Calentador para la sección del evaporador
- Medidor de potencia para establecer el calor suministrado al evaporador
- Control para la capacidad del calentador
- Condensador para la extracción de calor en la sección condensadora
- Medidor de caudal
- Termocuplas para establecer la temperatura a lo largo del tubo de calor
- Aislamiento térmico
- Sistema para la variación de la orientación del tubo de calor

Con el tubo de calor ubicado en el aparejo descrito con anterioridad, se procede en una primera instancia a encender el calentador, con el objetivo de aumentar la temperatura en el tubo de calor, con la temperatura homogénea a lo largo del tubo se procede a continuación con el encendido de la sección condensadora, permitiendo el paso de fluido a lo largo del condensador. Finalmente, se mantiene

en funcionamiento hasta lograr un estado estable, en este punto se procede a la toma de datos.

En este caso un perfil de temperatura adecuado para un tubo de calor puede ser descrito como el representado en la figura 45.

Figura 45: Perfil de temperatura en un tubo de calor bajo prueba.



Fuente: Heat Pipes: Theory, Design and applications [1].

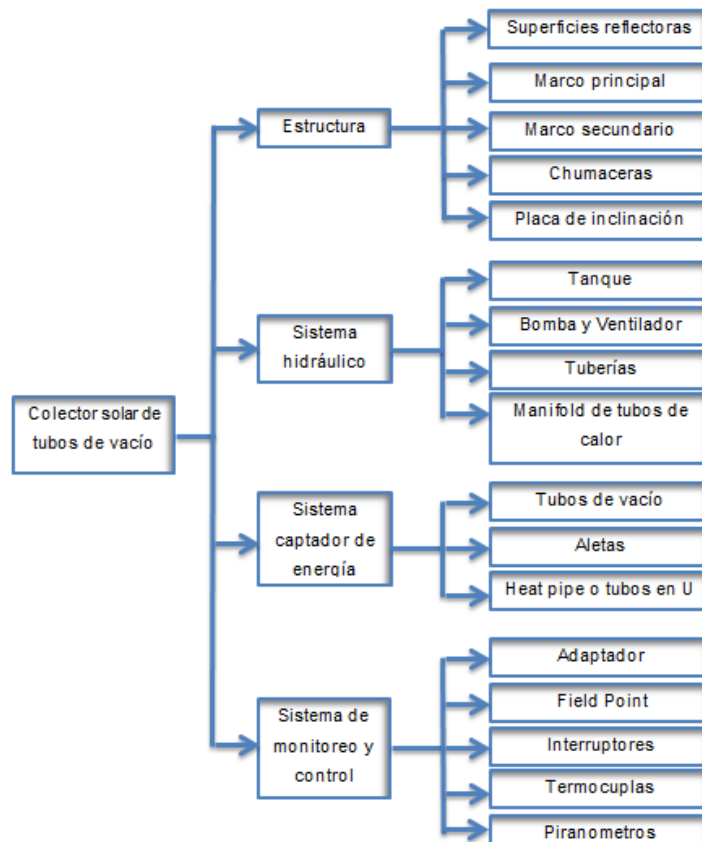
Un funcionamiento adecuado del tubo de calor se presenta cuando la temperatura a lo largo del sistema permanece casi constante. De forma contraria, si en la sección del condensador o el evaporador se presenta un aumento o disminución considerable de la temperatura, se puede presumir un funcionamiento inadecuado, en donde el secado y quemado de la sección evaporadora puede ser la principal causa de falla.

5 DESARROLLO DEL MODELO EXPERIMENTAL DE UN COLECTOR SOLAR DE TUBOS AL VACÍO

5.1 DESCRIPCIÓN DEL COLECTOR SOLAR DE TUBOS DE VACÍO

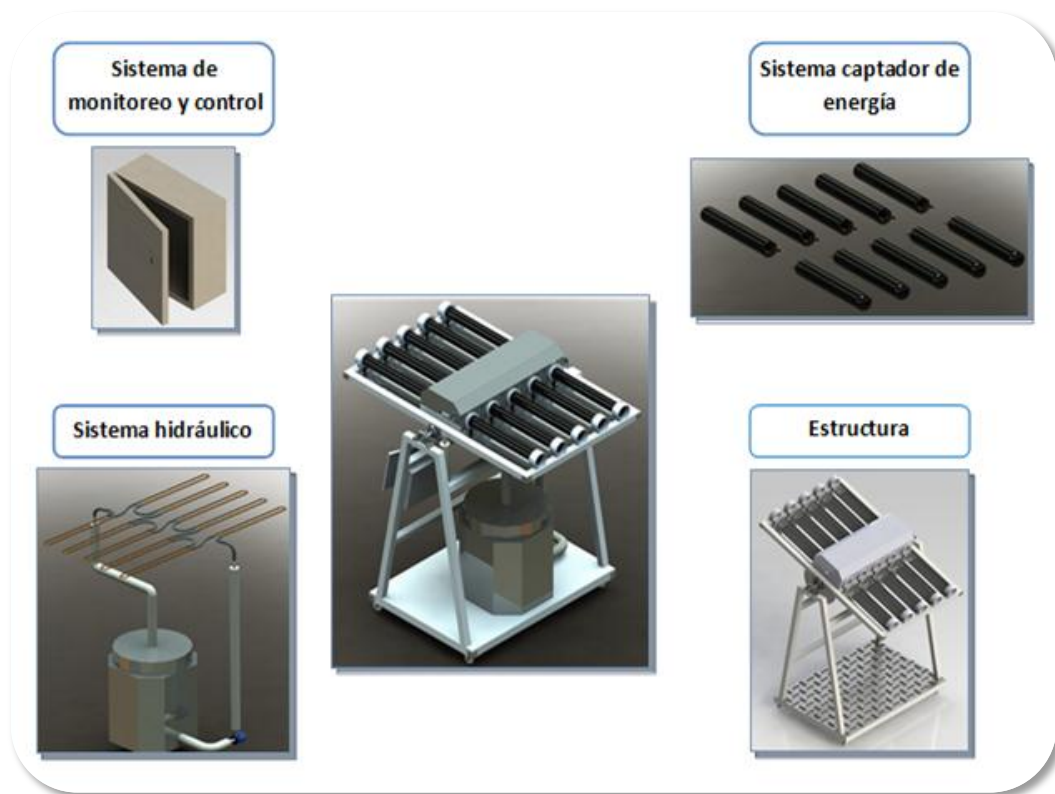
El modelo de colector solar de tubos al vacío diseñado y construido se encuentra compuesto por varios subsistemas que presentan una aplicación específica, a su vez cada subsistema se encuentra constituido por diversos elementos. A continuación, se presenta un diagrama de los subsistemas y elementos que conforman el colector solar de tubos al vacío (Ver Figura 46).

Figura 46: Sub-sistemas y elementos del colector solar de tubos al vacío.



Fuente: Autores.

Figura 47: Sub-sistemas del colector solar de tubos al vacío.



Fuente: Autores.

5.1.1 Estructura: Diseñada de forma ligera, su función es soportar los componentes principales del colector solar. Además, permite la inclinación del subsistema captador de energía. Se compone de un marco principal con ruedas que permiten su transporte de forma versátil, además de un marco secundario pivotado y unido mediante chumaceras al marco primario, con una guía para posicionar el marco secundario.

5.1.1.1 Marco principal: Está diseñado en aluminio (Tubería cuadrada de 1.5") con uniones remachadas, cuenta con 4 llantas y una lámina de aluminio corrugado en la parte inferior. Sus dimensiones son 1,2 m de alto, 1 m de profundo y 0,72 m de ancho. Su función principal es la de soportar el tanque, la Bomba y ventilador, el sistema de control y monitoreo y el marco secundario.

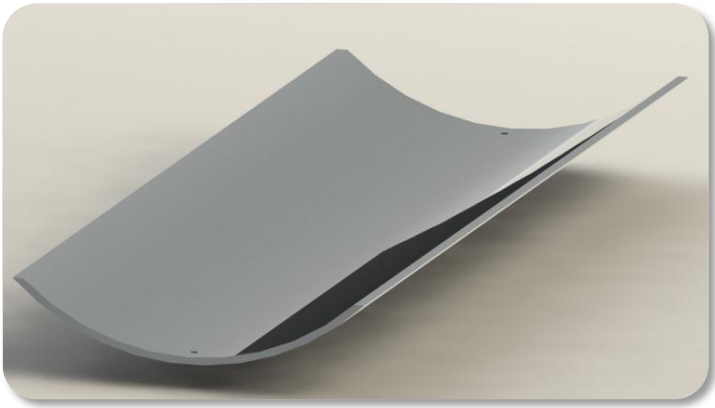
5.1.1.2 Marco secundario: Diseñado en aluminio (Tubería cuadrada de 1.5") con uniones remachadas. Sus dimensiones son 4 cm de altura, 0,8 m de profundo y 1,28 m de ancho. Soporta el sistema de captación de energía además de permitir inclinar el sistema en función del ángulo de declinación (Ver sección 1.2).

5.1.1.3 Chumaceras: Se cuenta con dos chumaceras de puente y dos de parche que dan un grado de libertad al marco secundario con el objetivo de lograr la inclinación del sistema de captación en función del ángulo de declinación. Las chumaceras de puente se apoyan en el marco principal, mientras que las de parche están posicionadas en el marco secundario.

5.1.1.4 Placa de inclinación: Una placa que permite inclinar y fijar el marco secundario con un rango de 7.5° entre cada posición, permite inclinar el sistemas desde -37.5° hasta 37.5° .

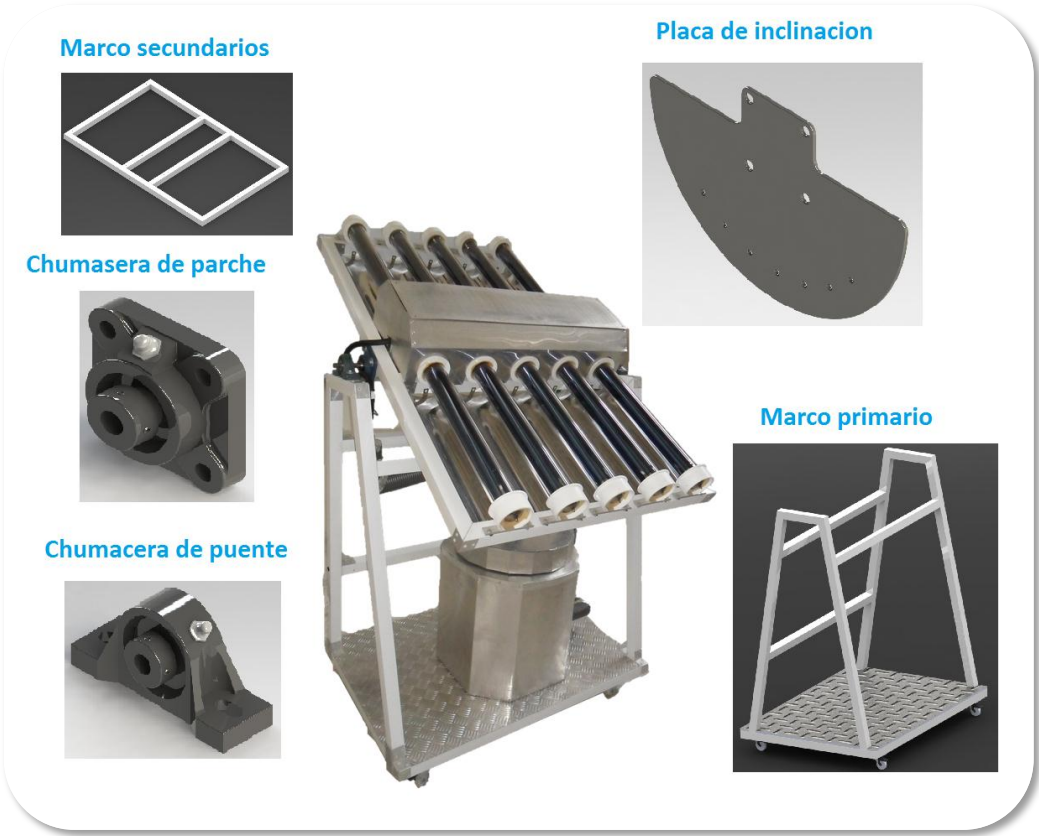
5.1.1.5 Superficies reflectoras: Construidas en acero inoxidable calibre 26 pulido al espejo con un radio de curvatura de 10 cm y una longitud de 45 cm, reflejan la radiación y la concentran hacia los tubos de vacío.

Figura 48: Superficies reflectoras.



Fuente: Autores.

Figura 49: Elementos del subsistema estructural.



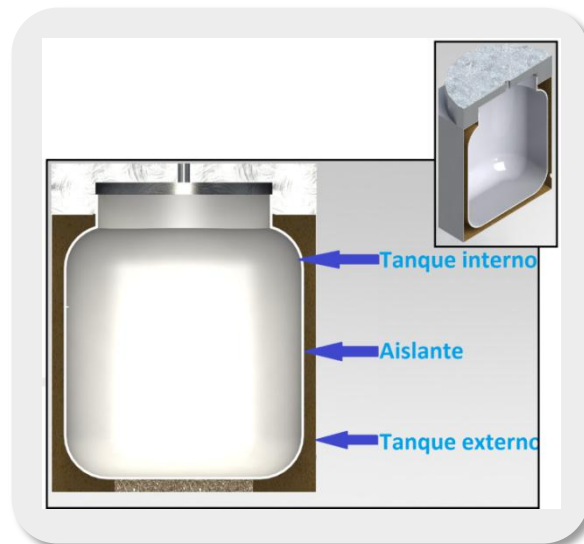
Fuente: Autores.

5.1.2 Sistema hidráulico: Mediante una bomba induce el movimiento del fluido contenido en el tanque a través de las tuberías y la superficie captadora para posteriormente retornarlo al tanque donde se almacena la energía.

5.1.2.1 Tanque: Su función principal es la de almacenar el fluido de trabajo, está diseñado de forma especial de modo que las pérdidas de calor sean mínimas. Se compone de tres partes elementales:

- **Tanque interno:** Con una capacidad de 60 litros, está compuesto de polietileno de alta densidad. Que cuenta con buenas propiedades para su aplicación, dentro de los cuales se destacan:
 - Excelente resistencia térmica y química.
 - Es ligero y su densidad es igual a 0.952 g/cm³.
 - No es atacado por los ácidos, resistente al agua a 100°C y a la mayoría de los disolventes ordinarios.
- **Aislante:** Compuesto de espuma de poliuretano y fibra de vidrio (K=0.03).
- **Tanque externo:** Compuesto por una lámina de aluminio calibre 30 y uniones remachadas. Su función principal es la de dar forma al tanque y contener el aislante y el tanque interno.

Figura 50: Tanque del colector solar de tubos al vacío.



Fuente: Autores.

5.1.2.2 Bomba y ventilador: La bomba roto dinámica tiene la función de inducir el movimiento del fluido a lo largo del sistema hidráulico, pasando por el sistema de captación. Un ventilador se encarga de refrigerar el inducido de la bomba con el objetivo de mantener baja la temperatura del mismo.

Tabla 10: Características de operación de la bomba roto dinámica.

Parámetro	Valor
Potencia	45 Watts
Voltaje~	110~v
Caudal	35 L/m
Altura máxima	3 m

Fuente: Autores.

5.1.2.3 Tuberías: El sistema hidráulico cuenta con dos materiales por los cuales se hace circular el fluido contenido en el tanque e impulsado por la bomba, el primero es una tubería de CPVC encargada de transportar el fluido de la salida de la bomba y el ingreso a tanque (Ver tabla 11), esto con el objetivo de dar rigidez a estos tramos de conexión hidráulica. Por otro lado, también se presentan conexiones hidráulicas usando mangueras Parker en los lugares en los que se requiere flexibilidad (Ver tabla 12).

- **Tubería rígida de CPVC:** El sistema cuenta con tubería de CPVC de diámetro nominal ½”.

Tabla 11: Características de la tubería de cpvc ½”.

Tubería de CPVC- diámetro nominal 0.5 in- Schedule 40	
Parámetro	Valor
Diámetro interior	0.84 in
Diámetro exterior	0.622 in
Espesor de pared	0.109 in

Fuente: Autores.

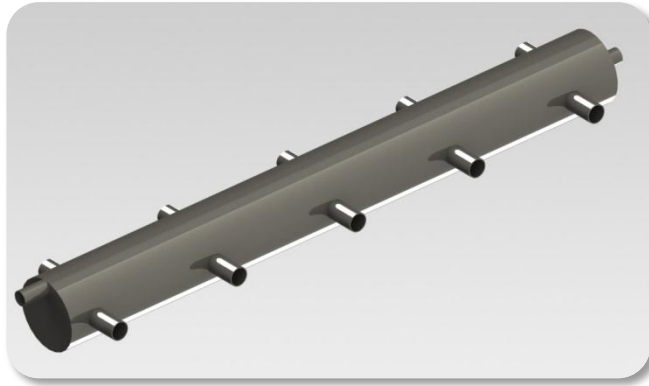
- **Manguera Parker:** La manguera Parker usada en el sistema se implementa para permitir la inclinación del marco secundario e interconectar los tubos conductores de fluido (Ver Figura. 76).

Tabla 12: Características de manguera parker ½”.

Referencia Parker 7093-31200	
Diámetro interno	5/16 in
Diámetro externo	0,594 in
Presión trabajo	200 psi
Min. Radio curvatura	3,3 in
Peso	0,13 lbs/ft

5.1.2.4 Manifold para tubos de calor: El sistema utilizando tubos de calor cuenta con un Manifold por donde se hace circular el fluido que almacena el calor, allí los tubos de calor hacen contacto con el fluido transfiriendo su calor.

Figura 51: Manifold para implementación con tubos de calor.



Fuente: Autores.

5.1.3 Sistema captador de energía: Comprende por los elementos que se encargan de recibir el espectro de radiación electromagnética para después transformar esta energía en calor y transferírsela al fluido calo-portador. Este sistema se encuentra compuesto por:

- Tubos de vacío de cubierta doble (Owen Illinois).
- Aletas.
- Tubos de calor o tubos en U.

5.1.3.1 Tubos de vacío: El sistema cuenta con 10 tubos de vacío tipo Owen Illinois con una superficie selectiva (AL-N/AL).

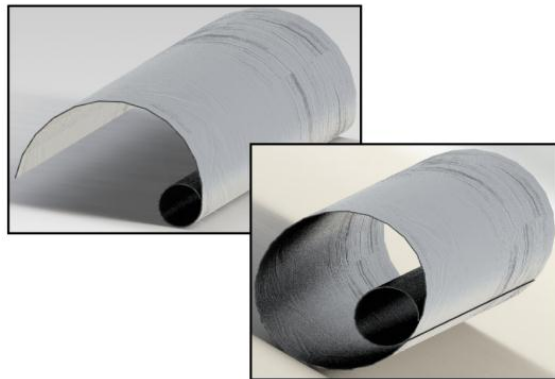
Tabla 13: Características de tubos de vacío implementados para el colector solar.

Tubos de vacío tipo Owen Illinois	
Longitud	500 mm
Diámetro externo	58 mm
Diámetro interno	43 mm
Espesor del vidrio	1,2 mm
Expansión térmica	3.3×10^{-6} mm/°C
Material	Vidrio de boro silicato 3.3
Superficie selectiva	Grado Al-N/Al
Absortividad	92%
Emisividad	10%
Vacío	5×10^{-3} Pa
Perdida de calor	<0.8W/ (m ² °C)
Resistencia Max	0.8MPa
Transmitancia del vidrio	92%

Fuente: Autores.

5.1.3.2 Aleta: Diseñada de manera que el arco de mayor radio entre en contacto con la superficie interna del tubo de vacío, permiten el flujo de calor hacia el arco menor que se encuentra en contacto ya sea con los tubos de calor o con los ductos en forma de U. Manufacturadas en aluminio calibre 30 debido a su conductividad térmica.

Figura 52: Aletas para tubos evacuados

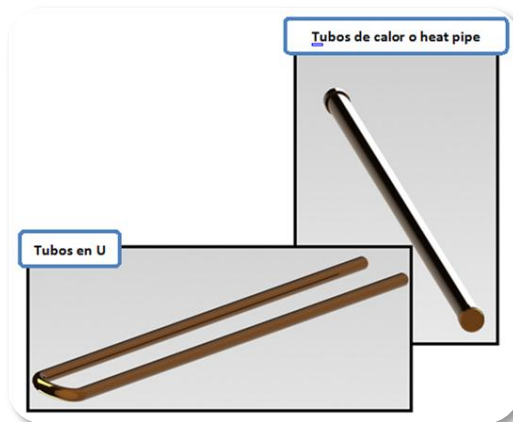


Fuente: Autores.

5.1.3.3 Tubos de calor o tubos en U: Se utilizan para extraer el calor desde los tubos de vacío hacia el fluido calo portador los métodos implementados son.

- Tubos en U: diseñados con tubería de cobre de $\frac{1}{4}$ " tipo L de 110 cm de largo (Ver sección 5.4).
- Tubos de calor: diseñados en tubería de cobre de $\frac{1}{2}$ " tipo L y de 60 cm de largo, cuentan con una mecha de fibra de vidrio y 8 cm^3 de agua como fluido de trabajo (Ver sección 5.2).

Figura 53: Tubos de calor y tubos en U.



Fuente: Autores.

Con el objetivo de evaluar el comportamiento del sistema usando tubos de calor o tubos en U, se desarrolló un primer montaje con los tubos en U (Ver sección 5.4) y se llevaron a cabo pruebas de desempeño. Seguidamente, se hizo el desmontaje de los tubos en U y se desarrolló el montaje de los tubos de calor (Ver sección 5.3), de esta forma al igual que en el caso anterior se implementaron pruebas de desempeño.

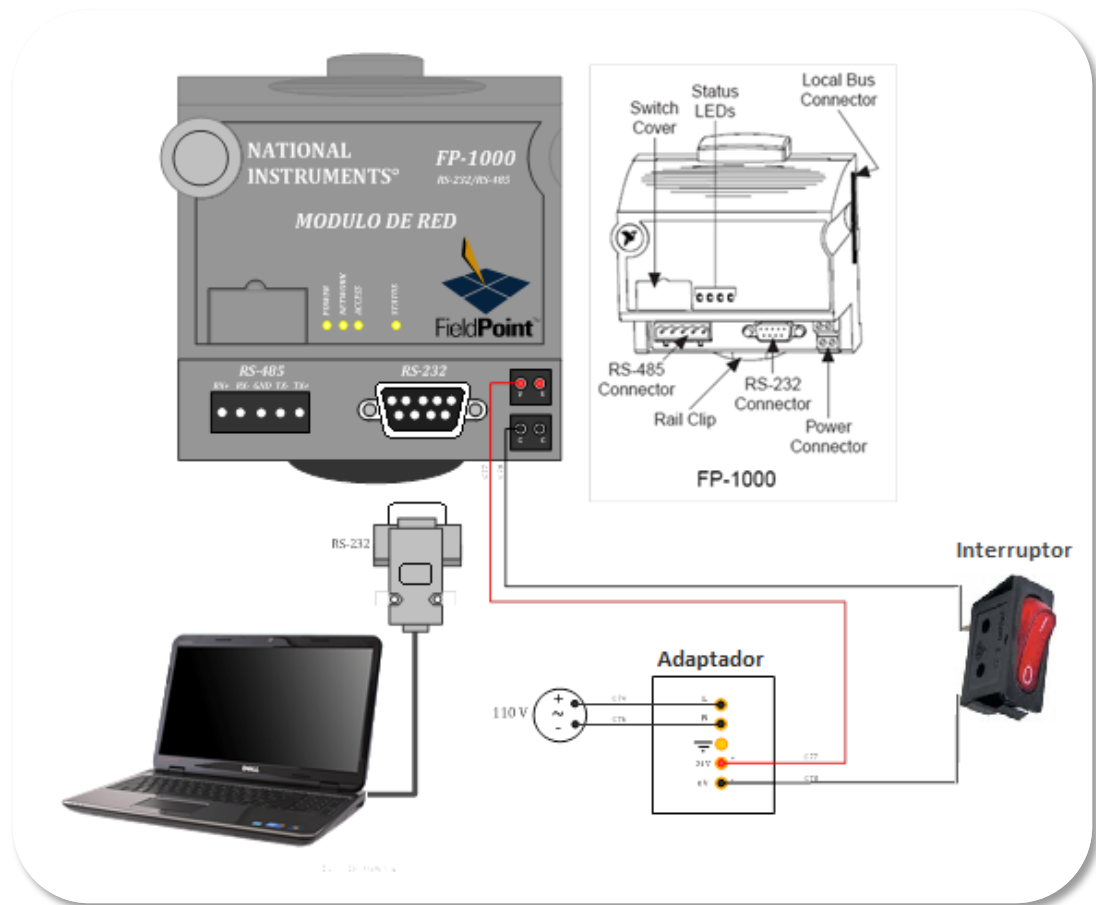
5.1.4 Sistema de monitoreo y control: Este sistema se encuentra encargado del almacenamiento de los datos registrados por los elementos de medición (Termocuplas y Piranómetros), además de permitir el encendido y apagado de la bomba y el Field Point.

5.1.4.1 Adaptador: Este dispositivo es alimentado por una fuente de corriente alterna de 110 V y entrega una salida 12 V de corriente continua el cual alimenta los módulos de Field point.

5.1.4.2 Field point: El módulo de adquisición de datos Field Point se encuentra integrado por un elemento de comunicación con el computador (FP-1000) y un módulo para el registro de temperatura a través de Termocuplas (FP-TC-120).

➤ **Modulo FP-1000:** El modulo FP-1000 es el encargado de alimentar el Modulo FP-TC-120 y adquirir los datos de este, para posteriormente transmitirlos al computador por medio del puerto RS-232.

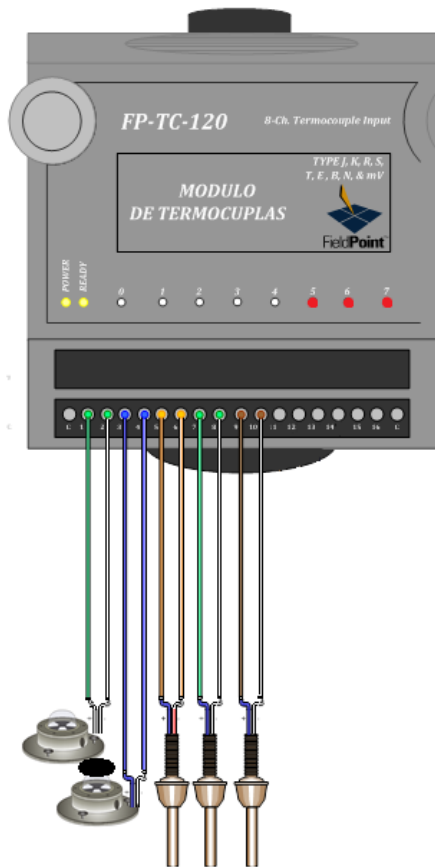
Figura 54: Modulo de Field Point FP-1000.



Fuente: Autores.

- **Modulo FP-TC-120:** En el módulo FP-TC-120 se encuentran conectadas tres termocuplas y dos piranómetros, este componente se encarga de captar estas señales y transmitir las al módulo FP-1000 quien es el encargado de hacer la comunicación con el computador.

Figura 55: Modulo de Field point FP-TC-120



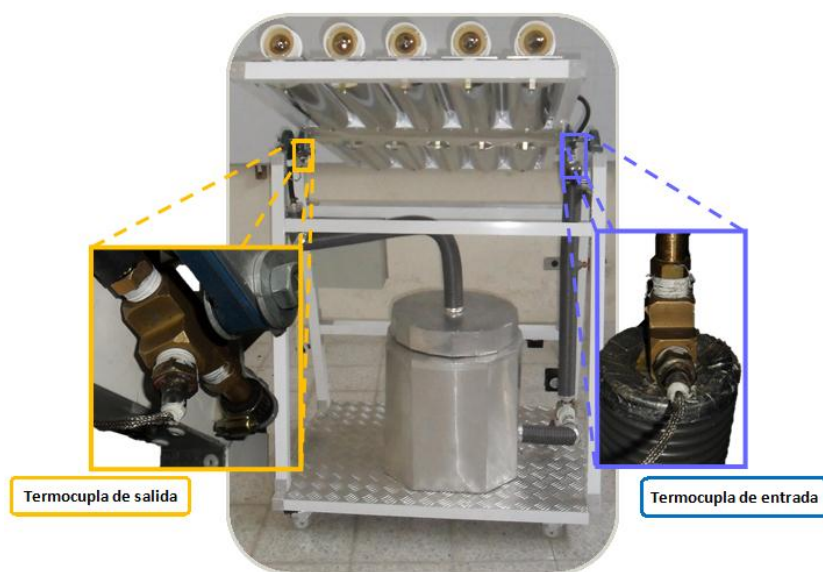
Canal	Número de terminal		
	IN (+)	IN (-)	
0	1	2	P1
1	3	4	P2
2	5	6	T1
3	7	8	T2
4	9	10	T3
5	11	12	--
6	13	14	--
7	15	16	---

P1: Piranometro radiación total
P2: Piranometro radiación difusa
T1: Temperatura entrada colector
T2: Temperatura salida colector
T3: Temperatura ambiente

Fuente: Autores.

5.1.4.3 Termocuplas: El colector cuenta con tres termocuplas tipo K que permiten leer la temperatura del agua a la entrada, la temperatura a la salida del colector y la temperatura ambiente.

Figura 56: Ubicación de las termocuplas en el colector solar.



Fuente: Autores.

5.1.4.4 Piranómetros: Para la medición de la radiación total y la radiación difusa se instalaron dos Piranómetros con constantes de $856 \frac{\text{Watt}}{\text{m}^2 \cdot \text{mV}}$ y $815 \frac{\text{Watt}}{\text{m}^2 \cdot \text{mV}}$ respectivamente. Para determinar la radiación difusa se instaló un mecanismo que permite eliminar la radiación directa sobre el piranometro que registra dicha variable.

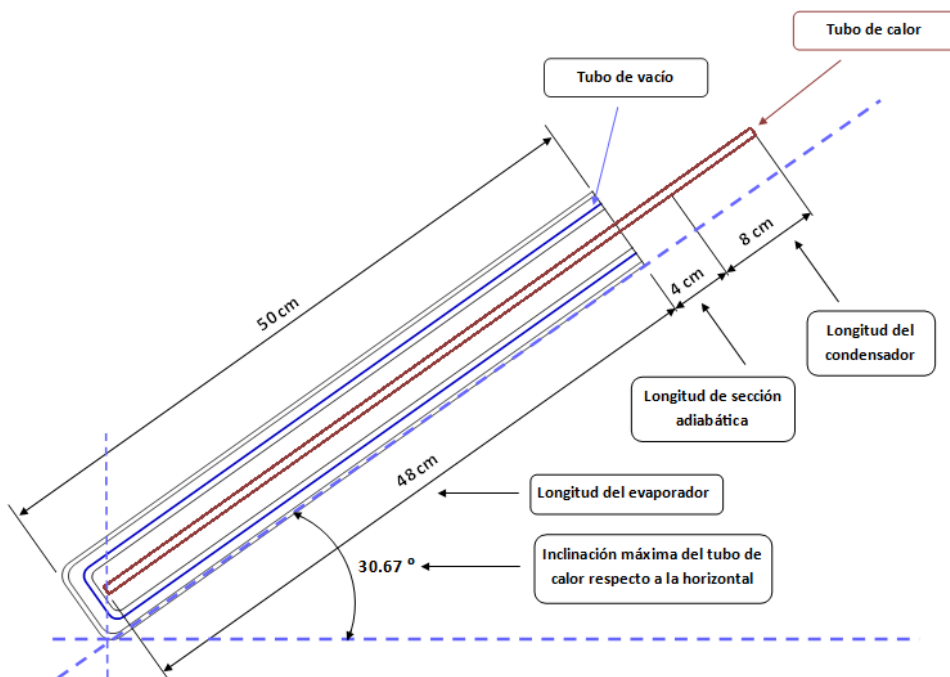
5.2 DESCRIPCIÓN DEL DISEÑO DE TUBOS CALOR

Considerando la implementación de tubos de calor en el sistema de captación solar es importante desarrollar de forma adecuada el proceso de diseño, considerando las condiciones de operación deseadas para la implementación en el colector solar de tubos al vacío.

5.2.1 Determinación de los parámetros de diseño: Como fue descrito con anterioridad los tubos de vacío implementados presentan una longitud de 0.5m lo cual representa la longitud establecida para la sección evaporativa de los tubos de calor. Seguidamente, debido a la configuración o geometría establecida en la estructura de soporte de los tubos de vacío se establece una sección adiabática correspondiente a 4 cm, y por último una sección de condensación equivalente a 8 cm.

Es importante destacar que el colector solar se encuentra dispuesto de tal forma que sea posible seguir la inclinación de los rayos solares respecto al ángulo de declinación, de esta forma teniendo en cuenta que la declinación máxima posible se representa por un ángulo de -23.45° y considerando la latitud presente de Bucaramanga de 7.12° la inclinación máxima en los tubos de vacío será de 30.67° , lo cual representa la capacidad máxima requerida para el limite capilar en los tubos de calor.

Figura 57: Dimensiones requeridas del tubo de calor.



Fuente: Autores.

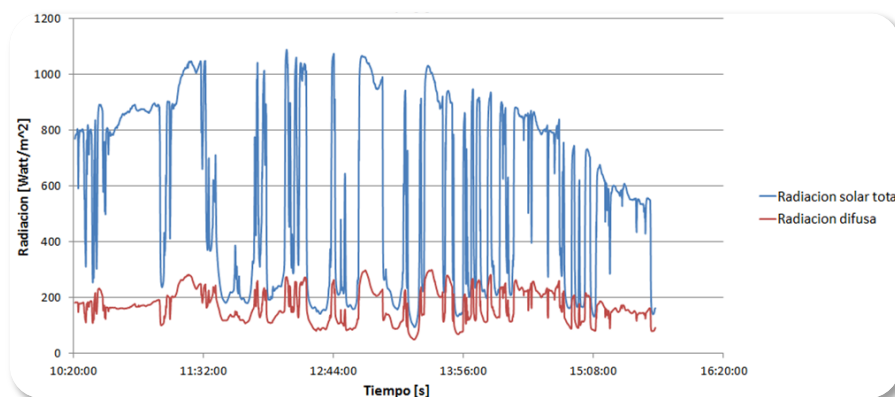
Tabla 14: Características de operación de los tubos de calor

Variable	Parámetro	Valor
Longitud de la sección del evaporador	Le	0,48 m
Longitud de la sección adiabática	La	0,04 m
Longitud de la sección del condensador	Lc	0,08 m
Longitud efectiva del tubo de calor	Leff	0,285 m
Angulo de inclinación máxima	θ	30°

Fuente: Autores.

Finalmente, es importante considerar que cada tubo de calor implementado debe tener la capacidad para transportar el calor máximo captado por los tubos de vacío en el rango de temperaturas de operación de los mismos (40° a 140° C). Basados en mediciones previas de la radiación total presente en Bucaramanga se puede establecer como límite máximo una irradiancia de $725 \frac{Watt}{m^2}$, de esta forma considerando el área dispuesta para cada tubo de vacío se puede establecer como calor máximo un valor de $Q_{max} = 47.2 Watt$.

Figura 58: Radiación total y radiación difusa. (Laboratorio de sistemas térmicos UIS)



Fuente: Autores.

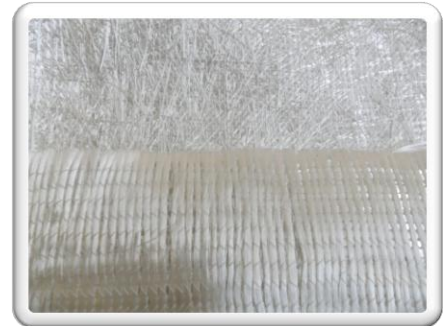
5.2.2 Selección de los materiales: Con el objetivo de obtener un funcionamiento adecuado de los tubos de calor que deben ser manufacturados para su implementación en el colector solar de tubos al vacío, se debe presentar especial cuidado en la selección adecuada de los tres elementos principales que componen estos sistemas de transporte de calor. A continuación se describirá de forma detallada el proceso de selección implementado.

5.2.2.1 Selección del fluido de trabajo: Teniendo en cuenta que las temperaturas obtenidas y registradas en el interior de los tubos de vacío varían entre los 40 y 120 °C es importante la selección de un fluido de trabajo que permite operar bajo estas condiciones. Es de destacar que el primer indicativo para la selección del fluido de trabajo es el rango de operación permisible, de esta forma los fluidos que permiten esta operación pueden ser Heptano, Agua o Tolueno (Ver Tabla 7). Seguidamente, es importante evaluar el número de Merit, para el cual el fluido con mejores propiedades es el agua superando considerablemente las propiedades presentes en los otros dos fluidos.

5.2.2.2 Selección de la mecha o estructura capilar: Considerando la facilidad en cuanto a manufactura se decide implementar una estructura capilar homogénea teniendo en cuenta las características presentes en la Tabla 8 para diversas estructuras capilares en base a agua. Se decide implementar fibra de vidrio como estructura capilar, con la cual se logra superar el límite de operación más crítico relacionado con la capacidad capilar que puede ser desarrollada por la mecha.

Tabla 15: Características de fibra de vidrio usada como estructura capilar.

Propiedades de fibra de vidrio	
Tipo de fibra	Tipo E
Permeabilidad	0,061*10 ⁻¹⁰ m ²
Radio efectivo entre fibras	0,000008 m
Porosidad	73%

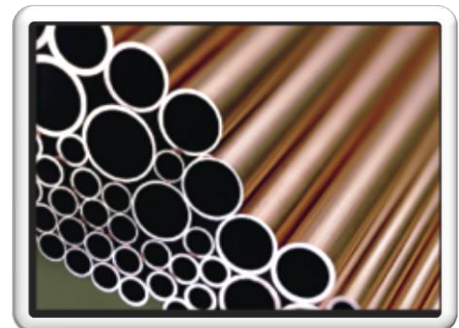


Fuente: Autores.

5.2.2.3 Selección del material del contenedor: Para este caso considerando la implementación de agua como fluido de trabajo la mejor de las opciones es la implementación de un contenedor de cobre (Ver tabla 9). El cobre como contenedor permite obtener una conductividad superior, además es de fácil adquisición y por lo tanto cualquier tipo de acople, soldadura o unión pueden ser adquiridas en el mercado local.

Tabla 16: Tubería rígida de cobre tipo I.

Tubería rígida de cobre tipo L- Diámetro nominal 1/2"	
Medida nominal	1/2" - 12,7mm
Diámetro exterior	0,625" - 15,875mm
Grueso de pared	0,040" - 1,016mm
Peso por metro	0,424 Kg/m
Presión máxima permisible	5760 PSI



Fuente: Autores.

5.2.3 Evaluación de los límites de desempeño: Con el objetivo de determinar la capacidad presente en los tubos de calor diseñados es importante evaluar los límites de operación y verificar si las condiciones dispuestas permiten alcanzar los parámetros de diseño. A continuación se determinará cada uno de los límites de operación presentes en un tubo de calor evaluando su variación en función de la temperatura de operación.

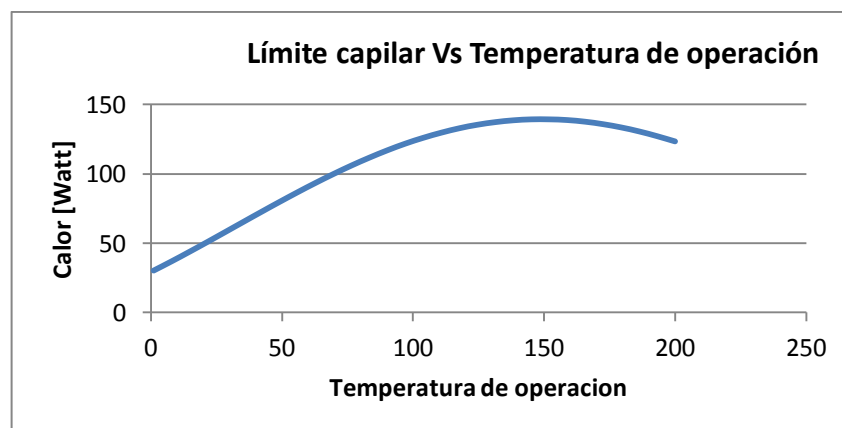
5.2.3.1 Límite capilar: Para evaluar el límite presente con la estructura capilar se debe tener en cuenta que:

$$\Delta P_c \geq \Delta P_L + \Delta P_V + \Delta P_g [1]$$

Sin embargo es posible obtener el calor máximo permisible desarrollando la igualdad de la ecuación. Para determinar el efecto del límite capilar es importante desarrollar un análisis del calor máximo permisible en el rango de temperatura de operación.

Es apropiado desarrollar un análisis del máximo calor permisible en función de la temperatura lo cual permitiría considerar la capacidad del sistema para operar en el colector solar de tubos al vacío.

Figura 59: Límite capilar Vs temperatura de operación para el tubo de calor diseñado.



Fuente: Autores.

5.2.3.2 Límite viscoso: El límite viscoso puede ser un factor de gran influencia en el comportamiento del tubo de calor, de esta forma es posible su evaluación mediante la evaluación de:

$$Q_v = \frac{\pi * r_v^4 * L * \rho_v * P_v}{12 * \mu_v * L_{eff}}$$

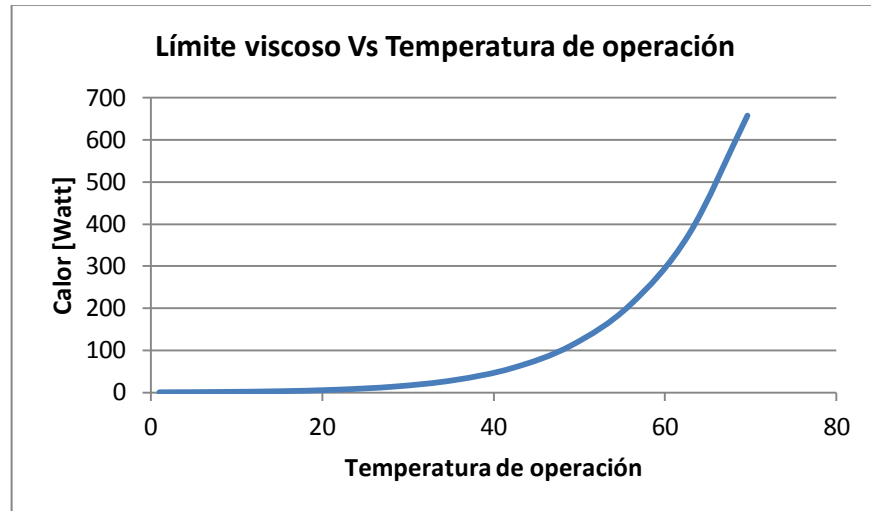
Tabla 17: Datos para determinar el límite viscoso a 100°C.

Variable	Parámetro	Valor
Radio efectivo de paso de vapor	rv	0,0049 m
Calor latente de vaporización	L	2246 kJ/Kg
Densidad del vapor	ρ_v	0,6802 Kg/m ³
Presión de vapor	Pv	116,4 kPa
Viscosidad de vapor	μ_v	0,000124 kg/m-s
Longitud efectiva del tubo de calor	L _{eff}	0,285 m

Fuente: Autores.

Considerando la variación de la temperatura de operación el límite viscoso afecta considerablemente la capacidad de transferencia de calor del sistema.

Figura 60: Límite viscoso Vs temperatura de operación para el tubo de calor diseñado.



Fuente: Autores.

5.2.3.3 Límite sónico: El límite sónico descrito como la capacidad el vapor de alcanzar valores de velocidad del sonido se puede determinar a partir de:

$$Q_s = \frac{\rho_v * A * C_0 * L}{\sqrt{(2 * (\gamma + 1))}}$$

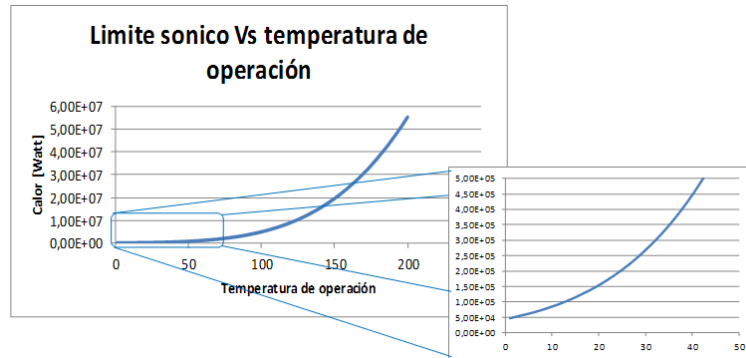
Tabla 18: Datos para determinar el límite sónico a 100°C.

Variable	Parámetro	Valor
Velocidad del sonido de referencia	Co	331,5 m/s
factor de compresibilidad	λ	1,4
Densidad del vapor	ρ_v	0,6802 Kg/m ³
Calor latente de vaporización	L	2246 kJ/Kg
Área de transferencia de calor en el evaporador	A	0,02244 m ²

Fuente: Autores.

La variación de la temperatura de operación del tubo de calor el límite sónico no representa un factor significativo en la operación del mismo.

Figura 61: Límite sónico Vs temperatura de operación para el tubo de calor diseñado.



Fuente: Autores.

5.2.3.4 Límite evaporativo: Dentro de los límites de operación más importantes encontramos el límite evaporativo, definido como:

$$Q_b = \frac{4 * \pi * L_{eff} * T_v * \sigma_v}{L * \rho_v * \ln \frac{r_i}{r_e}} * \left(\frac{1}{r_n} - \frac{1}{r_c} \right)$$

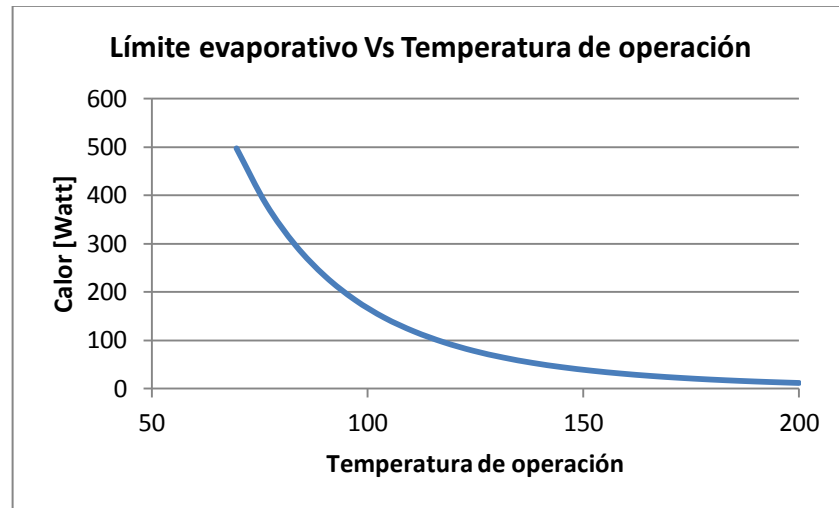
Tabla 19: Datos para determinar el límite evaporativo a 100°C.

Variable	Parámetro	Valor
Longitud efectiva del tubo de calor	Leff	0,285 m
Temperatura de operación	Tv	373 K
Tensión superficial	σ	0,05815 N/m
Calor latente de vaporización	L	2246 kJ/Kg
Densidad del vapor	ρv	0,6802 Kg/m ³
Radio interno del contenedor	ri	0,006922 m
Radio externo del contenedor	re	0,007938 m
Radio interno de la estructura capilar	rn	0,0049 m
Radio efectivo entre fibras	rc	0,000008 m

Fuente: Autores.

Evaluando la variación del límite evaporativo en función de la temperatura de operación este factor afecta considerablemente la operación de los tubos de calor.

Figura 62: Límite evaporativo Vs temperatura de operación para el tubo de calor diseñado.



Fuente: Autores.

5.2.3.5 Límite de arrastre: Considerando la capacidad del vapor para arrancar partículas de líquido en la interfaz líquido vapor presente en la estructura capilar es necesario evaluar el calor máximo permisible bajo esta condición.

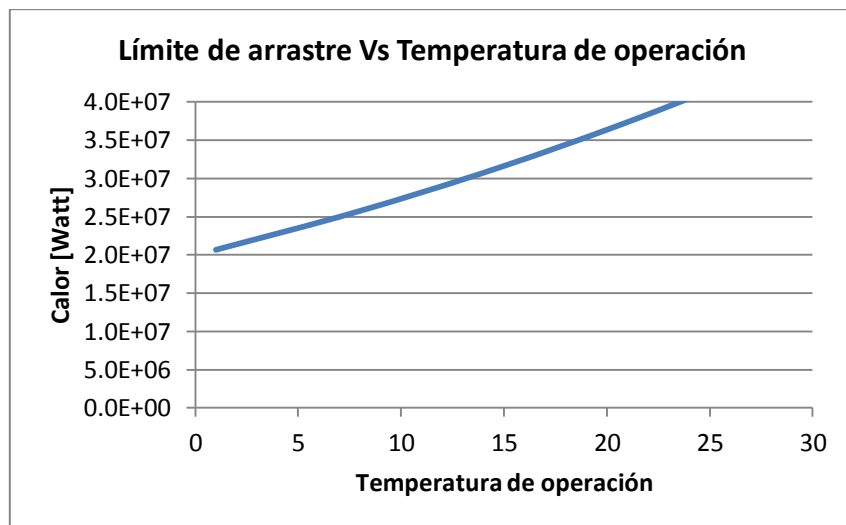
$$Q_a = \sqrt{\frac{2 * \pi * \rho_V * L^2 * \sigma_L}{z}} [1]$$

Tabla 20: Datos para determinar el límite de arrastre a 100°C.

Variable	Parámetro	Valor
Densidad del vapor	ρ_v	0,6802 Kg/m ³
Calor latente de vaporización	L	2246 kJ/Kg
Tensión superficial	σ	0,05815 N/m
Constante característica de la interfaz líquido vapor	z	0,036*10 ⁽⁻³⁾ m

Fuente: Autores.

Figura 63: Límite de arrastre Vs temperatura de operación para el tubo de calor diseñado.

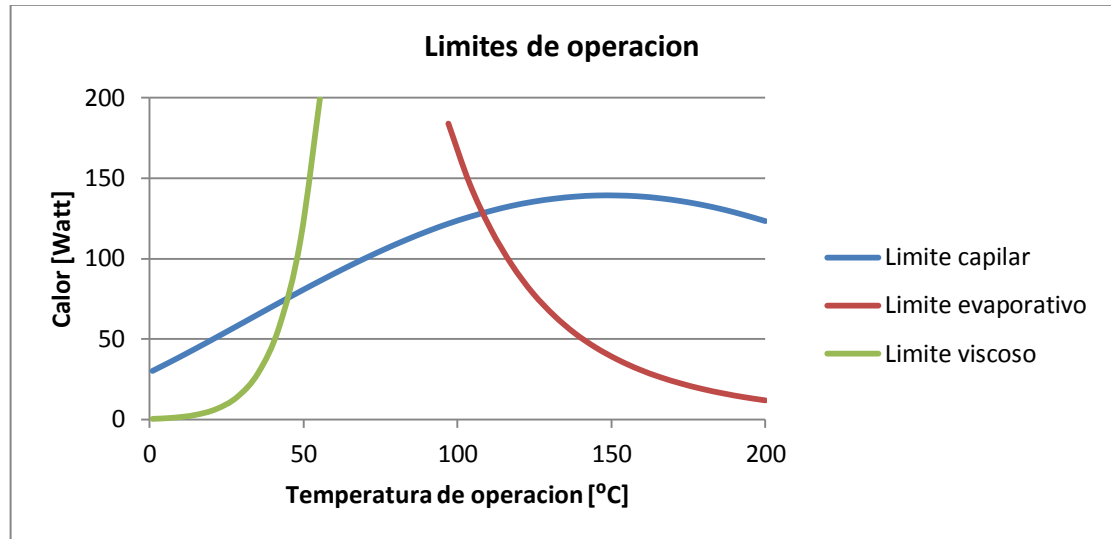


Fuente: Autores.

En este caso se puede observar que el límite de arrastre no representa un efecto considerable en la operación del tubo de calor.

Finalmente, considerando cada uno de los límites de operación, se puede concluir que las verdaderas limitaciones se presentan a causa del límite capilar, límite evaporativo y límite viscoso, de esta forma es adecuado establecer la influencia de todos los límites en la operación del tubo de calor.

Figura 64: Influencia de los límites de operación en el desempeño del tubo de calor.



Fuente: Autores.

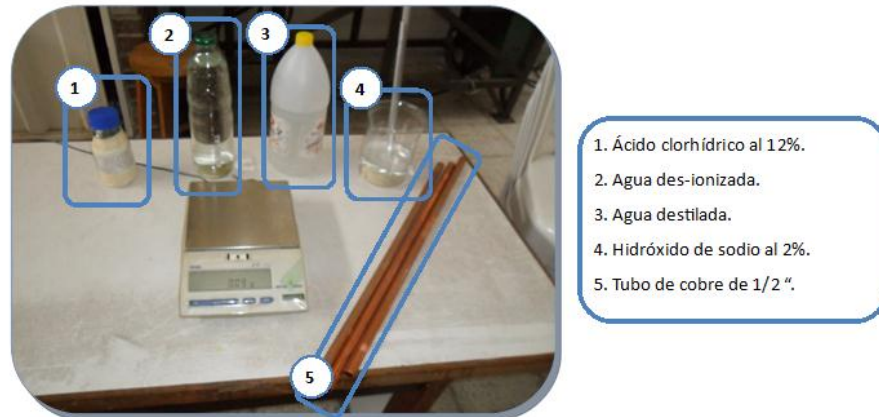
Como fue establecido en la determinación de los parámetros de operación del tubo de calor (Sección 5.2.1) es posible asegurar que el tubo de calor diseñado permite cumplir con el calor a transportar dentro del rango de temperatura de operación ($Q_{\text{max}}=47.2$ Watt en un rango de temperatura de 40 a 120 °C).

5.2.4 Manufactura de los tubos de calor: Conforme a lo descrito anteriormente en cuanto a los materiales del tubo de calor, se describe a continuación el proceso de manufactura desarrollado para la fabricación de los tubos de calor:

1. **Limpieza del contenedor:** Para garantizar un funcionamiento adecuado de los tubos de calor se desarrolló un proceso para la limpieza de los tubos de cobre, en primera instancia se procede a lavar con jabón agitando en el interior del tubo, seguidamente se procede a un lavado con abundante agua. A continuación, se desarrolla un proceso conocido como decapado, mediante la implementación de ácido clorhídrico al 12% e hidróxido de sodio al 2% con

permanencia de los fluidos durante 15 minutos y lavado con abundante agua una vez finalizado el proceso.

Figura 65: Limpieza del contenedor.



Fuente: Autores.

2. **Introducción de la mecha o estructura capilar:** el procedimiento de la introducción de la mecha se desarrolló mediante el enrollamiento de la fibra de vidrio sobre una varilla la cual sirve de guía para mantener una estructura tubular a lo largo del tubo de cobre. Posteriormente la varilla es retirada.

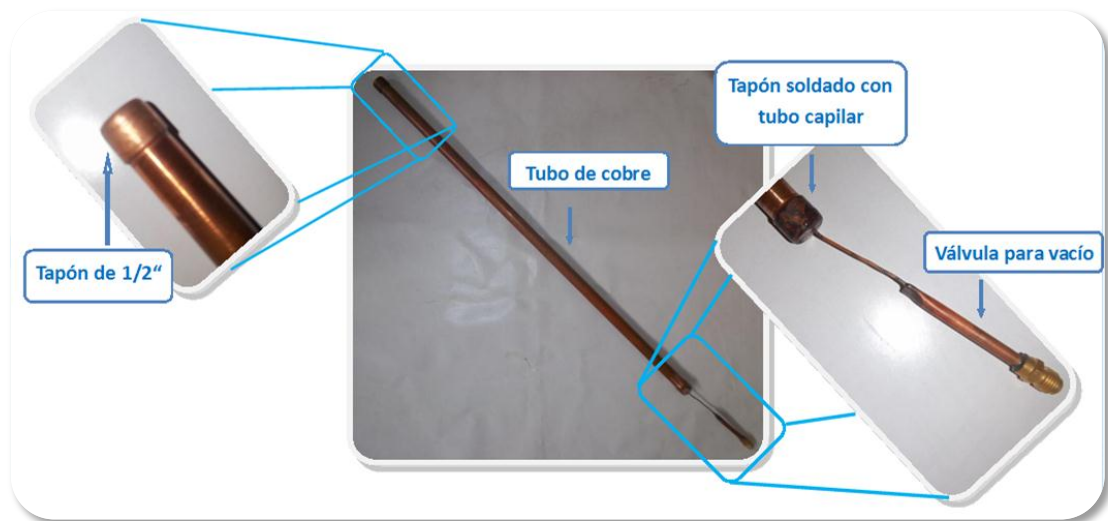
Figura 66: Introducción de la mecha o estructura capilar.



Fuente: Autores.

3. **Sellado y carga del fluido de trabajo:** con la mecha en el interior se procede a sellar los extremos del tubo de cobre. En uno de los extremos se suelda un tapón de 1/2", seguidamente se introduce en el tubo el fluido de trabajo y finalmente se sella el extremo faltante con un tapón al cual se le ha soldado una válvula para vacío con el objetivo de extraer el contenido de aire en el interior del tubo.

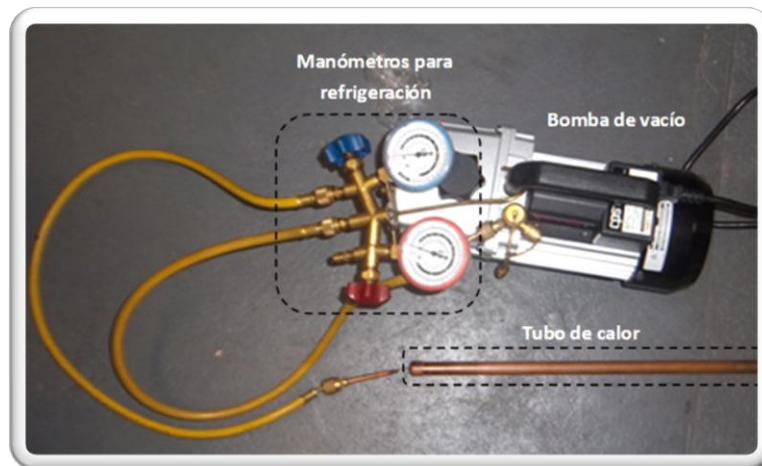
Figura 67: Sellado y carga del fluido de trabajo.



Fuente: Autores.

4. **Procedimiento de vacío:** Se procede a generar vacío en el interior del tubo de calor mediante la conexión del tubo de calor a una bomba de vacío por el extremo que presenta la válvula, encendida la bomba de vacío se espera hasta lograr un vacío equivalente a 3" de Hg, en cuyo caso se cierra una válvula auxiliar para verificar la estanqueidad. Si el vacío se mantiene se procede a sellar la válvula soldada al tapón de cobre.

Figura 68: Procedimiento de vacío.

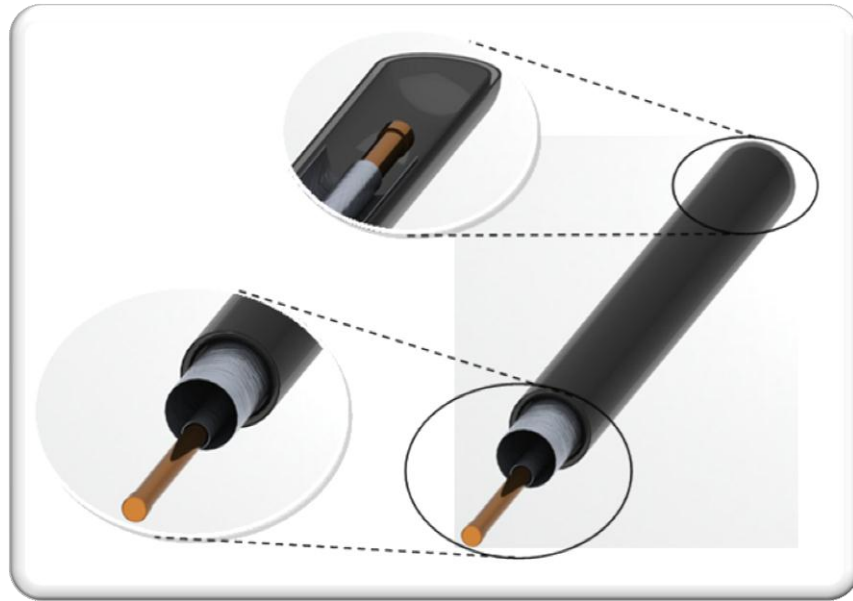


Fuente: Autores.

5.3 DESCRIPCIÓN DEL MONTAJE DE TUBOS DE VACÍO CON TUBOS DE CALOR

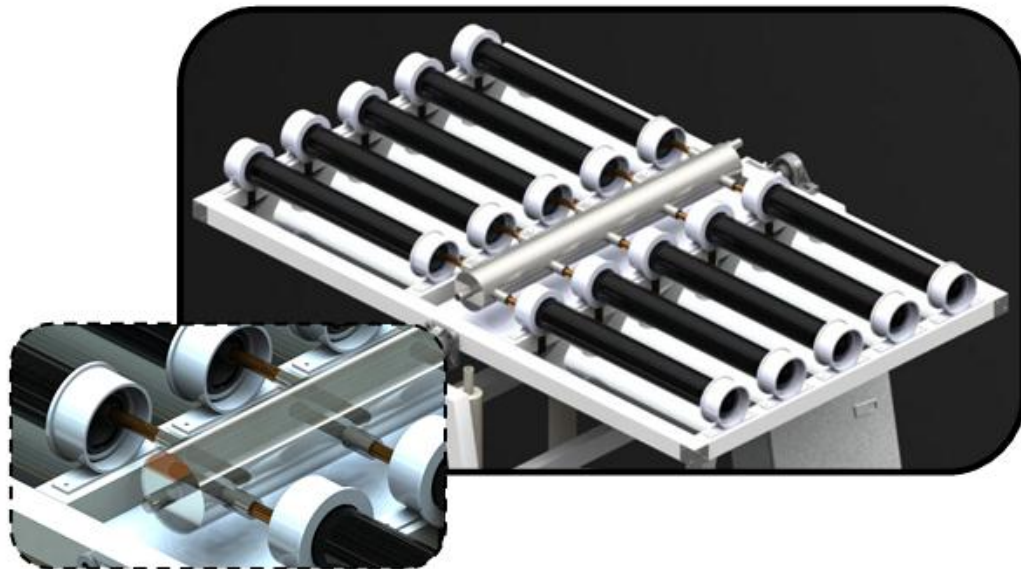
Con los tubos de calor diseñados (Sección 6.2) y teniendo en cuenta que cumplen con la aplicación esperada, se desarrolla el montaje de los mismos en el colector solar de tubos evacuados. Este proceso de montaje se implementa ubicando un tubo de calor en el interior de cada tubo de vacío incluyendo una aleta de aluminio encargada de la transferencia de calor desde la superficie interna del tubo de vidrio hacia el tubo de calor, seguidamente se ubica un tapón de plástico en el extremo abierto del tubo de vacío con el objetivo de disminuir las pérdidas de calor por convección. El ensamble descrito se acopla con la estructura, introduciendo el extremo libre del tubo de calor en el Manifold por donde circulara el fluido calor-transportador.

Figura 69: Montaje de tubos de calor en el interior de los tubos de vacío.



Fuente: Autores.

Figura 70: Ensamble de tubos de calor con el Manifold.

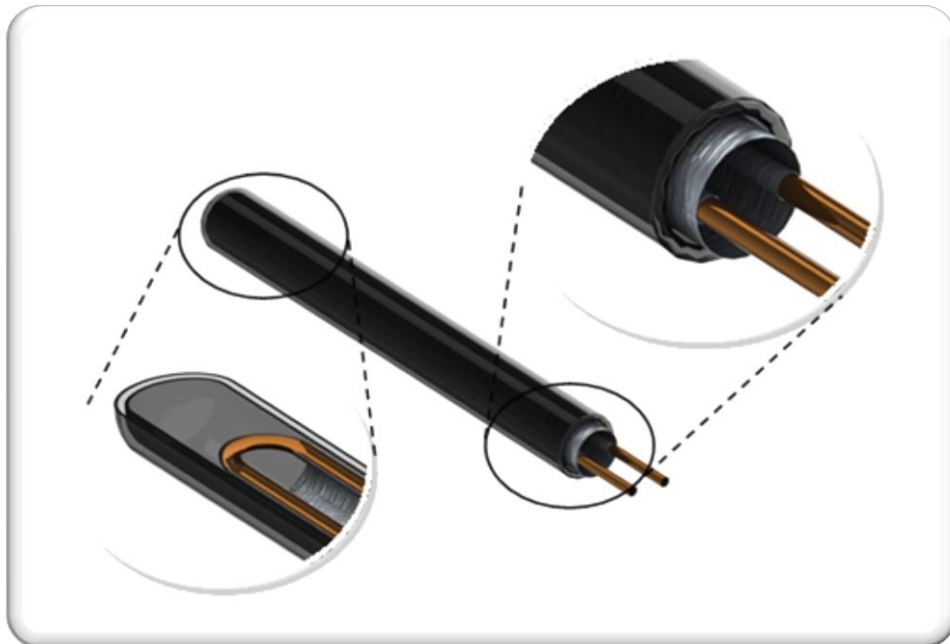


Fuente: Autores.

5.4 DESCRIPCIÓN DEL MONTAJE DE TUBOS DE VACÍO CON TUBOS CONDUCTORES DE FLUIDO

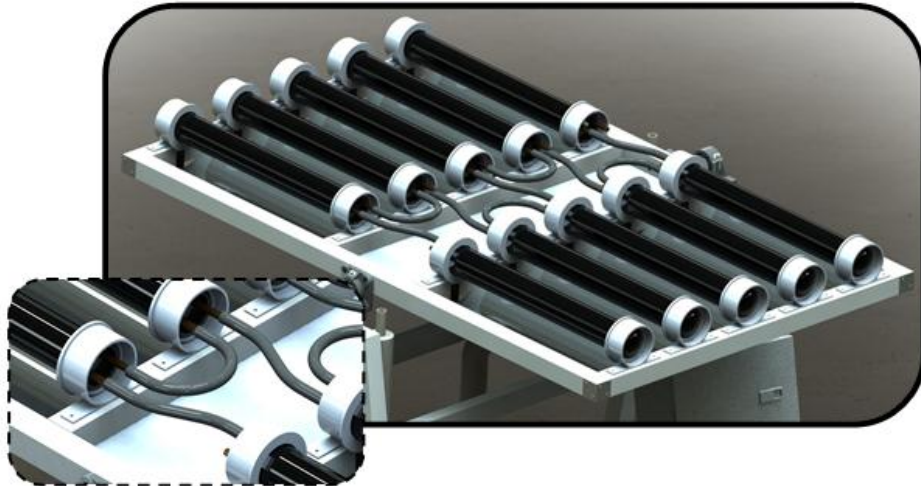
Para el colector solar implementando la tecnología de extracción de calor con tubos conductores de fluido, se desarrolló el montaje dentro de los tubos evacuados de los tubos de cobre en forma de U incluyendo dos aletas de aluminio que entran en contacto con la superficie interna del tubo de vacío y transfieren el calor hacia los tubos en U, un tapón de plástico sella la entrada de aire hacia el interior de los tubos de vacío para disminuir las pérdidas por convección. Una vez realizado el montaje de cada uno de los tubos en U con sus respectivas aletas y tapones se interconectan todos en serie mediante manguera Parker de modo que el flujo de fluido calo-portador en cada uno de ellos sea el mismo.

Figura 71: Montaje de tubos en U en el interior de los tubos de vacío.



Fuente: Autores.

Figura 72: Ensamble de tubos de colector solar de tubos de vacío con tubo conductor de fluido.



Fuente: Autores.

5.5 PROGRAMA PARA EL MONITOREO DEL COLECTOR SOLAR DE TUBOS AL VACÍO

Con el objetivo de desarrollar la toma de datos y su posterior análisis, fue creado un programa en Labview el cual permite monitorear el funcionamiento de las variables medidas en el colector, todo esto basado en los módulos de adquisición de datos conocidos como Field point de la marca National Instrumens.

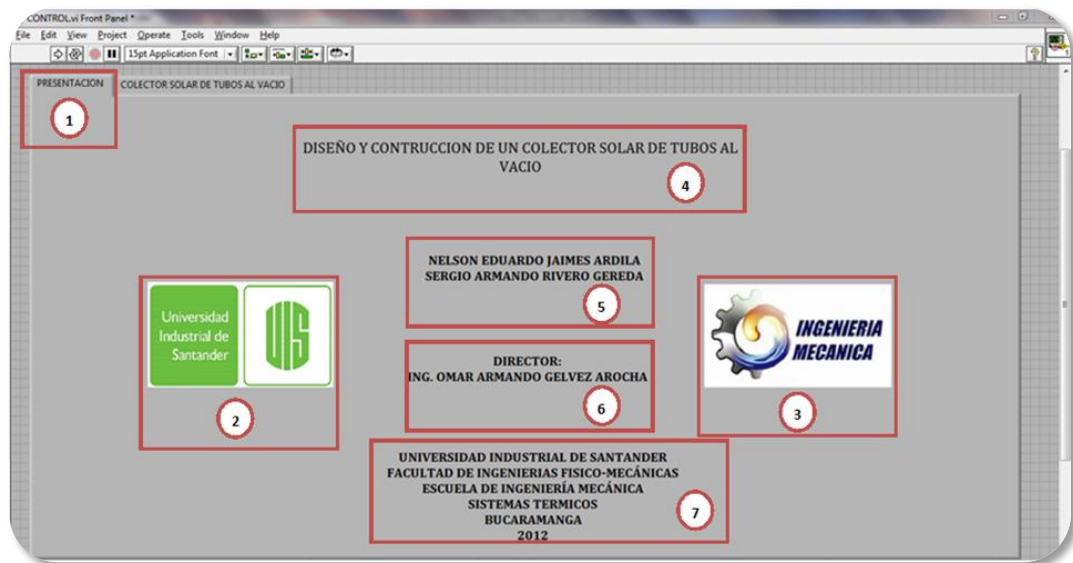
En este caso el programa se encuentra compuesto por dos ventanas, la primera denominada panel frontal, en el cual se presenta al usuario las variables a monitorear y se permite interacción mediante el ingreso de datos relacionados con el funcionamiento del colector, en este caso se ha dispuesto al usuario de dos pestañas, la primera denominada “Presentación” y por último la pestaña “Colector solar de tubos al vacío”. Por otro lado, se presenta la ventana de programación, conocida como diagrama de bloques, en él se establece la interacción entre las diversas variables presentadas al usuario.

5.5.1 Ventana del usuario o panel frontal: Esta ventana del programa de monitoreo describe los elementos que se presentan al usuario del sistema de adquisición de datos, en este caso se ha subdividido la ventana en dos pestañas denominadas “Presentación” y “Colector solar de tubos al vacío”.

La pestaña de presentación determina la información general acerca del proyecto de grado, se encuentra compuesta por los siguientes elementos (Ver figura 73):

1. Nombre de la pestaña ejecutada (Presentación).
2. Logo de la universidad
3. Logo de la escuela donde se realizó el proyecto de grado.

Figura 73: Ventana de presentación.

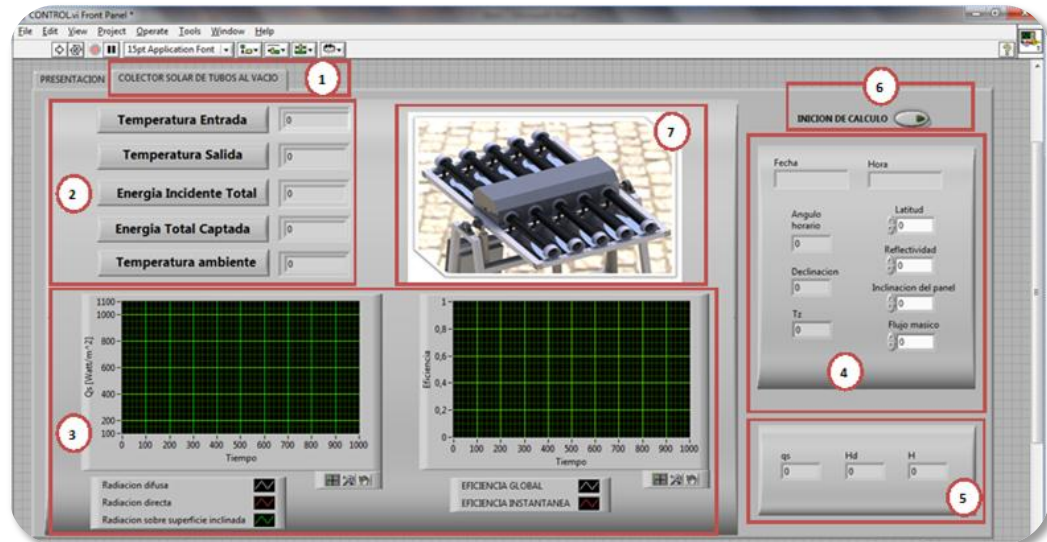


Fuente: Autores.

4. Nombre del proyecto de grado
5. Autores del proyecto de grado.
6. Director del proyecto de grado.
7. Universidad, facultad, escuela, área, lugar y año en el que se realizó el proyecto de grado.

Finalmente, dentro de la ventana de usuario o panel frontal se encuentra la pestaña “Colector solar de tubos al vacío” en la cual se relacionan las variables presentes en el colector solar, en ellas se pueden encontrar los siguientes elementos (Ver figura 75.)

Figura 74: Ventana “Colector solar de tubos al vacío”



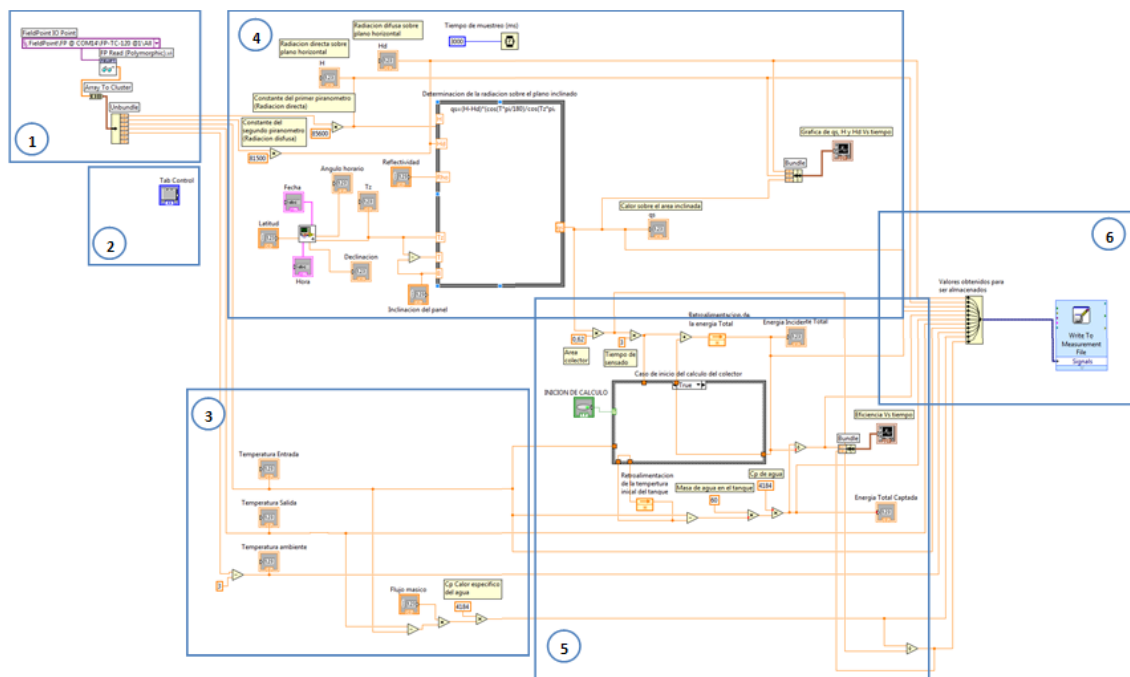
Fuente: Autores.

1. Nombre de la pestaña ejecutada (Colector solar de tubos al vacío).
2. Conjunto de indicadores numéricos encargados de suministrar al usuario los datos correspondientes a la temperatura de entrada y salida del colector, la energía total incidente, la energía total captada y por ultimo un registro de la variación de la temperatura ambiente.
3. Graficas del historial de datos: en este campo se presenta a la derecha la evolución de la energía incidente en el tiempo contemplando los valores de radiación total, radiación difusa y la radiación sobre los tubos de vacio. Finalmente, a la izquierda se presenta la variación de la eficiencia global e instantánea presentes en el colector.

4. Controladores e indicadores solares: en este caso se presenta al usuario datos relevantes relacionados con la posición solar a lo largo del día. Además, se le permite el ingreso de datos tales como la latitud, la reflectividad promedio presente en los alrededores del colector, el ángulo de inclinación del panel respecto al plano horizontal y el flujo másico presente en el colector solar.
5. Indicadores de radiación solar: este campo presenta el valor numérico de la radiación total, radiación difusa y radiación sobre el plano inclinado presentes en el colector solar.
6. Botón de ejecución del programa: permite dar inicio al registro y almacenamiento de datos.
7. Figura que representa un esquema del colector solar de tubos de vacío.

5.5.2 Ventana de programación o diagrama de bloques: En esta sección del programa se presentan las diversas interacciones entre las variables relacionadas con el desempeño del colector solar. Es de destacar que este tipo de programación se desarrolla de forma gráfica permitiendo facilidad en el manejo de las variables. A continuación, se presenta una subdivisión de los bloques de programación describiendo su funcionamiento (Ver figura 76)

Figura 75: Ventana de programación.



Fuente: Autores.

1. Bloque de configuración del Field Point: en este caso se dispone de un bloque en el cual se desarrolla la configuración del puerto del computador para la transmisión de datos.
2. Tab control: es el encargado de permitir ver las hojas en forma de pestaña: "Presentación o "Colector solar de tubos al vacío".
3. Indicadores de temperatura y relación de eficiencia instantánea: en ese bloque de programación se presenta al usuario las temperaturas de entrada

y salida del agua del colector, al igual que la temperatura ambiente. Además, se desarrolla el cálculo de la eficiencia instantánea.

4. Determinación de la irradiancia sobre el colector: en este caso se presenta un bloque que establece las condiciones que modifican la irradiancia sobre el colector (Día, hora, radiación directa, radiación difusa, latitud y reflectividad promedio) y se introduce una variable que controla el tiempo de muestreo.
5. Case structure o Estructura de inicio del análisis: En este caso se hace referencia a un bloque que da inicio al cálculo de la eficiencia del colector, en el cual se almacena la primera temperatura registrada a la entrada del colector y la compara con la misma temperatura registrada tiempo después. Finalmente, se determina el calor útil y se compara con el calor incidente.
6. Almacenamiento de datos: En este caso se recurre a una herramienta de Labview que permite almacenar en un archivo texto (.txt) los datos para su posterior análisis.

6 ANÁLISIS TERMODINÁMICO DE COLECTORES SOLARES DE TUBOS DE VACÍO.

6.1 DETERMINACIÓN DE LA IRRADIANCIA SOBRE LOS TUBOS DE VACÍO.

Con el objetivo de evaluar la irradiancia presente sobre los tubos de vacío es importante tener en cuenta que las condiciones de una superficie absorbente cilíndrica no puede asemejarse a una superficie plana. En el caso del colector solar de placa plana la determinación de la radiación incidente es un tanto más sencillo ya que su análisis ha sido extensamente documentado, y es posible determinar la irradiancia considerando la variación del ángulo de los rayos solares respecto a la superficie plana (Capítulo 1). Así midiendo la radiación directa y difusa (H y H_d) en el lugar de ubicación del colector, se determina la radiación como:

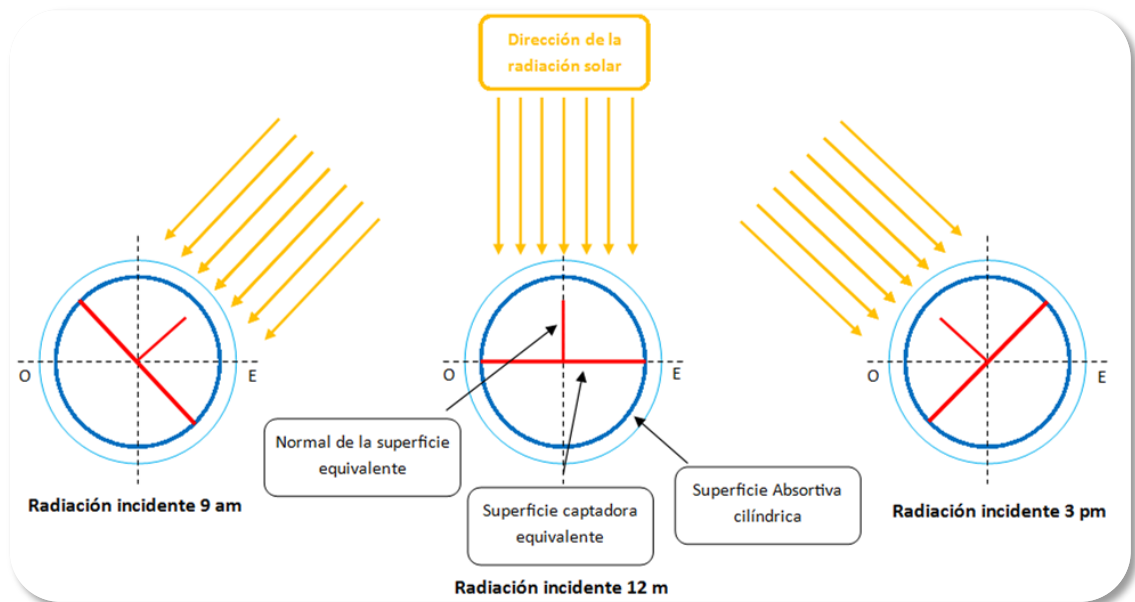
$$q_{s\beta} = (H - H_d) * \frac{\cos(\theta)}{\cos(\theta_z)} + H_d * \cos^2\left(\frac{\beta}{2}\right) + H * \rho * \sin^2\left(\frac{\beta}{2}\right)$$

De esta forma el calor total incidente sobre un colector de placa plana es determinado teniendo en cuenta el área del colector multiplicado por el la irradiancia $q_{s\beta}$.

Como puede verse en la determinación del calor incidente por unidad de área se presentan tres términos, el primero se encuentra relacionado con la radiación directa, el segundo relacionado con la radiación difusa y por último un término relacionado con la radiación reflejada de los alrededores, de forma similar es posible determinar el calor incidente sobre los tubos de vacío considerando las condiciones de una superficie captadora cilíndrica.

6.1.1 Radiación directa sobre los tubos de vacío: Considerando los tubos de vacío como una superficie absorbente cilíndrica como la presente en la figura 77 se puede observar que a lo largo del día la condición de la superficie parece seguir los rayos inclinándose en función del ángulo horario. Para este caso la dirección de la radiación solar y la normal de la superficie se encuentran sobre el mismo plano a lo largo del día, de esta forma para determinar la componente de la radiación en dirección normal a la superficie cilíndrica, basta con determinar el ángulo formado entre la normal a la superficie y los rayos solares.

Figura 76: Radiación directa sobre una superficie cilíndrica.



Fuente: Autores.

Es posible determinar el ángulo formado por los rayos solares y la normal de la superficie captadora equivalente como:

$$\sin \theta = (-\cos(\beta) * \sin(\theta_z) * \cos(\gamma_s) + (\sin(\beta) * \cos(\theta_z)))$$

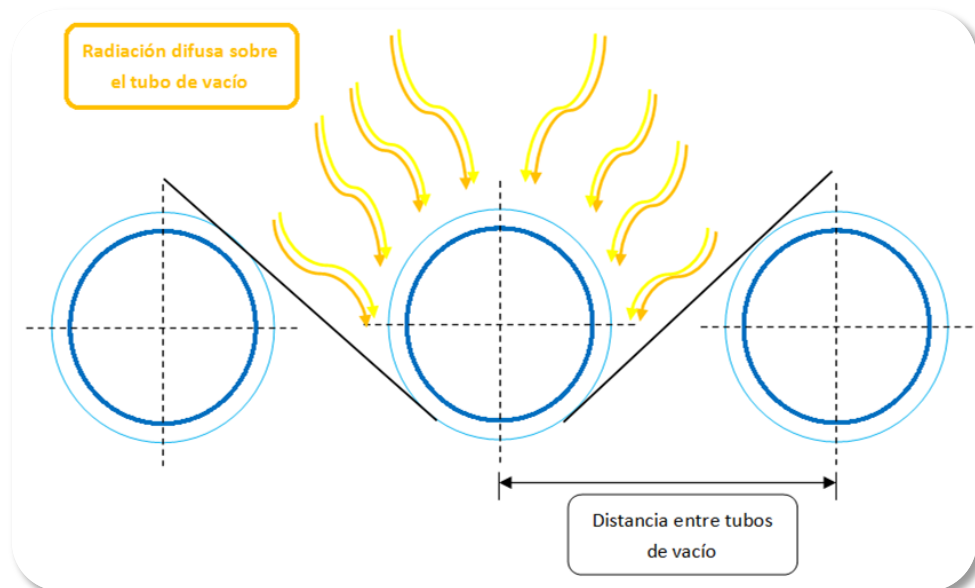
El calor incidente por una superficie cilíndrica asociado a la radiación directa será:

$$Q_{dir} = \frac{(H - H_d)}{\pi} * \frac{\cos(\theta)}{\cos(\theta_z)} * A$$

Considerando a Q_{dir} como el calor incidente directo, H la radiación total medida por el piranometro, H_d la radiación difusa y A como el área superficial del cilindro ($A = \pi * D * L$).

6.1.2 Radiación difusa sobre los tubos de vacío: La radiación difusa es la radiación desviada en todas direcciones por la atmosfera, es posible determinar la radiación presente sobre los tubos de vacío estableciendo que porcentaje de la sección cilíndrica se encuentra observando el ambiente (Ver figura 77.)

Figura 77: Radiación difusa sobre una superficie cilíndrica.



Fuente: Autores.

De esta forma la sección del tubo de vacío que observa el ambiente se puede cuantificar evaluando el factor de visión entre el tubo de vacío y el ambiente.

Considerando estas variables, el calor incidente relacionado con la radiación difusa se puede determinar como:

$$Q_{dif} = H_a * \cos\left(\frac{\beta}{2}\right)^2 * F_{TA} * A$$

En este caso Q_{dif} representa el calor incidente relacionado con la radiación difusa, F_{TA} representa el factor de visión del tubo de vacío hacia el ambiente y A como el área superficial del cilindro.

6.1.3 Radiación reflejada sobre los tubos de vacío: La identificación y determinación del calor incidente sobre una superficie cilíndrica función de la radiación reflejada se puede asociar a dos condiciones:

- Radiación reflejada por los alrededores hacia los tubos de vacío: La radiación reflejada por los alrededores hacia el colector solar se puede cuantificar teniendo en cuenta la siguiente relación:

$$Q_{ref_a} = H * \sin\left(\frac{\beta}{2}\right)^2 * \rho_{amb} * F_{TA} * A$$

En este caso Q_{ref_a} representa el calor incidente causado por la radiación de los alrededores, β el ángulo de inclinación del colector respecto a la horizontal, F_{TA} es el factor de visión del tubo de vacío hacia el ambiente, ρ_{amb} representa el albedo de los alrededores y A como el área superficial del cilindro.

- **Radiación reflejada por la superficie reflectora inferior de los tubos de calor:** Debido a la presencia de una separación entre los tubos de vacío, la radiación se refleja sobre la superficie presente bajo los tubos de vacío. De esta forma es posible cuantificar este calor como:

$$Q_{ref_i} = H * \rho_{sup} * F_{TS} * A$$

En este caso Q_{ref_i} representa el calor incidente sobre los tubos de vacío reflejado por la superficie ubicada bajo los mismos, ρ_{sup} representa la reflectividad de la superficie, F_{TS} es el factor de visión del tubo hacia la superficie inferior y A como el área superficial del cilindro.

Finalmente, es posible determinar el calor total incidente como:

$$Q_{total} = Q_{dir} + Q_{dif} + Q_{ref_a} + Q_{ref_i}$$

$$Q_{total} = q_{s\beta} * A$$

$$q_{s\beta} = \frac{H-H_d}{\pi} * \frac{\cos(\theta)}{\cos(\theta_z)} + H_d * \cos\left(\frac{\beta}{2}\right)^2 * F_{TA} + H * \sin\left(\frac{\beta}{2}\right)^2 * \rho_{amb} * F_{TA} + H * F_{TS} * \rho_{sup}$$

El calor incidente Q_{total} establece el calor que se presenta sobre la superficie transparente que protege y cubre la superficie absorbente de los tubos de vacío. Para determinar el calor incidente sobre la superficie absorbente es necesario tener en cuenta los efectos de transmisión de la superficie protectora de vidrio y la absorbencia de la superficie absorbente.

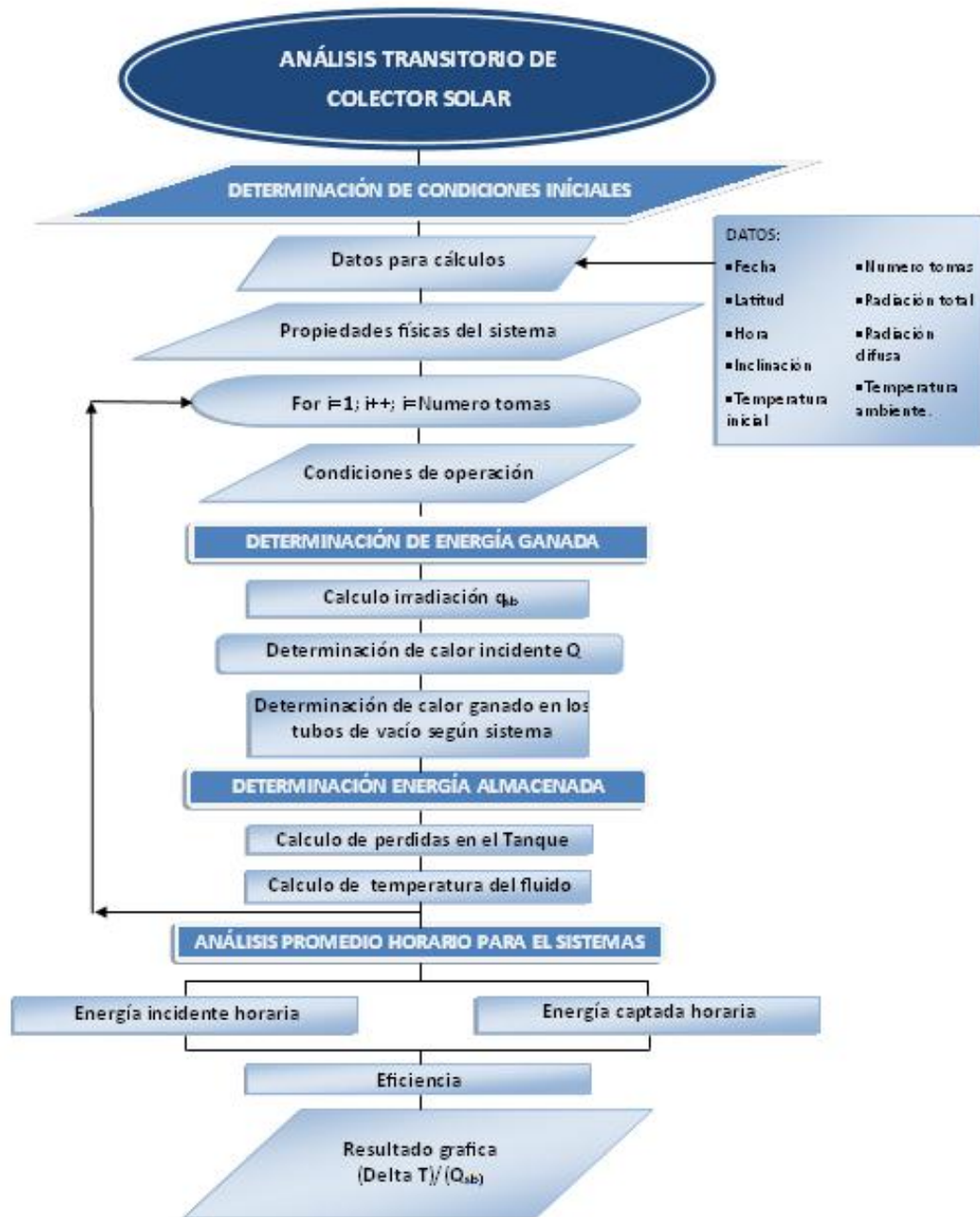
$$Q_{incidente} = q_{s\beta} * \tau\alpha * A$$

En este caso los factores τ y α representan la tasa de transmisión de la superficie protectora y la absorbencia de la superficie absorbente respectivamente.

6.2 MODELADO DEL COLECTOR SOLAR DE TUBOS AL VACÍO.

Para evaluar el comportamiento del colector solar desde el punto de vista teórico es importante desarrollar un modelo que represente de forma adecuada el proceso de transferencia de calor que se desarrolla en el sistema teniendo en cuenta la implementación de tubos conductores de fluido en el interior de los tubos de vacío o tubos de calor como medio para la transferencia de calor desde los tubos de vacío hacia el fluido calo-portador. Bajo esta condición se procede a desarrollar un programa en Matlab que permita estudiar el comportamiento del sistema.

Figura 78: Diagrama de flujo para la determinación del comportamiento del colector solar de tubos de vacío.



Fuente: Autores.

Tomando como referencia la figura 79 es posible establecer los pasos a seguir en el desarrollo del análisis teórico del colector solar. En este análisis se tomara como referencia valores de radiación total, radiación difusa y temperatura ambiente registrados en el laboratorio de Sistemas Térmicos de la escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad industrial de Santander (Ver Anexo B).

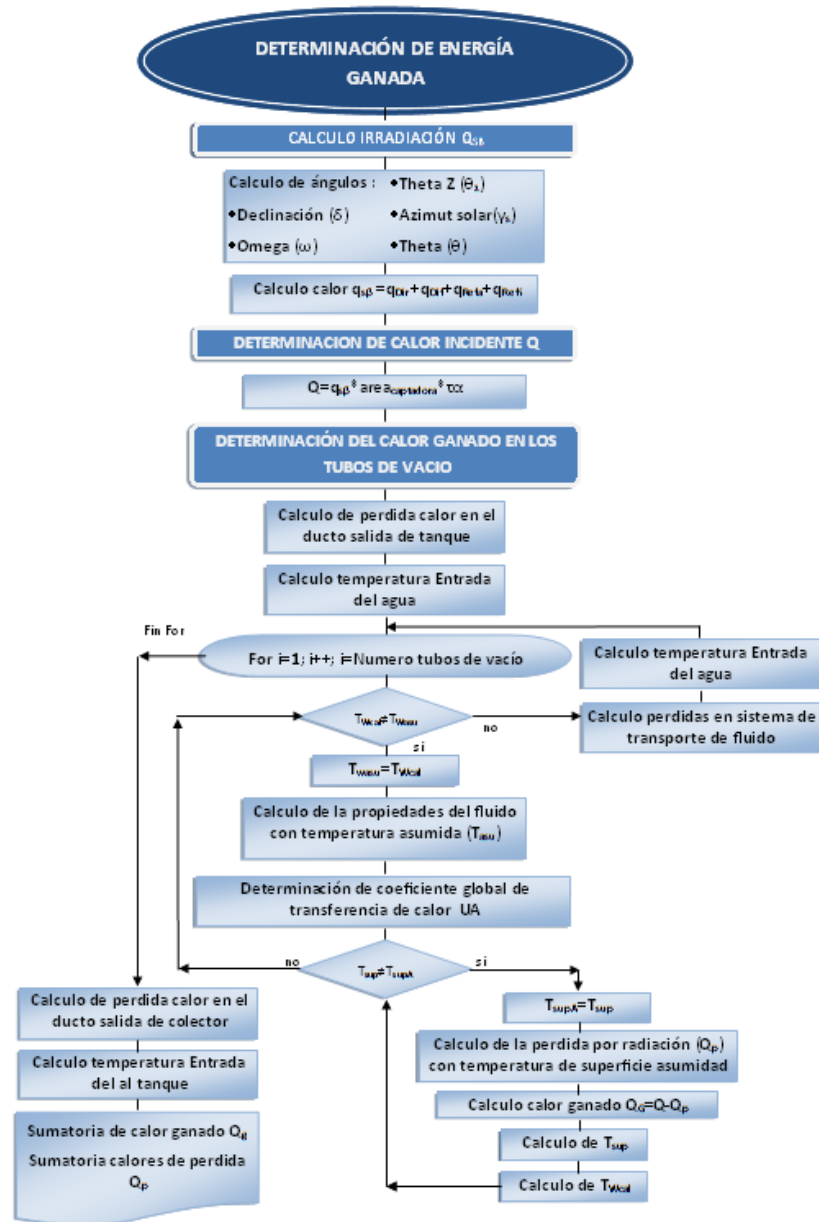
El análisis del sistema inicia con la determinación de las condiciones iniciales entre las cuales se describen:

- Datos para cálculo: En estos datos se incluyen la fecha estipulada de la toma de datos, la hora de inicio del análisis, el número de datos registrados, los datos registrados de radiación total, radiación difusa, y temperatura ambiente (Ver Anexo B). Además, se establece la temperatura inicial del tanque, la inclinación del colector solar de tubos al vacío y la latitud del lugar en donde se desarrolla la prueba.
- Propiedades físicas del sistema: En esta etapa se establecen las propiedades de los elementos que constituyen el colector solar tales como la geometría de los tubos de vacío, las propiedades de los conductos internos, la geometría del tanque, el material de los ductos de conexión del tanque al sistema de captación, etc.(Ver sección 6.1).
- Condiciones de operación: Debido a que los datos registrados de radiación y temperatura cambian cada 3 segundos, se deben actualizar estos datos para desarrollar el análisis. En esta etapa se cargan las nuevas condiciones bajo las cuales se encuentra sometido el colector.

Después de establecer los parámetros de análisis, se procede a determinar la energía ganada en el colector solar en función del sistema utilizado, ya sea con la implementación tubos conductores de fluido o tubos de calor como método para transferir el calor desde la superficie absortiva hacia el fluido calo-portador. De esta forma es necesario establecer un procedimiento de análisis que guie los

pasos para determinar del calor ganado por el sistema a su paso por los tubos de vacío.

Figura 79: Diagrama de flujo para la determinación del calor ganado por el fluido.

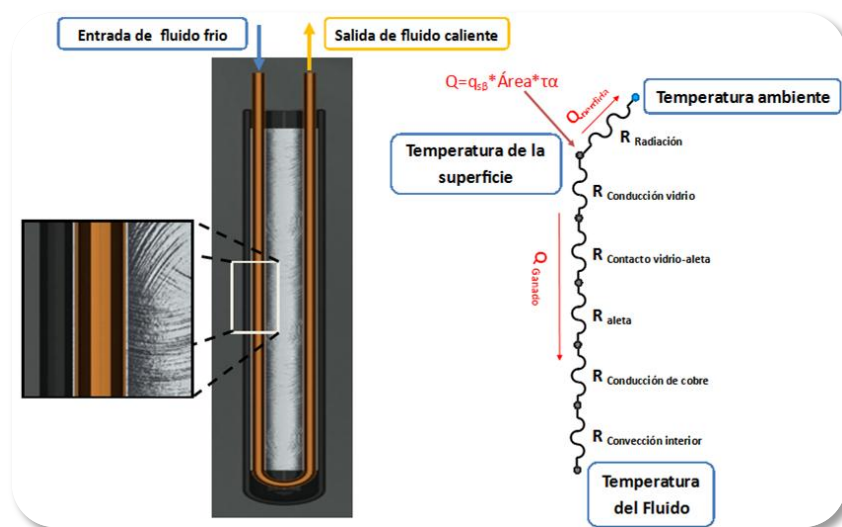


Fuente: Autores.

La determinación del calor ganado del colector solar de tubos al vacío inicia con la establecer la irradiancia y el calor incidente evaluando el efecto de la transmisividad y absorptividad del tubo de vacío (Ver sección 7.1). Seguidamente es necesario determinar la pérdida de calor presente en el sistema a causa del paso del fluido calo-portador por los ductos que conectan el tanque con el sistema de captación además de ser necesario establecer la nueva temperatura de ingreso al sistema.

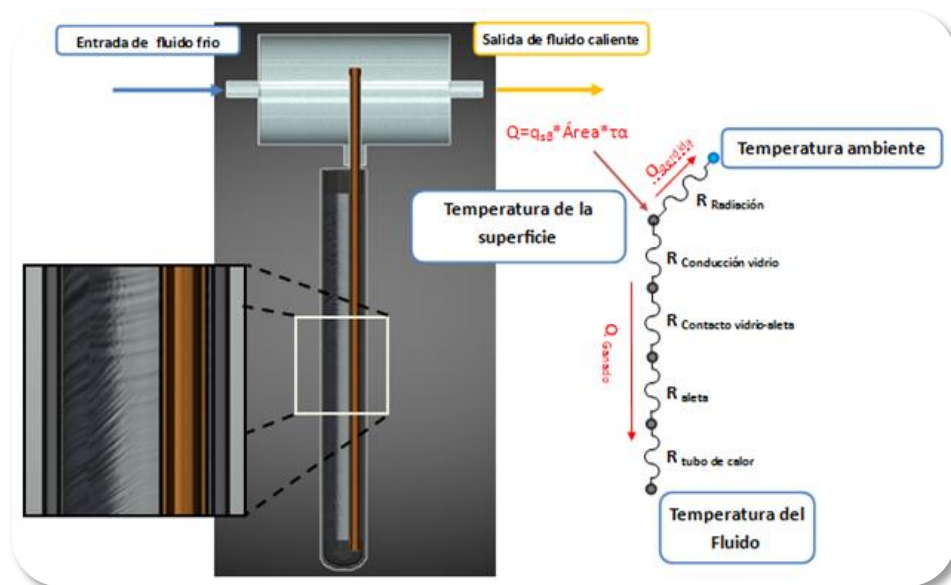
Debido a que el sistema presenta cierta cantidad de tubos de vacío y los mismos se encuentran ubicados en serie, la temperatura de salida del primer tubo será la temperatura de ingreso al siguiente. Bajo esta condición la determinación del calor ganado inicia con establecer una temperatura media del fluido entre la entrada y la salida, con esta se determinan los propiedades del mismo y seguidamente se establece el coeficiente global de transferencia de calor desde la superficie absorbente hacia el fluido calo-portador en función del sistema usado ya sean tubos conductores de fluido o tubos de calor.

Figura 80: Esquema de resistencias térmicas para colector con conductos de flujo.



Fuente: Autores.

Figura 81: Esquema de resistencias térmicas para tubos de calor.



Fuente: Autores.

Una vez determinado el coeficiente global de transferencia de calor, se procede a desarrollar un proceso iterativo para la determinación de la temperatura de la superficie absorbente, la cual determinará cuánto calor será entregado al fluido (Calor ganado) y cuánto será rechazado hacia el ambiente en forma de radiación. Después de establecer la temperatura de superficie se procede a calcular la temperatura media del fluido, la cual será comparada con la temperatura media del fluido asumida, una vez sean iguales el proceso culmina para el primer tubo de vacío. Seguidamente se determina el calor perdido por los conductos que comunican ya sean los tubos conductores de fluido (Mangueras) o los tubos de calor (Manifold), y se establece la temperatura de entrada al siguiente tubo de vacío. Este proceso se repite hasta culminar la cantidad de tubos de vacío dispuestos en el arreglo.

De esta forma al finalizar el paso por todos los tubos de vacío, se procede a determinar el calor perdido a causa del flujo del fluido calo-portador a lo largo del conducto que une el tanque con la salida del sistema captador de energía. En este

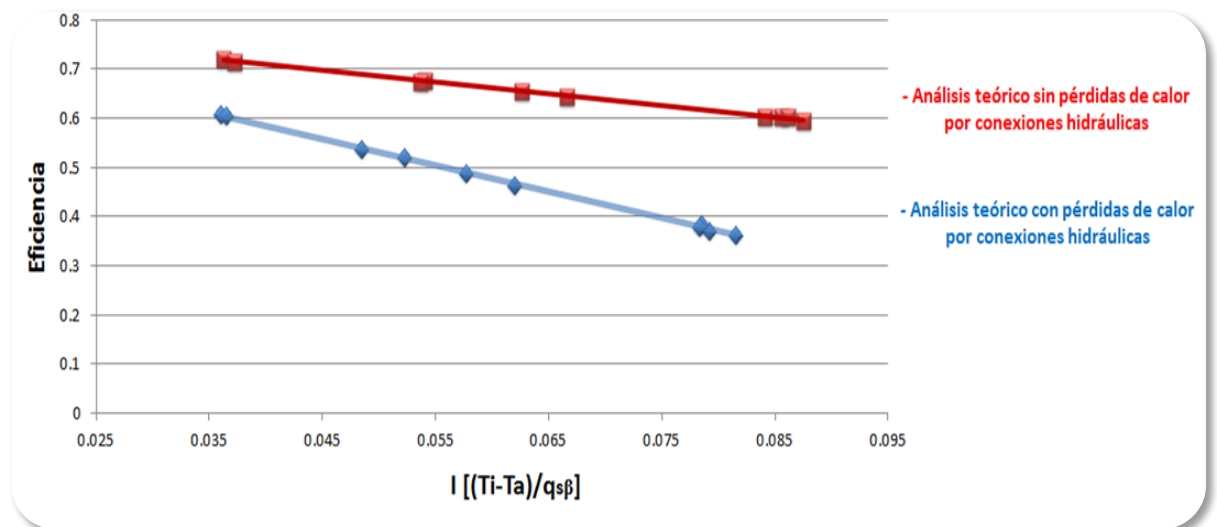
punto se ha determinado la energía aprovechada en aumentar la temperatura del fluido calo-portador y se han establecido las pérdidas de calor debido a las conexiones hidráulicas requeridas.

Finalmente con la determinación del calor ganado es necesario determinar la influencia de este calor en la temperatura del tanque, para esto se deben tener en cuenta las pérdidas de calor y por tanto establecer la nueva temperatura del mismo. Esta nueva temperatura será la temperatura de entrada al sistema para los siguientes datos de radiación difusa, radiación total y temperatura ambiente.

El proceso descrito anteriormente se desarrolla hasta culminar todos los datos de radiación y temperatura introducidos para el análisis. De esta forma en cada caso se procede a guardar la energía incidente, la energía captada, la temperatura del fluido y la temperatura ambiente con el objetivo de desarrollar análisis promedio de los datos y así poder establecer el comportamiento del sistema a través de la curva de eficiencia.

6.2.1 Comportamiento teórico de colector solar de tubos al vacío con tubos conductores de fluido: Teniendo en cuenta las características del colector solar de tubos al vacío con la implementación de tubo conductor de fluido se desarrollan dos curvas de funcionamiento, la primera describe el sistema sin tener en cuenta las pérdidas de calor debido a las conexiones hidráulicas y la segunda establece un modelo considerando estas pérdidas de calor (Ver sección 7.2).

Figura 82: Eficiencia teórica del colector solar de tubos de vacío con tubos conductores de fluido.

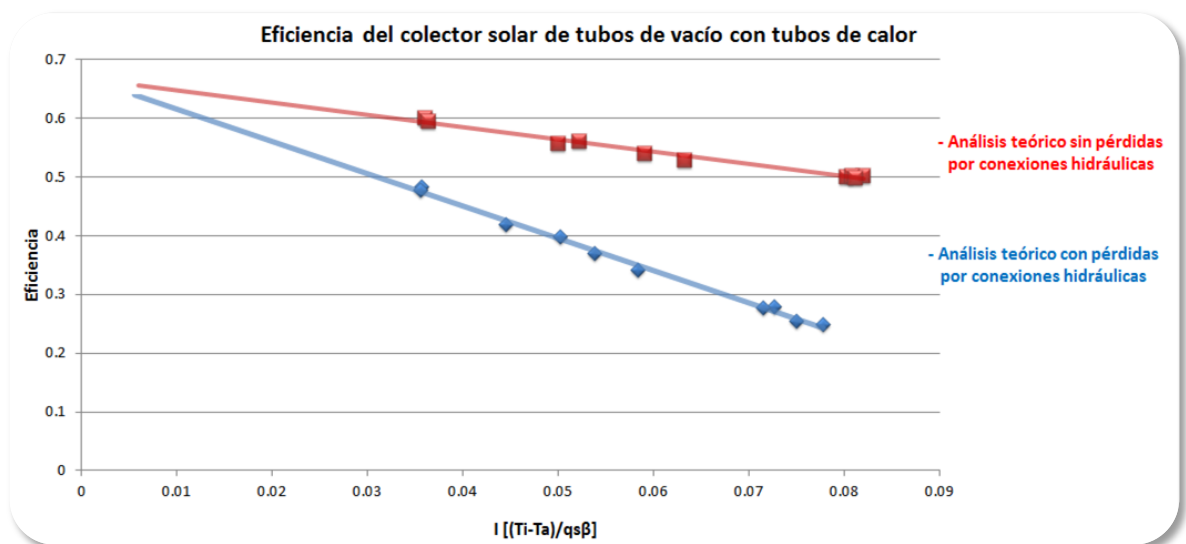


Fuente: Autores.

Para este caso es posible establecer que la curva de eficiencia del sistema sin considerar las pérdidas de calor en las conexiones hidráulicas presenta una eficiencia superior, por esta razón en el diseño de un colector solar es importante tener en cuenta el aislamiento del sistema en cada uno de sus elementos con el objetivo de no perder el calor ganado por la superficie absorbente. Es de destacar que el análisis teórico del colector solar sin tener en cuenta las pérdidas de calor en las conexiones hidráulicas presenta unos resultados muy cercanos a los establecidos en la literatura como la curva de eficiencia de un sistema de colector solar de tubos al vacío (Ver figura 33)

6.2.2 Comportamiento teórico del colector solar de tubos de vacío con tubos de calor: Para el análisis del colector solar usando tubos de calor se implementan los mismos datos de radiación total, radiación difusa y temperatura ambiente con los cuales se desarrolló el análisis del colector con tubos conductores de fluido. Al igual que en el caso del sistema implementando tubos conductores de fluido, se desarrollaron dos condiciones teniendo en cuenta las pérdidas de calor debido a las conexiones hidráulicas y sin considerar estas pérdidas.

Figura 83: Eficiencia teórica del colector solar de tubos de vacío con tubos de calor.



Fuente: Autores.

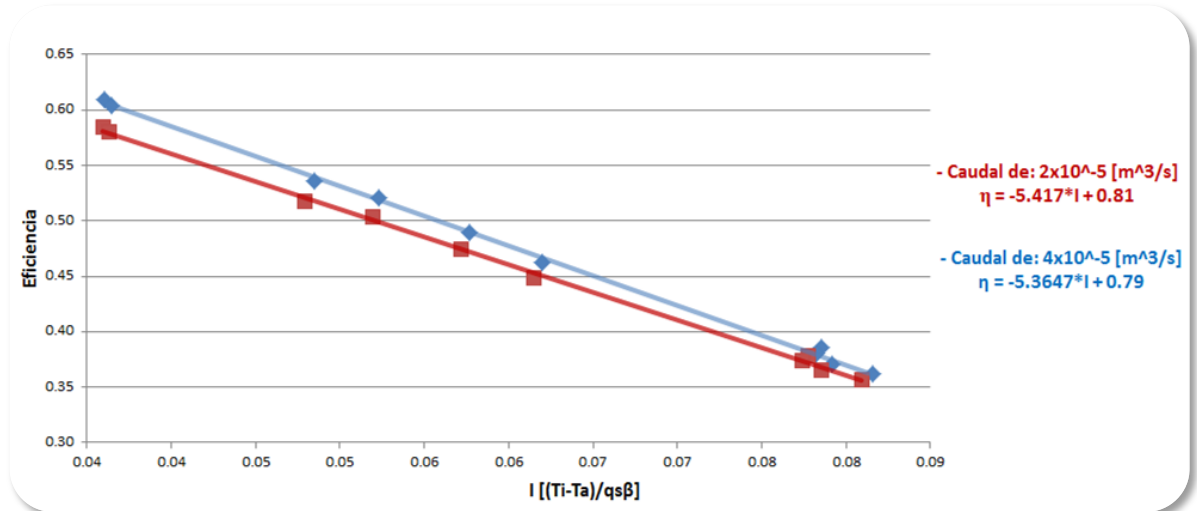
Al igual que en el caso del colector solar de tubos al vacío con tubo conductor de fluido, se ve una influencia significativa de la consideración de las pérdidas de calor debido a las conexiones hidráulicas en la eficiencia del sistema.

6.2.3 Influencia de la variación de las condiciones del sistema en la eficiencia del colector solar de tubos al vacío: Con el desarrollo del modelo teórico del colector solar de tubos al vacío es posible evaluar la influencia de diversas variables en el comportamiento de la eficiencia del sistema. Esto con el fin de establecer qué condiciones pueden afectar considerablemente la eficiencia del colector solar de tubos al vacío.

Para este caso se toma como referencia el análisis teórico desarrollado sobre el colector solar de tubos al vacío con tubos conductores de fluido, en el cual se evalúa la influencia del caudal, la emisividad de la superficie, la variación de las características de transmisividad y absorptividad de los tubos de vacío y el aislamiento del tanque.

- **Influencia del caudal en la eficiencia del colector solar de tubos al vacío:**
Para este caso se toma como referencia un caudal de 4×10^{-5} [m³/s] (el mismo utilizado en las pruebas experimentales) y se varía a un caudal de 2×10^{-5} [m³/s] esto evidencia una disminución en la eficiencia del sistema ya que el fluido al pasar por el colector presenta una temperatura más elevada aumentando las pérdidas de calor en las conexiones hidráulicas presentes en el sistema.

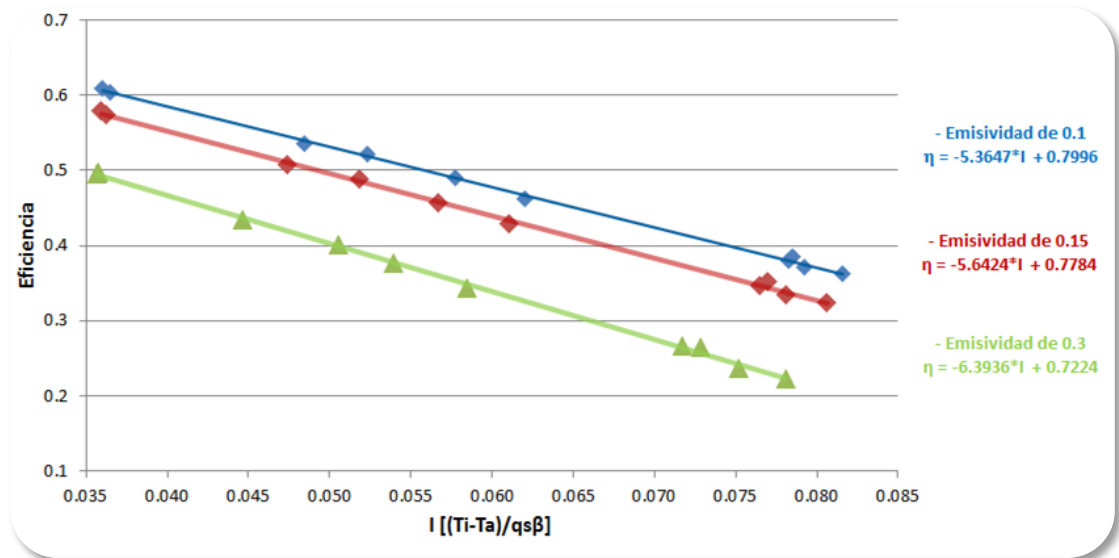
Figura 84: Influencia del caudal en la eficiencia del colector solar de tubos al vacío.



Fuente: Autores.

- **Influencia de la emisividad de la superficie absorbente en la eficiencia del colector solar de tubos al vacío:** Para este caso se procede a evaluar el colector solar teniendo en cuenta tres condiciones de emisividad de la superficie absorbente, el primero con una emisividad de 0.1, seguidamente se evalúa una emisividad de 0.15 y por último de 0.3. En este caso el aumento de la emisividad evidencia un aumento en el calor perdido por radiación hacia el ambiente produciendo una disminución en la eficiencia del sistema.

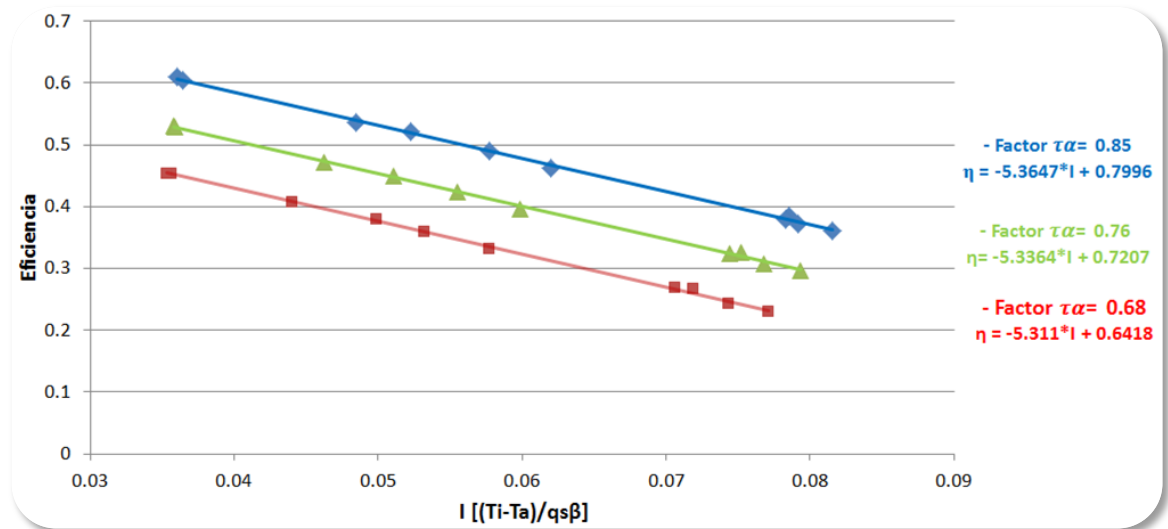
Figura 85: Influencia de la emisividad de la superficie en la eficiencia del colector solar de tubos al vacío.



Fuente: Autores.

- **Influencia de la de las características de transmisividad y absortividad de los tubos de vacío en la eficiencia del colector solar ($\tau\alpha$):** En este caso se procede a evaluar el efecto de la disminución del producto $\tau\alpha$. En una primera condición se evalúa $\tau\alpha = 0.85$, seguidamente $\tau\alpha = 0.76$ y finalmente $\tau\alpha = 0.68$, en cada uno de los casos se evidencia una disminución de la eficiencia, ya que este factor establece que tanto calor atraviesa la cubierta de vidrio hacia la superficie absortiva.

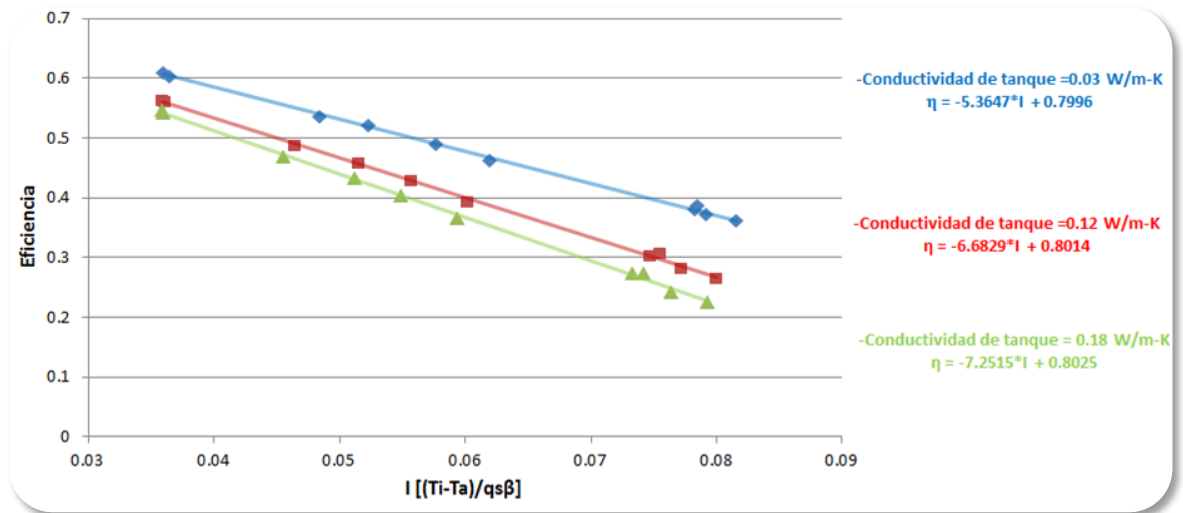
Figura 86: Influencia del $\tau\alpha$ de los tubos de vacío en la eficiencia del colector solar.



Fuente: Autores.

- **Influencia del aislamiento del tanque en la eficiencia del colector solar de tubos al vacío:** En este caso se evalúa la influencia de desarrollar un buen aislamiento sobre el tanque de almacenamiento del colector solar, este caso se implementa variando la conductividad del material aislante del tanque desde $0.03 \frac{W}{m-K}$ hasta $0.18 \frac{W}{m-K}$. Para esta condición es evidente que con un aumento de la conductividad se presenta una pérdida de calor significativa en el tanque disminuyendo la eficiencia del sistema.

Figura 87: Influencia del aislamiento del tanque en la eficiencia del colector solar de tubos al vacío



Fuente: Autores.

7 DESARROLLO DE PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.

7.1 DESCRIPCIÓN DE PRUEBAS DE DESEMPEÑO

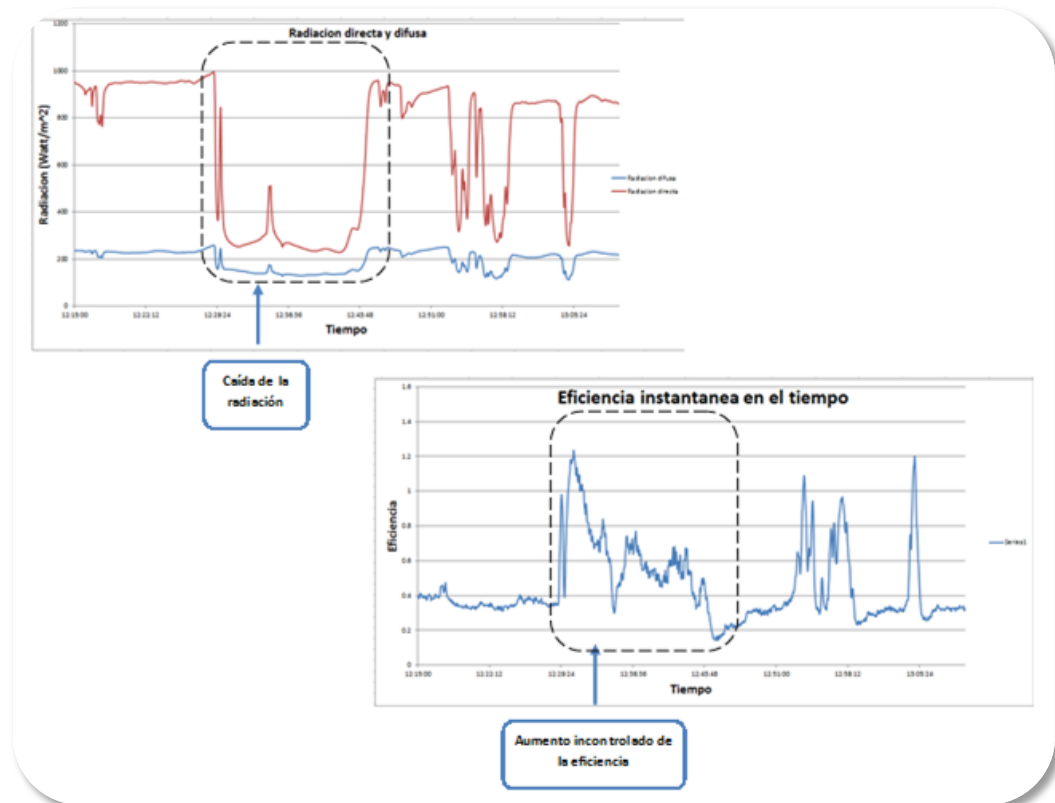
Con el objetivo de establecer el comportamiento del colector solar de tubos al vacío diseñado, se implementaron pruebas de desempeño teniendo en cuenta las variables medidas en el colector solar, para este caso las variables registradas fueron la temperatura de entrada del colector, la temperatura de salida, la temperatura ambiente, la radiación total y la radiación difusa.

La prueba de desempeño inicia con la ubicación del colector en un área despejada, en donde los rayos directos del sol no encuentren obstrucción alguna a lo largo del día, seguidamente se procede a direccionar la superficie captadora inclinándola respecto a la horizontal y siguiendo el ángulo de declinación del sol (Ver sección 1.2). A continuación, se procede a la ubicación de los piranómetros para el registro de la radiación total y difusa. Finalmente, con el colector energizado y la bomba de circulación de agua en funcionamiento se procede a ejecutar el programa de monitoreo desarrollado en Labview (Sección 6.5), el cual se encarga de almacenar los datos registrados cada 3 segundos para su posterior análisis.

Considerando los datos registrados, se procede a evaluar la eficiencia del sistema, en este caso se debe desarrollar un tratamiento adecuado de los datos con el objetivo de disminuir los errores registrados. Es de destacar que el desarrollo u obtención de la eficiencia instantánea del sistema es una variable que puede presentar errores significativos debido a dos condiciones que son fuente de error y de variación de la prueba, la primera condición es la temperatura registrada en las termocuplas, en este caso para evaluar el calor útil instantáneo la diferencia de temperaturas registradas en las termocuplas presentar un error asociado a la velocidad de respuesta de cada una de ellas. Por otro lado, la variación de la radiación solar a lo largo del día representa el segundo factor de error, ya que se

pueden presentar momentos del día en los cuales la radiación total disminuye drásticamente debido a factores climatológicos, más sin embargo el fluido caloportador sigue ganando calor debido a la inercia térmica presente en los componentes del sistema.

Figura 88: Variación de la eficiencia en función de la radiación.



Fuente: Autores.

Considerando las fuentes de error presentadas anteriormente, se decide desarrollar un análisis global del sistema, teniendo como referencia una única temperatura (Temperatura de entrada del colector) y la cantidad de fluido presente en el tanque de almacenamiento, de esta forma, considerando la variación de la temperatura de entrada en el tiempo es posible determinar el calor útil como:

$$Q_u = M * C_p * \Delta T / t$$

Con M como la masa de agua contenida en el tanque, C_p Calor específico promedio, ΔT la diferencia de temperaturas registradas por la termocupla en un tiempo determinado y t el tiempo de toma de datos. De la misma forma, determinado la irradiancia sobre el colector ($q_{s\beta}$) y desarrollando la integral en el tiempo es posible determinar una irradiancia promedio. Finalmente, considerando el calor útil y el calor irradiado promedio es posible determinar la eficiencia del colector, la cual se puede relacionar con la diferencia de temperaturas promedio entre la entrada del agua al colector, la temperatura ambiente y la irradiancia $q_{s\beta}$ con el objetivo de establecer la curva de funcionamiento del colector.

Bajo estas condiciones es necesario desarrollar varias tomas de datos considerando la implementación de tubos conductores de fluido o tubos de calor con el objetivo de evaluar su funcionamiento. Por otro lado, es adecuado desarrollar variaciones en el caudal, verificando su influencia en la eficiencia del sistema.

Teniendo como referencia lo anterior se desarrollaron las siguientes pruebas de desempeño:

Tabla 21: Pruebas de desempeño de colector solar de tubos al vacío.

	Día	horario	Temperatura inicial (°C)	Temperatura final (°C)	Flujo másico (Kg/s)	Inclinación del colector (β)	
Tubos conductores de fluido superficie en Acero inoxidable							
Tubos conductores de fluido	Sábado 11 de Febrero de 2012	10:20am - 3:41 pm	33.22	45.24	0.04	30 °	
	Lunes 13 de Febrero de 2012	10:40am-4:05pm	33.9	45.05	0.04	15 °	
	Lunes 20 de Febrero de 2012	11:51am-5:06pm	30.85	43.83	0.04	15 °	
	Martes 21 de Febrero de 2012	12:30am-4:37pm	41.19	49.87	0.04	15 °	
	Jueves 23 de Febrero de 2012	10:38am-5:01pm	42.56	54.1	0.04	15 °	
	Variación del caudal con superficie en acero inoxidable						
	Martes 14 de Febrero de 2012	9:30am-3:37pm	26.15	49.28	0.02	15 °	
	Tubos conductores de fluido con superficie blanca						
	Martes 28 de Febrero de 2012	10:53am-3:54pm	30.7	46.54	0.04	15 °	
	Miércoles 29 de Febrero de 2012	10:56am-5:19pm	40.94	52.98	0.04	15 °	
Jueves 1 de Marzo de 2012	11:08am-5:08pm	40.3	57.15	0.04	15 °		
Tubos conductores de fluido con superficie negra							
Miércoles 14 de Marzo de 2012	9:28am-3:28pm	25.25	40.5	0.04	15 °		
Tubos de calor con superficie en acero inoxidable							
Tubos de calor	Jueves 15 de Marzo de 2012	11:33am-4:50pm	36.55	42.53	0.062	15 °	
	Viernes 16 de Marzo de 2012	9:42am-4:20pm	36.27	42.74	0.062	15 °	
	Viernes 23 de Marzo de 2012	9:40am-3:64pm	24.75	37.92	0.062	15 °	

Fuente: Autores.

7.2 DESEMPEÑO DE TUBOS AL VACÍO CON TUBOS CONDUCTORES DE FLUIDO.

Para evaluar el comportamiento del colector solar con tubos conductores de fluido se desarrollaron tres tipos de pruebas. La primera prueba se implementó con una superficie reflectora de acero inoxidable con flujo másico de 0.04 Kg/s, seguidamente se cambió a un flujo másico de 0.02Kg/s, a continuación se implementó una variación en la superficie reflectora cambiando en una primera condición por una superficie blanca y por ultimo una superficie negra ambas con un caudal de 0.04 Kg/s (Ver Tabla 21).

En cada una de las pruebas se tomaron datos en el horario estipulado cada 3 segundos, de esta forma se implementaron promedios cada hora para disminuir los errores causados por la medición en las termocuplas y la variación en la radiación solar. El análisis de los datos se establece en función de la curva característica de los colectores solares en los que se evalúa la eficiencia respecto a la relación entre la diferencia de temperaturas (Temperatura de entrada del fluido al colector y la temperatura ambiente) y la irradiancia ($q_{s\beta}$).

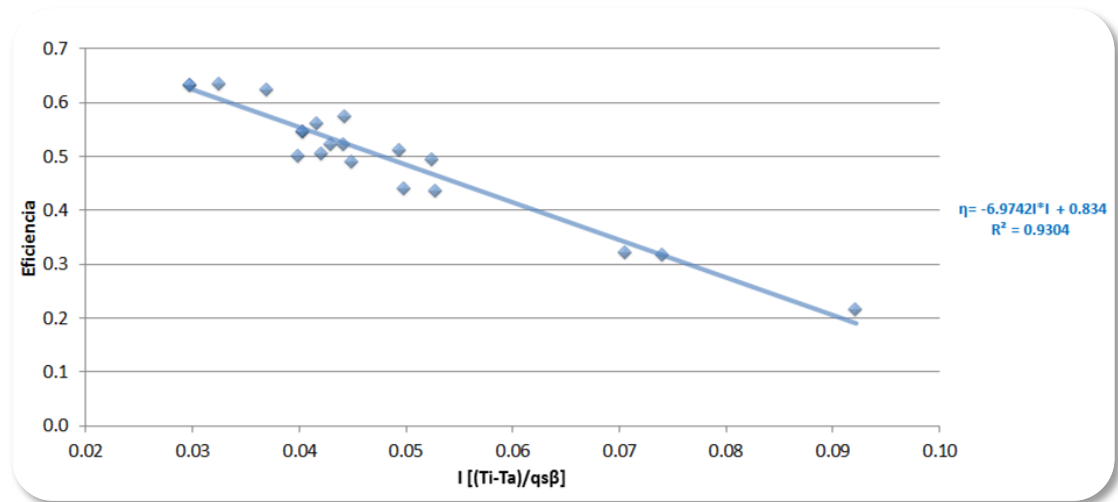
Es de destacar que para determinar la irradiancia sobre el colector solar fue necesario establecer valores de reflectividad asociados a la superficie reflectora ubicada bajo los tubos de vacío, de esta forma para la superficie de acero inoxidable se presenta una reflectividad de 0.572, para la superficie blanca un valor de 0.68 y por ultimo para la superficie negra un valor de 0.64

Tabla 22: Datos promedio para pruebas con tubos conductores de fluido y superficie en acero inoxidable (Flujo másico de 0.04 kg/s).

	Energía incidente por hora (J)	Energía captada cada hora (J)	Eficiencia Horario	Temperatura promedio entrada (°C)	Temperatura promedio ambiente (°C)	Dif. temp (°C)	$q_{s\beta} \left(\frac{Watt}{m^2} \right)$	$\frac{Dif. temp}{q_s}$
Sábado 11 de Febrero de 2012	749019.7	468868.0	0.626	37.92	26.09	11.83	319.94	0.0370
	734856.2	421981.9	0.574	39.70	25.81	13.89	313.89	0.0442
	821296.4	429796.3	0.523	41.39	26.32	15.08	350.81	0.0430
	979693.1	492312.1	0.503	43.23	26.54	16.69	418.47	0.0399
Lunes 13 de Febrero de 2012	1111317	703303.5	0.633	37.77	23.65	14.12	474.70	0.0297
	1142822	726745.6	0.636	40.61	24.73	15.88	488.15	0.0325
	1029509	562642.2	0.547	43.18	25.44	17.75	439.75	0.0404
Lunes 20 de Febrero de 2012	827970.7	625158.0	0.755	35.15	23.19	11.96	353.67	0.0338
	1111317	703303.5	0.633	37.77	23.65	14.12	474.70	0.0297
	1029509	562642.2	0.547	43.18	25.44	17.75	439.75	0.0404
	556216.0	296950.3	0.534	44.83	25.60	19.23	237.59	0.0810
Martes 21 de Febrero de 2012	1230251	890849.9	0.724	42.96	25.72	17.25	525.50	0.0328
	750673.5	242248.9	0.323	49.39	26.78	22.61	320.65	0.0705
	1153272	648602.0	0.562	46.92	26.38	20.53	492.62	0.0417
	1037604	531384.8	0.512	48.38	26.50	21.88	443.21	0.0494
	976848.6	484497.7	0.496	48.40	26.50	21.90	417.26	0.0525
	966563.2	421981.9	0.437	48.41	26.63	21.78	412.86	0.0528
Jueves 23 de Febrero de 2012	1045720	547012.5	0.523	46.51	26.80	19.71	446.68	0.0441
	1202238	609529.3	0.507	48.82	27.22	21.60	513.53	0.0421
	1239556	609529.3	0.492	51.25	27.45	23.80	529.47	0.0449
	682536.3	148474.7	0.218	54.00	27.13	26.87	291.54	0.0922
	1170804	515755.1	0.441	52.43	27.48	24.94	500.11	0.0499
	836236.9	265691.9	0.318	53.77	27.33	26.44	357.20	0.0740

Fuente: Autores.

Figura 89: Eficiencia del colector solar de tubos al vacío con tubos conductores de fluido (Superficie en acero inoxidable y flujo másico de 0.04 Kg/s)

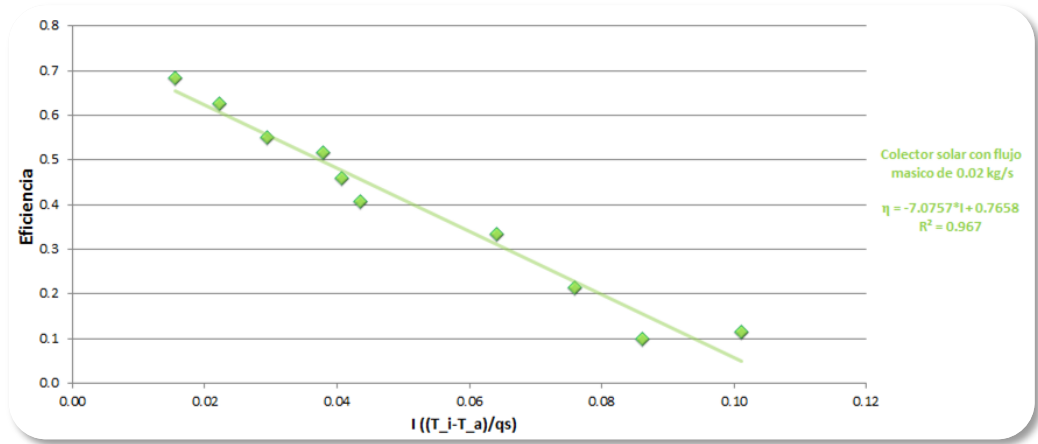


Fuente: Autores.

Tabla 23: Datos promedio para pruebas con tubos conductores de fluido y superficie en acero inoxidable (Flujo másico de 0.02 kg/s).

	Energía incidente por hora (J)	Energía captada cada hora (J)	Eficiencia Horario	Temperatura promedio entrada (°C)	Temperatura promedio ambiente (°C)	Dif. temp (°C)	$q_{s\beta} \left(\frac{Watt}{m^2} \right)$	$\frac{Dif.temp}{q_s}$
Martes 14 de Febrero de 2012	1158214.3	793061.6	0.685	30.28	23.19	7.09	455.15	0.01557
	1237973.9	682331.9	0.551	37.98	23.65	14.34	486.49	0.02947
	1233884.8	565617.7	0.458	44.47	24.73	19.74	484.89	0.04071
	935448.1	311239.2	0.333	49.04	25.44	23.60	367.61	0.06419
	752930.4	74817.1	0.099	51.07	25.60	25.48	295.88	0.08610
	1241306.4	778097.9	0.627	34.31	23.50	10.81	487.80	0.02217
	1165329.6	601529.6	0.516	41.46	24.12	17.34	457.95	0.03786
	1302448.4	529705.2	0.407	47.34	25.09	22.25	511.83	0.04347
	803120.1	170583.0	0.212	49.49	25.55	23.94	315.61	0.07585
628517.0	71824.5	0.114	50.65	25.67	24.98	246.99	0.10114	

Figura 90: Eficiencia del colector solar de tubos al vacío con tubos conductores de fluido (Superficie en acero inoxidable y flujo másico de 0.02 Kg/s)



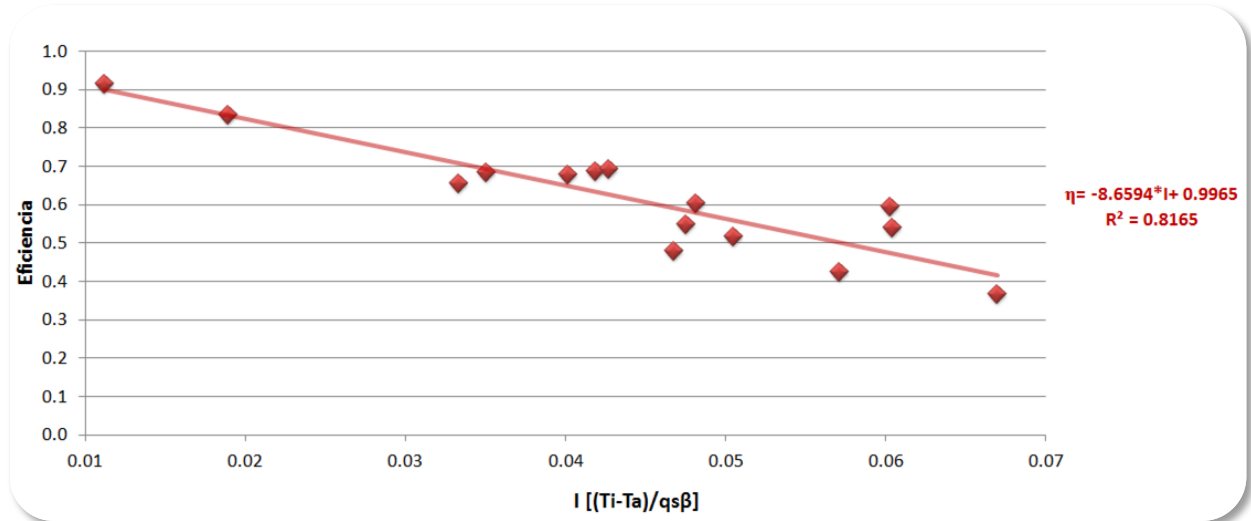
Fuente: Autores.

Tabla 24: Datos promedio para pruebas con tubo conductor de fluido y superficie blanca (Flujo másico de 0.04 kg/s).

	Energía incidente por hora (J)	Energía captada cada hora (J)	Eficiencia Horario	Temperatura promedio entrada (°C)	Temperatura promedio ambiente (°C)	Dif. temp (°C)	$q_{s\beta} \left(\frac{Watt}{m^2} \right)$	$\frac{Dif. temp}{q_s}$
Martes 28 de Febrero de 2012	1347720.1	1234686.4	0.916	33.16	26.42	6.74	603.82	0.0112
	1302132.0	1086212.6	0.834	37.78	26.73	11.05	583.39	0.0189
	926353.6	632972.4	0.683	41.21	26.65	14.56	415.03	0.0351
	909848.2	625158.0	0.687	43.71	26.65	17.06	407.64	0.0419
	697213.8	414166.6	0.594	45.78	26.95	18.83	312.37	0.0603
Miércoles 29 de Febrero de 2012	1080257.9	711116.9	0.658	42.36	26.22	16.14	483.99	0.0334
	1021453.8	695488.2	0.681	45.16	26.80	18.36	457.64	0.0401
	781035.9	421981.9	0.540	48.57	27.45	21.12	349.93	0.0604
	1083123.0	593899.6	0.548	50.59	27.52	23.07	485.27	0.0476
	828332.1	304764.7	0.368	52.38	27.52	24.86	371.12	0.0670
Jueves 1 de Marzo de 2012	1074507.4	742375.3	0.691	45.78	25.22	20.57	481.41	0.0427
	1062009.6	507940.8	0.478	48.30	26.07	22.24	475.81	0.0467
	1125801.5	679859.5	0.604	50.67	26.40	24.27	504.39	0.0481
	1163327.5	601714.9	0.517	53.19	26.90	26.29	521.20	0.0504
	1086622.3	461053.7	0.424	55.31	27.52	27.79	486.84	0.0571

Fuente: Autores.

Figura 91: Eficiencia del colector solar de tubos al vacío con tubos conductores de fluido (Superficie blanca y Flujo másico de 0.04 Kg/s)



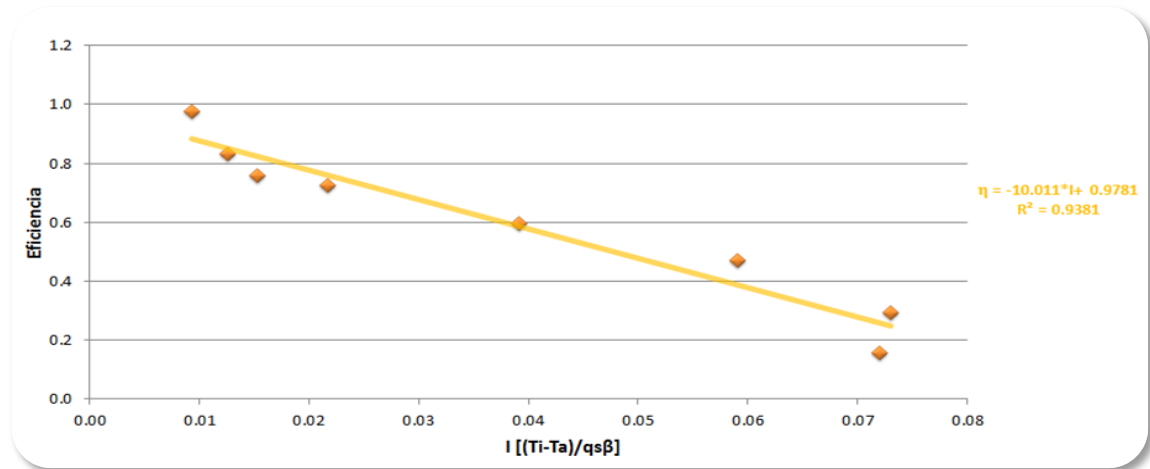
Fuente: Autores.

Tabla 25: Datos promedio para pruebas con tubos conductores de fluido y superficie negra (Flujo másico de 0.04 kg/s).

	Energía incidente por hora (J)	Energía captada cada hora (J)	Eficiencia Horario	Temperatura promedio entrada (°C)	Temperatura promedio ambiente (°C)	Dif. temp (°C)	$q_s \left(\frac{Watt}{m^2} \right)$	$\frac{Dif. temp}{q_s}$
Miércoles 14 de Marzo de 2012	1066760.6	1039325.1	0.974	28.04	23.60	4.44	477.94	0.0093
	1016913.3	843963.3	0.830	31.35	25.62	5.74	455.61	0.0126
	958533.4	726746.6	0.758	34.48	27.92	6.57	429.45	0.0153
	969569.0	703302.5	0.725	37.30	27.88	9.42	434.39	0.0217
	683436.3	406352.2	0.595	39.48	27.48	12.00	306.20	0.0392
	402618.7	62515.8	0.155	40.41	27.42	13.00	180.38	0.0720
	426931.3	125031.6	0.293	40.38	26.42	13.96	191.28	0.0730
	498520.4	234433.5	0.470	40.10	26.92	13.18	223.35	0.0590

Fuente: Autores.

Figura 92: Eficiencia del colector solar de tubos al vacío con tubos conductores de fluido (Superficie negra y Flujo másico de 0.04 Kg/s)

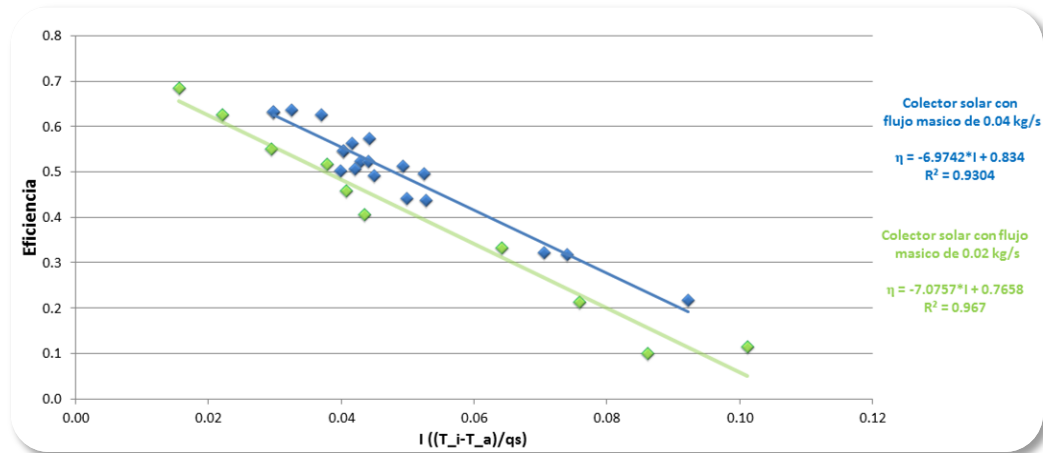


Fuente: Autores.

Considerando cada una de las pruebas descritas anteriormente se procede a desarrollar un análisis comparativo en cada uno de los casos, tomando como referencia la condición o desempeño del colector solar usando una superficie reflectora de acero inoxidable y un flujo másico de 0.04 kg/s, la cual representa el montaje principal del colector solar de tubos al vacío. Bajo esta condición y con las pruebas de tubos conductores de fluido se presentan dos casos de análisis:

- Desempeño del colector solar mediante la variación del flujo másico.

Figura 93: Eficiencia del colector solar con variación del caudal.



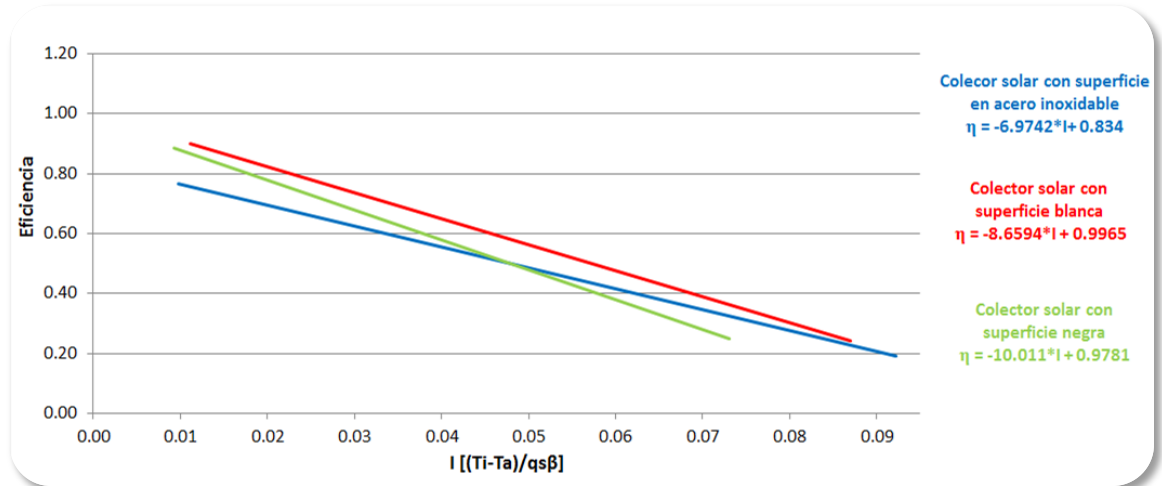
Fuente: Autores.

En este caso se puede observar que la eficiencia del sistema presenta una disminución, esto se debe principalmente a que un menor caudal provoca una mayor temperatura de salida del colector aumento de las pérdidas de calor en las conexiones hidráulicas.

- Desempeño del colector solar mediante la variación de la superficie reflectora (Superficie en acero inoxidable, superficie blanca y superficie negra).

Evaluando la variación de la superficie reflectora ubicada en la parte inferior de los tubos de vacío se puede establecer un comparativo del funcionamiento del colector solar con la implementación de una u otra superficie.

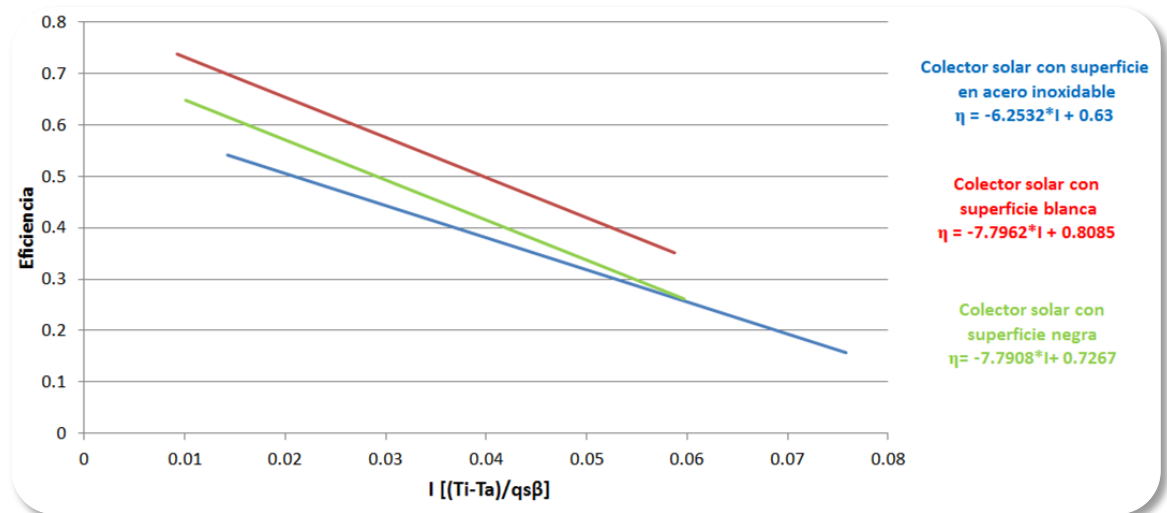
Figura 94: Eficiencia del colector solar con variación en la superficie reflectora.



Fuente: Autores.

Evaluando la figura 94 se puede observar que la variación de la eficiencia del sistema no es significativa, sin embargo esto se debe a que en el análisis de la irradiancia sobre los tubos de vacío se considera la reflectividad de la superficie. De esta forma, es necesario determinar la irradiancia sobre el colector solar dejando de lado la reflectividad de la superficie aislando esta variable del análisis.

Figura 95: Eficiencia del colector solar con variación en la superficie reflectora (Influencia de la reflectividad).



Fuente: Autores.

Bajo esta nueva condición, se puede evidenciar la variación de la eficiencia del sistema en función de la superficie ubicada bajo los tubos de vacío. Para este caso la mejor condición se presenta cuando la superficie reflectora es blanca, seguidamente la superficie negra y por último la superficie en acero inoxidable. De esta forma, aunque ópticamente la superficie que presenta mejores condiciones sería la de acero inoxidable su desempeño respecto a la superficie negra y blanca es menor debido a su reflectividad.

7.3 DESEMPEÑO DE TUBOS AL VACÍO CON TUBOS DE CALOR.

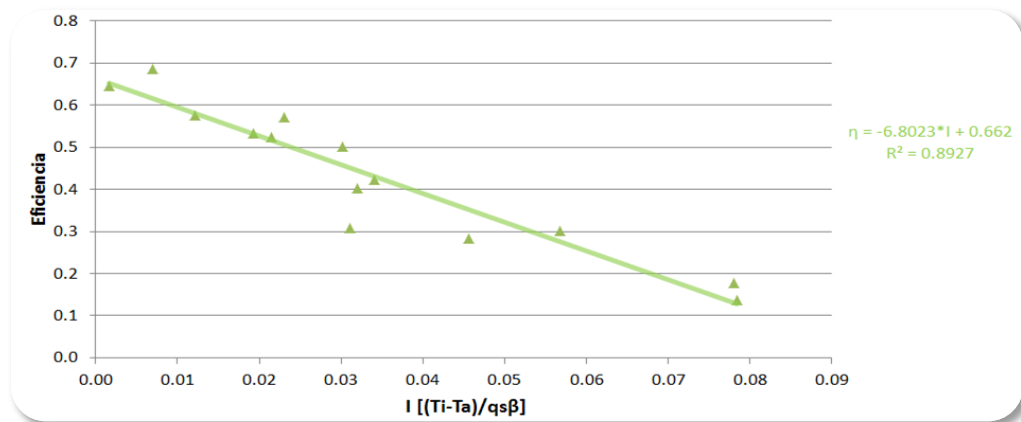
En el análisis del comportamiento del colector solar de tubos al vacío implementando tubos de calor se desarrollaron pruebas de desempeño teniendo como referencia un único caudal a lo largo del colector.

Tabla 26: Datos promedio para pruebas con tubos de calor y superficie en acero inoxidable (flujo másico 0.062 kg/s).

	Energía incidente por hora (J)	Energía captada cada hora (J)	Eficiencia Horario	Temperatura promedio entrada (°C)	Temperatura promedio ambiente (°C)	Dif. temp (°C)	$q_{s\beta}$ $\left(\frac{Watt}{m^2}\right)$	$\frac{Dif. temp}{q_s}$
jueves 15	991633.8	566735.4	0.572	37.69	27.90	9.79	423.57	0.023110
	799842.1	246714.2	0.308	39.31	28.68	10.62	341.65	0.031096
	715582.0	203548.2	0.284	41.86	27.93	13.93	305.66	0.045563
viernes 16	911670.4	366164.1	0.402	37.00	24.53	12.47	389.42	0.032024
	875978.1	371745.8	0.424	38.48	25.75	12.73	374.17	0.034029
	1095263.9	549618.0	0.502	40.32	26.23	14.09	467.84	0.030108
	450666.1	80005.3	0.178	41.61	26.60	15.01	192.50	0.077978
	661524.3	198338.7	0.300	42.16	26.12	16.04	282.57	0.056761
	488368.3	66609.1	0.136	42.65	26.30	16.35	208.61	0.078396
viernes 23	1158060.6	745724.2	0.644	26.23	25.45	0.78	494.66	0.001584
	877579.9	600598.2	0.684	28.91	26.30	2.61	374.86	0.006964
	974010.9	560781.6	0.576	31.21	26.12	5.10	416.05	0.012252
	859936.4	458077.3	0.533	33.27	26.20	7.07	367.32	0.019243
	915388.5	480031.4	0.524	35.15	26.73	8.42	391.01	0.021530

Fuente: Autores.

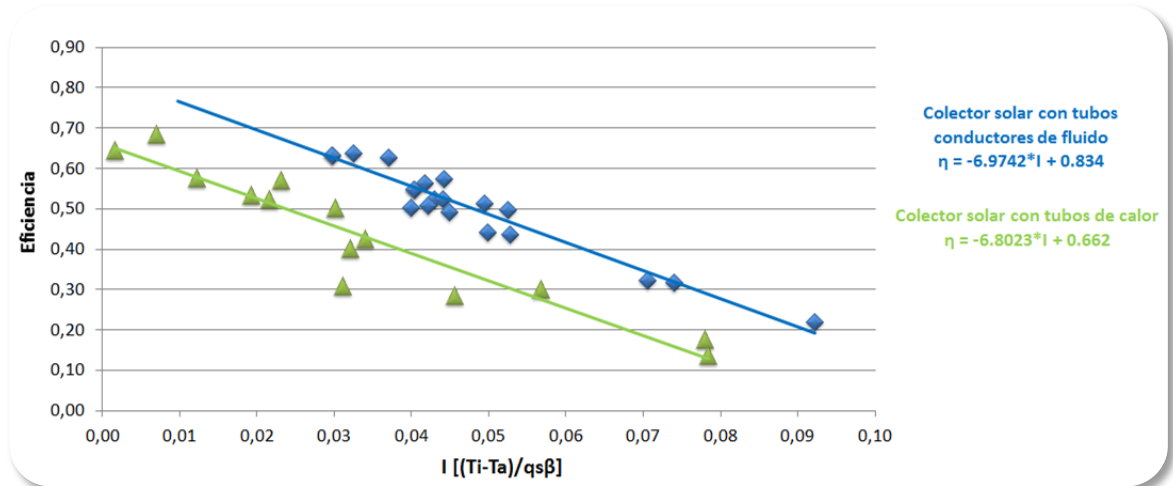
Figura 96: Eficiencia del colector solar de tubos al vacío con tubos de calor (Superficie en acero inoxidable y Flujo másico de 0.062 Kg/s).



Fuente: Autores.

Tomando como referencia el colector solar con tubos conductores de fluido y una superficie en acero inoxidable es posible desarrollar una comparación con implementación de tubos de calor y la misma superficie reflectora.

Figura 97: Comparativo eficiencia de colector con tubo conductor de fluido y tubos de calor (Superficie en acero inoxidable).



Fuente: Autores.

Como se presenta anteriormente es posible determinar que el sistema diseñado he implementado tubos conductores de fluido presenta mayor eficiencia que el sistema implementando tubos de calor. En este caso se puede atribuir esta situación a un aumento de la temperatura de la superficie absortiva para que el tubo de calor funcione de forma adecuada aumentando considerablemente las pérdidas de calor por radiación.

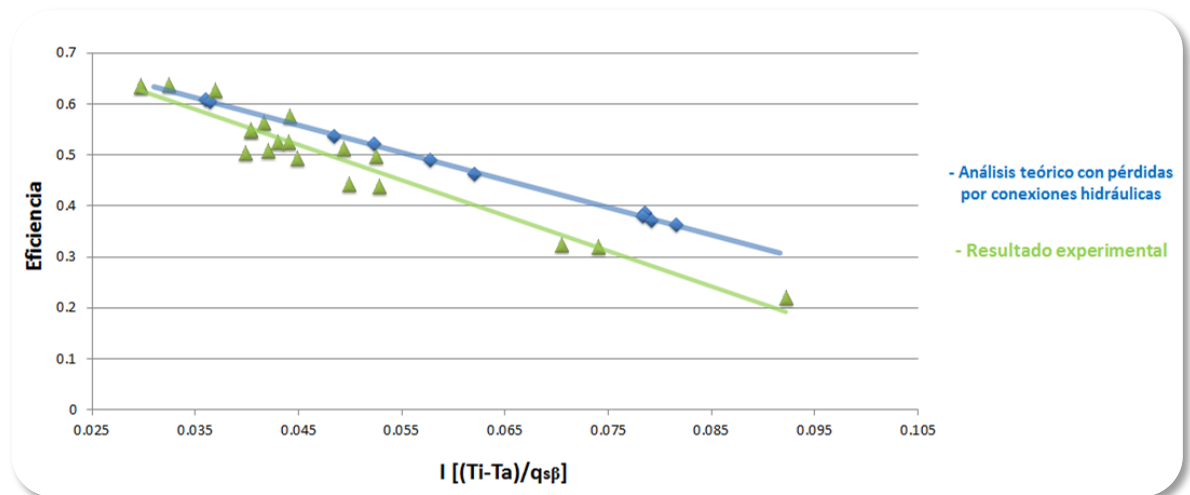
7.4 EVALUACIÓN DEL MODELO TEÓRICO RESPECTO AL ANÁLISIS EXPERIMENTAL

Contemplando el funcionamiento del colector solar bajo las pruebas de desempeño implementadas es importante desarrollar una comparación del

sistema experimental respecto al modelo teórico desarrollado (Ver sección 7.2) con el objetivo de validar el modelo.

7.4.1 Validación del modelo de colector solar de tubos al vacío con tubos conductores de fluido: Tomando como referencia los datos correspondientes al colector solar de tubos al vacío implementando tubos conductores de fluido con flujo másico de 0.04 kg/s y una superficie reflectora en acero inoxidable, se procede a comparar el sistema con el modelo teórico teniendo en cuenta las mismas condiciones de operación tales como los datos de radiación, temperatura ambiente, reflectividad de la superficie, temperatura inicial del tanque y la geométrica específica del colector solar (Ver sección 6.1).

Figura 98: Eficiencia del colector solar de tubos al vacío con tubos conductores de fluido (Resultado experimental Vs Modelo teórico)



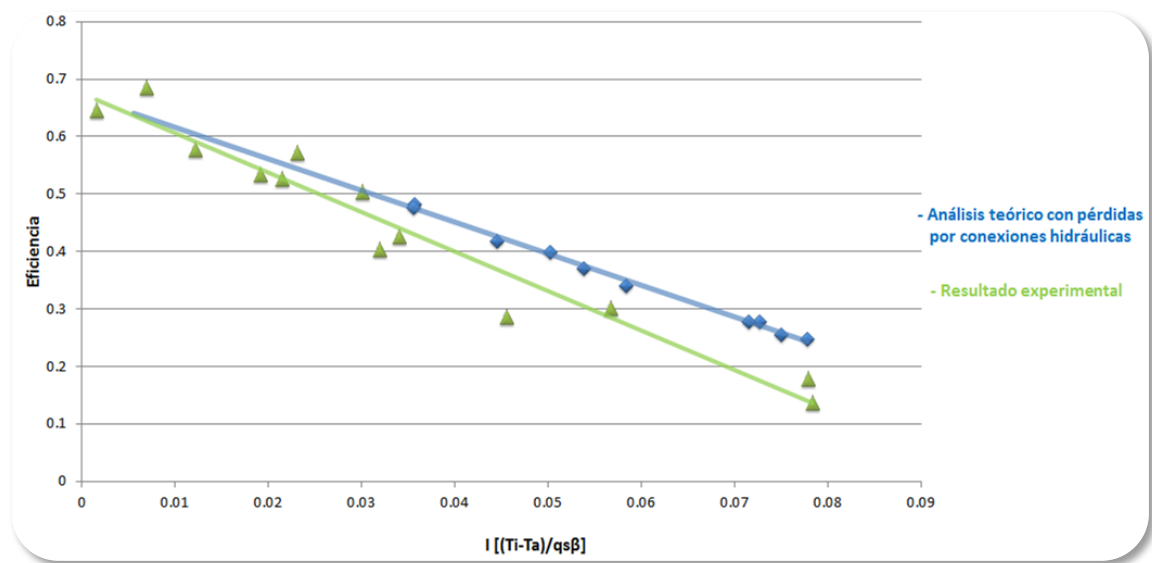
Fuente: Autores.

Para este caso se puede observar como la eficiencia del sistema bajo condiciones experimentales presenta una eficiencia inferior respecto al modelo teórico desarrollado, esto se debe principalmente a la dificultad para poder establecer con certeza las características de cada uno de los elementos del colector solar y los diversos factores que pudieron haber afectado la toma de datos en el desarrollo de

las pruebas de desempeño. Sin embargo, es de destacar que el modelo teórico describe de forma adecuada el sistema.

7.4.2 Validación del modelo de colector solar de tubos al vacío con tubos de calor: Tomando como referencia los datos correspondientes al colector solar de tubos al vacío implementando tubos de calor bajo las pruebas experimentales con flujo másico de 0.062 kg/s y una superficie reflectora en acero inoxidable, se procede a comparar el sistema con el modelo teórico teniendo en cuenta las mismas condiciones de operación tales como los datos de radiación, temperatura ambiente, reflectividad de la superficie, temperatura inicial del tanque y la geométrica específica del colector solar (Ver sección 6.1).

Figura 99: Eficiencia del colector solar de tubos al vacío con tubos de calor (Resultado experimental Vs Modelo teórico)



Fuente: Autores.

Teniendo como referencia la figura 99 es posible establecer una relación adecuada entre el análisis experimental y el modelo teórico desarrollado. Sin embargo al igual que en el caso del colector solar de tubos al vacío con tubos

conductores de fluido se presenta una diferencia en la eficiencia lo cual se debe principalmente a la dificultad de conocer con certeza cada una de las variables del sistema, además se puede atribuir esa diferencia a la dispersión de los datos experimentales, relacionados con la toma de datos.

CONCLUSIONES.

- Se construyó un banco para el desarrollo de pruebas sobre colectores solares utilizando tubos al vacío con tubos conductores de fluido (CTE-TCF) y tubos de calor (CTE-TC) con facilidades de medición, transporte y posicionamiento de la superficie captadora.
- Se implementó un sistema de adquisición de datos para el monitoreo y control del colector solar de tubos de vacío mediante el software labVIEW (Entorno gráfico de programación) y hardware de control Field Point (Sistema de adquisición de datos y control de National Instruments) permitiendo evaluar cada una de las variables requeridas para la caracterización del sistema.
- Se obtuvieron los siguientes valores absolutos de la eficiencia de los colectores bajo diferentes condiciones de funcionamiento en términos de irradiancia, el flujo de agua, tipo de superficie y la diferencia entre la temperatura del agua respecto a la temperatura ambiente ($T_i - T_a$):

RESULTADOS DE PRUEBAS DE DESEMPEÑO DEL COLECTOR SOLAR DE TUBOS AL VACÍO.

$q_{s\beta}=1000 \text{ W/m}^2$			
Flujo másico (kg/s)	Tipo de colector	Eficiencia (η)	
		$(T_i - T_a) = 15$ [°C]	$(T_i - T_a) = 50$ [°C]
0.040	CTE-TCF Sup. Acero inoxidable	0.73	0.49
	CTE-TCF Sup. Blanca	0.87	0.56
	CTE-TCF Sup. Negra	0.83	0.5
0.020	CTE-TCF Sup. Acero inoxidable	0.66	0.41
0.062	CTE-TC Sup. Acero inoxidable	0.56	0.32

- Se observó que los colectores solares presentan un desempeño relativo caracterizado por:
 - a. El colector solar de tubos al vacío con tubos conductores de fluido presenta una eficiencia superior del orden de 17% respecto al colector solar de tubos al vacío con tubos de calor.
 - b. El aumento del flujo volumétrico en el colector solar de tubos de vacío con tubos conductores de fluido produce un incremento en la eficiencia del sistema, la cual no es ilimitada, debido a que el incremento de la energía captada no compensa el incremento de energía del sistema de transporte del fluido.
 - c. Las características emisivas de la superficie reflectora ubicada bajo los tubos de vacío permite aumentar la irradiancia incidente sobre estos. En este caso la superficie pintada de blanco ($\rho=0.68$) presenta el mejor comportamiento en comparación a la superficie pintada de negro ($\rho=0.62$) o la superficie en acero inoxidable ($\rho=0.572$).
 - d. La implementación de colectores solares de tubos de vacío presentan una ventaja significativa respecto a los sistemas convencionales, ya que permiten disminuir considerablemente las pérdidas de calor por convección, además de establecer mejores condiciones para la captación de la radiación directa y difusa.
- El desarrollo del modelo teórico del colector solar de tubos al vacío en Matlab (Software matemático) establece una herramienta que permite simular adecuadamente las variables que no son tan fáciles de observar en el sistema físico tales como el flujo másico, la emisividad de la superficie captadora,

conductividad de los materiales aislante y la relación entre la transmisividad y absorptividad del tubo de vacío.

RESULTADOS DEL ANÁLISIS TEÓRICO DEL COLECTOR SOLAR DE TUBOS AL VACÍO.

$q_s\beta=1000 \text{ W/m}^2$			
Flujo másico (kg/s)	Tipo de colector	Eficiencia (η)	
		(T_i-T_a)=15 [°C]	(T_i-T_a)=50 [°C]
0.040	CTE-TCF Sup. Acero inoxidable	0.72	0.53
0.062	CTE-TC Sup. Acero inoxidable	0.59	0.39

RESULTADOS DEL ANÁLISIS TEÓRICO DEL COLECTOR SOLAR DE TUBOS AL VACÍO CON VARIACIÓN DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN.

$q_s\beta=1000 \text{ W/m}^2$						
	Condiciones				Eficiencia (η)	
	Flujo másico	Emisividad	Relación $\tau\alpha$	Conductividad de tanque	(T_i-T_a)=15 [°C]	(T_i-T_a)=50 [°C]
Colector solar con tubos conductores de fluido	0.04	0.1	0.85	0.03	0.7191295	0.531365
	0.04	0.15	0.85	0.03	0.693764	0.49628
	0.04	0.3	0.85	0.03	0.626496	0.40272
	0.04	0.1	0.76	0.03	0.640654	0.45388
	0.04	0.1	0.68	0.03	0.562135	0.37625
	0.04	0.1	0.85	0.12	0.7011565	0.467255
	0.04	0.1	0.85	0.18	0.6937275	0.439925
	0.02	0.1	0.85	0.03	0.686188	0.51116

- Mediante el análisis teórico se pudo establecer la razón de los comportamientos relativos de los distintos colectores así:
 - a. La mayor eficiencia del colector CTE-TCF frente a los CTE-TC es debido a la reducción de las resistencias térmicas asociadas a la transferencia de calor desde la superficie absorbente hasta el fluido calo-portador.

- b. La eficiencia del colector solar puede verse afectado en gran medida por la selección adecuada de los elementos que le constituyen. Presenta un efecto perjudicial la implementación de elementos que aumenten la pérdida de calor desde el fluido calor-transportador al ambiente a causa de las conexiones hidráulicas, el tanque de almacenamiento o la selección inadecuada de la superficie protectora y absorbente (Relación $\tau\alpha$).

 - c. El modelo teórico desarrollado representa de forma adecuada el comportamiento experimental, permitiendo a esta herramienta ser una base fundamental en el diseño de estos sistemas para su aplicación industrial.
- El desarrollo e implementación de tubos de calor, permitió establecer un referente en cuanto al diseño e implementación de estos elementos no solo en su desempeño en colectores solares de tubos al vacío sino como una alternativa adecuada para procesos de transferencia de calor.

 - El mejor escenario para el desarrollo de pruebas de desempeño en colectores solares es establecer la eficiencia del sistema mediante análisis global ya que la implementación de análisis instantáneo presenta fuentes de error asociadas a la inercia térmica de los componentes del sistema, la variación de las condiciones climáticas (Irradiancia) y la variación en los tiempo de respuesta de los elementos de medición.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda desarrollar un análisis del colector solar de tubos al vacío con tubos de calor implementando otros fluidos de trabajo o estructuras capilares.
- Se recomienda desarrollar un análisis del colector solar de tubos al vacío mediante flujo natural o inducido en contacto directo con la superficie captadora.
- Se recomienda desarrollar un análisis de la influencia de la separación de los tubos de vacío respecto a su eje en la eficiencia del colector solar.

BIBLIOGRAFÍA

- REAY, David y KEW, Peter. Heat Pipes: Theory, Design and applications 5 ed. Oxford: Elsevier, 2006. 365p.[1]
- CADENA, Carlos; PLACO, Cora y SARAVIDA, Luis. Colectores solares para agua caliente. En: Inenco Conicet UNSa. s.l.: s.n, s.f. 17p.[2]
- MAHJOURI, Fariborz; STITELER, Robert y WALKER, Andy. Evacuate-tube heat pipe solar collector applied to the recirculation loop in federal building. En: Solar Conference (11-14, Julio: Portland, Oregon). Memorias. Portland: 2004.[3]
- MAHJOURI, F. Vacuum Tube Liquid-Vapor (Heat-Pipe) Collectors [online]. [Citado 12 Sept., 2011]. Disponible en internet: <http://www.thermomax.com/Downloads/Vacuum%20Tube%20Paper.pdf>. 6 p. [5]
- KALOGIROU, Soteris. The potential of solar industrial process heat applications. En: Applied Energy 76, 2003, 337–361.[6]
- CHAE, Hee Sook, et al. Transverse permeability measurement of a circular braided preform in liquid composite molding. En: Korea-Australia Rheology Journal 19, 2007, 17-25.[7]
- LUNDE, Peter J. Solar thermal engineering, space heating and hot water systems. New York: John Willey & sons, 1980. 603p.[8]
- INSTITUTO DE HODROLOGIA, METEOROLOGIA Y ESTUDIOS AMBIENTALES Y UNIDAD DE PLANEACION MINERO ENERGETICA. Atlas de radiación solar en Colombia. Bogotá: Casa editorial de Colombia, 2005. 175p.[9]
- HOSSAINB, M.S , et al. Review on solar water heater collector and thermal energy performance of circulating pipe. EN: Renewable and Sustainable Energy Reviews 15, 2011, 3801– 3812.[10]

ANEXOS

**ANEXO A: RESISTENCIAS TÉRMICAS PARA ANÁLISIS DE TRANSFERENCIA
DE CALOR EN TUBOS DE CALOR.**

Term	Defining relation	Thermal resistance	Comment
1	$\dot{Q}_i = \alpha_e A_e \Delta T_1$	$R_1 = \frac{1}{\alpha_e A_e}$	
2	Plane geometry $\dot{q}_e = \frac{k \Delta T_2}{t}$	$R_2 = \frac{\Delta T_2}{A_e \dot{q}_e}$	For thin-walled cylinders $r_2 \ln \frac{r_2}{r_1} = t$
	Cylindrical geometry $\dot{q}_e = \frac{k \Delta T_2}{r_2 \ln \frac{r_2}{r_1}}$		
3	Equation 2.91 or 2.92	$R_3 = \frac{d}{k_w A_e}$	Correct for liquid metals. Gives upper limit for nonmetallics
4	$\dot{q}_e = \frac{L^2 P_v \Delta T_4}{(2\pi RT)^{0.5} RT^2}$	$R_4 = \frac{(2\pi RT)^{0.5} RT^2 L^2 P_v \Delta T_4}{L^2 P_v A_e}$	Can usually be neglected
5	$\Delta T_5 = \frac{RT^2 \Delta P_v}{L P_v}$	$R_5 = \frac{RT^2 \Delta P_v}{\dot{Q} L P_v}$	Can usually be neglected ΔP_v from Section 2.3.5
6	$\dot{q}_e = \frac{L^2 P_v \Delta T_6}{(2\pi RT)^{0.5} RT^2}$	$R_6 = \frac{(2\pi RT)^{0.5} RT^2 L^2 P_v \Delta T_6}{L^2 P_v A_e}$	Can usually be neglected
7	Equation 2.91 or 2.92	$R_7 = \frac{d}{k_w A_e}$	If excess working fluid is present, an allowance should be made for the additional resistance
8	Plane geometry $\dot{q}_e = \frac{k \Delta T_8}{t}$	$R_8 = \frac{\Delta T_8}{A_e \dot{q}_e}$	For thin-walled cylinders $r_2 \ln \frac{r_2}{r_1} = t$
	Cylindrical geometry $\dot{q}_e = \frac{k \Delta T_8}{r_2 \ln \frac{r_2}{r_1}}$	$R_8 = \frac{\Delta T_8}{A_e \dot{q}_e}$	

(Continue d)

Term	Defining relation	Thermal resistance	Comment
9	$\dot{Q}_i = \alpha_c A_c \Delta T_1$ $\dot{Q}_s = \frac{\Delta T_s}{\left(\frac{l_e + l_a + l_c}{A_w k_w + A_{wall} k} \right)}$	$R_9 = \frac{1}{\alpha_c A_c}$ $R_s = \frac{l_e + l_a + l_c}{A_w k_w + A_{wall} k}$	Axial heat flow by conduction

Notes:

$$R_x = \text{Thermal Resistance} = \frac{\text{Temperature difference}}{\text{Heat flow}} = \left(\frac{\Delta T}{\dot{Q}} \right)_x$$

Total heat flow = $\dot{Q}_i = Q + \dot{Q}_s$, \dot{Q} , \dot{Q}_i and \dot{Q}_s are defined in Fig. 2.21

$$\text{Heat flux} = \dot{q} = \frac{\dot{Q}}{A}$$

ΔT_x and R_x are defined in Fig. 2.21

Other symbols:

- \dot{q}_e, \dot{q}_c heat flux through the evaporator and condenser walls
- k thermal conductivity of the heat pipe wall
- t heat pipe wall thickness
- r_1, r_2 inner and outer radii of cylindrical heat pipe
- d wick thickness
- k_w effective wick thermal conductivity
- P_v vapour pressure
- L latent heat
- R gas constant for vapour
- T absolute temperature
- ΔP_v total vapour pressure drop in the heat pipe
- A_w cross-sectional area of wick
- A_{wall} cross-sectional area of wall

Fuente: Heat Pipes: Theory, Design and applications [1].

**ANEXO B: DATOS DE HORA, RADIACIÓN DIRECTA, RADIACIÓN DIFUSA Y
TEMPERATURA AMBIENTE REGISTRADOS EN EL LABORATORIO DE
SISTEMAS TÉRMICOS DE LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
(SABADO 11 DE FEBRERO DE 2012).**

Hora	Radiación total [W/m²]	Radiación difusa [W/m²]	Temperatura ambiente [°C]
10:19:00	781.67	183.64	25.7
10:20:00	753.19	175.98	25.7
10:21:00	771.21	176.75	25.7
10:22:00	799.95	180.06	25.7
10:23:00	791.80	181.52	25.7
10:24:00	503.07	138.14	25.7
10:25:00	600.91	153.20	25.7
10:26:00	776.20	178.23	25.7
10:27:00	796.21	186.16	25.7
10:28:00	557.20	152.93	25.7
10:29:00	440.50	148.74	25.7
10:30:00	606.48	184.00	25.7
10:31:00	592.96	188.88	25.7
10:32:00	886.83	232.25	25.7
10:33:00	886.57	222.42	25.7
10:34:00	752.46	184.92	25.7
10:35:00	628.21	150.78	25.7
10:36:00	766.23	161.17	25.7
10:37:00	773.20	160.07	25.7
10:38:00	788.02	164.27	26
10:39:00	785.54	164.97	26
10:40:00	790.85	164.69	26
10:41:00	807.87	163.81	26
10:42:00	814.18	161.21	26
10:43:00	828.03	161.52	26
10:44:00	845.72	162.72	26
10:45:00	857.60	162.48	26
10:46:00	857.98	161.50	26
10:47:00	862.49	162.53	26
10:48:00	866.83	164.19	26.1
10:49:00	871.67	166.80	26.1
10:50:00	881.34	170.36	26.1
10:51:00	889.24	175.14	26.1
10:52:00	885.21	173.27	26.1
10:53:00	872.06	168.17	26.1
10:54:00	872.32	169.91	26.1
10:55:00	875.35	171.39	26.1
10:56:00	876.11	173.11	26.1

Hora	Radiación total [W/m²]	Radiación difusa [W/m²]	Temperatura ambiente [°C]
10:57:00	874.14	172.54	26.1
10:58:00	868.63	171.02	26.1
10:59:00	865.26	173.96	25.9
11:00:00	868.02	175.36	25.9
11:01:00	881.67	179.79	25.9
11:02:00	894.35	185.43	25.9
11:03:00	892.07	187.56	25.9
11:04:00	887.96	190.97	25.9
11:05:00	881.88	191.43	25.9
11:06:00	394.86	119.56	25.9
11:07:00	243.90	104.56	25.9
11:08:00	347.77	124.06	26.1
11:09:00	603.38	166.14	26.1
11:10:00	900.18	206.09	26.1
11:11:00	693.32	169.67	26.1
11:12:00	838.98	197.20	26.1
11:13:00	884.19	203.23	26.1
11:14:00	891.94	206.28	26.1
11:15:00	910.46	223.55	26.1
11:16:00	955.38	248.66	26.1
11:17:00	982.97	261.47	26.1
11:18:00	999.79	263.95	26.3
11:19:00	1017.02	270.34	26.3
11:20:00	1023.25	276.15	26.3
11:21:00	1032.83	280.91	26.3
11:22:00	1045.15	281.08	26.3
11:23:00	1044.43	274.81	26.3
11:24:00	1031.38	256.43	26.3
11:25:00	1016.57	239.28	26.3
11:26:00	1011.75	234.12	26.3
11:27:00	1029.26	244.71	26.3
11:28:00	1021.67	245.06	26.5
11:29:00	754.46	197.19	26.5
11:30:00	995.80	235.03	26.5
11:31:00	766.76	208.88	26.5
11:32:00	437.91	180.55	26.5
11:33:00	468.25	196.02	26.5
11:34:00	385.10	195.72	26.5

Hora	Radiación total [W/m²]	Radiación difusa [W/m²]	Temperatura ambiente [°C]
11:35:00	524.92	222.56	26.5
11:36:00	608.28	229.98	26.5
11:37:00	413.29	193.04	26.5
11:38:00	294.46	165.38	26.595
11:39:00	238.32	139.68	26.6
11:40:00	204.23	122.56	26.6
11:41:00	189.51	119.06	26.6
11:42:00	183.18	119.14	26.6
11:43:00	192.02	122.65	26.6
11:44:00	210.09	134.42	26.6
11:45:00	219.78	136.87	26.6
11:46:00	223.23	132.72	26.6
11:47:00	305.36	141.12	26.6
11:48:00	282.75	142.81	26.1
11:49:00	231.95	133.30	26.1
11:50:00	209.68	121.98	26.1
11:51:00	196.08	120.66	26.1
11:52:00	196.20	117.11	26.1
11:53:00	184.22	109.86	26.1
11:54:00	182.19	113.55	26.1
11:55:00	196.58	122.09	26.1
11:56:00	240.45	141.34	26.1
11:57:00	318.60	157.33	26.07
11:58:00	541.49	192.95	25.5
11:59:00	711.64	212.85	25.5
12:00:00	669.24	194.22	25.5
12:01:00	342.86	134.24	25.5
12:02:00	562.60	166.57	25.5
12:03:00	951.13	225.45	25.5
12:04:00	795.58	210.03	25.5
12:05:00	281.65	127.25	25.5
12:06:00	193.74	111.77	25.5
12:07:00	199.39	110.20	25.5
12:08:00	220.82	116.58	25.6
12:09:00	227.47	127.51	25.6
12:10:00	234.03	136.69	25.6
12:11:00	240.91	144.87	25.6
12:12:00	241.75	152.77	25.6

Hora	Radiación total [W/m²]	Radiación difusa [W/m²]	Temperatura ambiente [°C]
12:13:00	250.47	148.73	25.6
12:14:00	287.27	149.06	25.6
12:15:00	809.58	233.09	25.6
12:16:00	1058.44	267.47	25.6
12:17:00	688.49	204.69	25.6
12:18:00	590.47	189.85	25.695
12:19:00	325.05	153.67	25.7
12:20:00	639.33	205.46	25.7
12:21:00	953.94	238.91	25.7
12:22:00	441.09	148.42	25.7
12:23:00	865.04	222.45	25.7
12:24:00	1014.08	252.36	25.7
12:25:00	1021.88	260.80	25.7
12:26:00	1017.52	269.75	25.7
12:27:00	453.17	174.66	25.7
12:28:00	195.81	121.82	25.795
12:29:00	173.77	108.19	25.8
12:30:00	163.79	96.65	25.8
12:31:00	165.25	87.84	25.8
12:32:00	159.29	84.19	25.8
12:33:00	153.22	90.30	25.8
12:34:00	144.59	86.49	25.8
12:35:00	149.84	88.91	25.8
12:36:00	157.16	92.09	25.8
12:37:00	156.23	88.43	25.8
12:38:00	172.00	95.69	25.8
12:39:00	226.78	115.19	25.8
12:40:00	371.62	138.97	25.8
12:41:00	982.33	242.05	25.8
12:42:00	962.82	243.52	25.8
12:43:00	307.75	133.38	25.8
12:44:00	215.54	111.60	25.8
12:45:00	216.81	109.49	25.8
12:46:00	273.45	119.45	25.8
12:47:00	224.41	104.59	25.8
12:48:00	467.76	130.70	25.705
12:49:00	185.10	85.00	25.7
12:50:00	169.66	87.34	25.7

Hora	Radiación total [W/m²]	Radiación difusa [W/m²]	Temperatura ambiente [°C]
12:51:00	173.19	90.07	25.7
12:52:00	163.26	86.87	25.7
12:53:00	160.59	91.22	25.7
12:54:00	173.76	98.61	25.7
12:55:00	241.91	119.98	25.7
12:56:00	865.66	226.19	25.7
12:57:00	1061.60	277.01	25.7
12:58:00	1064.78	292.48	25.7
12:59:00	1062.18	296.50	25.7
13:00:00	1048.57	289.24	25.7
13:01:00	1039.38	270.38	25.7
13:02:00	1027.16	245.14	25.7
13:03:00	1007.06	225.71	25.7
13:04:00	975.11	214.34	25.7
13:05:00	955.91	209.37	25.7
13:06:00	949.14	208.47	25.7
13:07:00	957.86	213.72	25.7
13:08:00	976.43	223.04	26.08
13:09:00	606.29	167.89	26.1
13:10:00	268.36	129.50	26.1
13:11:00	263.58	141.61	26.1
13:12:00	232.06	139.47	26.1
13:13:00	222.42	127.80	26.1
13:14:00	196.66	103.75	26.1
13:15:00	172.87	91.31	26.1
13:16:00	164.11	89.30	26.1
13:17:00	160.05	90.78	26.1
13:18:00	175.76	99.70	26.385
13:19:00	217.00	113.24	26.4
13:20:00	321.40	126.99	26.4
13:21:00	814.26	206.35	26.4
13:22:00	456.13	135.53	26.4
13:23:00	327.93	102.74	26.4
13:24:00	135.61	64.23	26.4
13:25:00	110.92	56.38	26.4
13:26:00	99.59	51.67	26.4
13:27:00	99.85	55.11	26.375
13:28:00	125.72	68.29	25.9

Hora	Radiación total [W/m²]	Radiación difusa [W/m²]	Temperatura ambiente [°C]
13:29:00	321.01	117.46	25.9
13:30:00	734.02	203.30	25.9
13:31:00	234.26	139.76	25.9
13:32:00	610.28	206.94	25.9
13:33:00	1009.15	279.68	25.9
13:34:00	1029.96	293.36	25.9
13:35:00	1019.58	297.15	25.9
13:36:00	1005.59	298.04	25.9
13:37:00	987.80	276.58	25.9
13:38:00	961.14	250.62	25.995
13:39:00	926.88	224.41	26
13:40:00	900.80	207.57	26
13:41:00	882.26	202.46	26
13:42:00	715.49	181.75	26
13:43:00	258.45	131.35	26
13:44:00	820.37	256.10	26
13:45:00	939.77	277.79	26
13:46:00	918.23	264.15	26
13:47:00	884.20	242.38	26
13:48:00	403.44	139.35	26.475
13:49:00	163.65	86.13	26.5
13:50:00	136.43	72.46	26.5
13:51:00	138.38	71.40	26.5
13:52:00	141.46	77.15	26.5
13:53:00	166.66	83.43	26.5
13:54:00	815.08	204.61	26.5
13:55:00	503.16	153.15	26.5
13:56:00	299.81	129.10	26.5
13:57:00	208.42	125.17	26.5
13:58:00	596.12	204.37	26.69
13:59:00	718.13	219.29	26.7
14:00:00	250.92	122.73	26.7
14:01:00	730.44	218.79	26.7
14:02:00	910.56	260.54	26.7
14:03:00	481.53	182.49	26.7
14:04:00	229.40	135.15	26.7
14:05:00	226.62	117.49	26.7
14:06:00	206.53	113.25	26.7

Hora	Radiación total [W/m²]	Radiación difusa [W/m²]	Temperatura ambiente [°C]
14:07:00	511.47	179.14	26.7
14:08:00	909.36	270.17	26.415
14:09:00	623.44	220.99	26.4
14:10:00	303.78	158.35	26.4
14:11:00	236.50	138.48	26.4
14:12:00	211.34	129.62	26.4
14:13:00	223.29	131.13	26.4
14:14:00	737.70	218.35	26.4
14:15:00	854.02	231.69	26.4
14:16:00	806.20	231.78	26.4
14:17:00	648.56	206.19	26.4
14:18:00	427.10	157.90	26.4
14:19:00	262.02	124.36	26.4
14:20:00	213.75	115.54	26.4
14:21:00	339.12	139.16	26.4
14:22:00	852.28	253.08	26.4
14:23:00	880.72	254.82	26.4
14:24:00	864.76	234.19	26.4
14:25:00	851.71	231.29	26.4
14:26:00	848.28	235.61	26.4
14:27:00	828.33	222.24	26.4
14:28:00	853.77	223.74	26.49
14:29:00	818.45	218.99	26.5
14:30:00	764.89	213.25	26.5
14:31:00	716.77	218.94	26.5
14:32:00	841.78	256.08	26.5
14:33:00	856.66	244.06	26.5
14:34:00	827.01	225.49	26.5
14:35:00	806.64	218.88	26.5
14:36:00	794.78	210.21	26.5
14:37:00	788.71	204.30	26.5
14:38:00	801.00	212.94	26.69
14:39:00	801.11	219.59	26.7
14:40:00	622.65	194.98	26.7
14:41:00	743.09	220.79	26.7
14:42:00	796.33	225.25	26.7
14:43:00	792.06	219.40	26.7
14:44:00	742.34	214.03	26.7

Hora	Radiación total [W/m²]	Radiación difusa [W/m²]	Temperatura ambiente [°C]
14:45:00	802.62	237.35	26.7
14:46:00	805.63	249.37	26.7
14:47:00	485.06	190.61	26.7
14:48:00	340.91	161.80	26.8
14:49:00	593.19	191.10	26.8
14:50:00	218.14	122.44	26.8
14:51:00	173.28	109.61	26.8
14:52:00	163.49	100.43	26.8
14:53:00	175.00	92.19	26.8
14:54:00	689.65	195.72	26.8
14:55:00	551.82	171.33	26.8
14:56:00	182.70	102.78	26.8
14:57:00	213.05	101.44	26.8
14:58:00	379.72	134.52	26.705
14:59:00	168.57	113.14	26.7
15:00:00	171.85	115.54	26.7
15:01:00	486.12	177.56	26.7
15:02:00	731.32	208.44	26.7
15:03:00	717.27	205.87	26.7
15:04:00	362.73	126.36	26.7
15:05:00	149.73	86.34	26.7
15:06:00	135.59	83.22	26.7
15:07:00	356.86	120.17	26.7
15:08:00	655.52	176.64	26.225
15:09:00	671.80	185.19	26.2
15:10:00	651.03	184.91	26.2
15:11:00	632.56	174.08	26.2
15:12:00	593.56	158.43	26.2
15:13:00	574.60	150.51	26.2
15:14:00	523.38	139.74	26.2
15:15:00	467.81	128.80	26.2
15:16:00	591.22	152.96	26.2
15:17:00	600.96	159.82	26.2
15:18:00	590.90	160.73	26.01
15:19:00	579.91	150.82	26
15:20:00	573.44	154.12	26
15:21:00	574.14	169.16	26
15:22:00	589.73	172.27	26

Hora	Radiación total [W/m²]	Radiación difusa [W/m²]	Temperatura ambiente [°C]
15:23:00	604.45	161.24	26
15:24:00	583.92	156.28	26
15:25:00	564.41	155.05	26
15:26:00	552.95	147.64	26
15:27:00	551.35	145.60	26
15:28:00	554.07	151.59	26.1
15:29:00	521.46	139.81	26.1
15:30:00	539.51	138.51	26.1
15:31:00	546.81	145.41	26.1
15:32:00	536.14	145.21	26.1
15:33:00	532.33	145.58	26.1
15:34:00	493.79	138.21	26.1
15:35:00	545.64	148.98	26.1
15:36:00	554.91	158.08	26.1
15:37:00	449.44	139.78	26.1
15:38:00	151.65	81.29	26.29
15:39:00	147.08	83.13	26.3

ANEXO C: GUÍA DE PRACTICA DE LABORATORIO DE SISTEMAS TÉRMICOS

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTA DE FÍSICO - MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
LABORATORIO DE SISTEMAS TÉRMICOS I

PRACTICA:
COLECTOR SOLAR DE TUBOS DE VACÍO

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- Analizar la eficiencia de un colector solar de tubos de vacío con tubos conductores de fluido.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Establecer la curva de η (eficiencia $\frac{Q_u}{Q_{in}}$ ¹) Vs I (Factor potencial de pérdida por unidad de calor incidente $\frac{T_i - T_{amb}}{q_{sB}}$ ²) para el colector solar de tubos al vacío.
- Estudiar la influencia del caudal en el comportamiento del colector.
- Determinar la irradiancia³ sobre una superficie cilíndrica.
- Analizar la función de cada uno de los elementos dispuestos en el colector solar de tubos al vacío.
- Evaluar el comportamiento de la temperatura del tanque en el tiempo.

INTRODUCCION

En pleno siglo XXI el creciente desarrollo económico al que apunta los estándares en Latino América y el mundo provoca un aumento en la demanda energética, emisión de gases contaminantes a la atmosfera que contribuyen al calentamiento global y la destrucción de capa de ozono y por lo tanto un mayor interés en el estudio de energía utilizando recursos renovables y amigables con el medioambiente, haciendo de esta labor una de las áreas de mayor estudio ingenieril.

¹ Relación entre el calor útil y calor incidente.

² Relación entre el diferencial de temperatura (Temperatura de entrada del colector T_i y temperatura ambiente T_{amb}) y la irradiancia.

³ Magnitud utilizada para describir la potencia incidente por unidad de superficie de la radiación electromagnética solar

La energía solar se ha convertido en emblema de las energías renovables y ha conseguido un gran progreso debido a: mejoras de la tecnología, reducción de costos, aumento de la eficiencia y manejo de temperaturas más altas de operación, avances y consecuencias principalmente del apoyo e interés de las administraciones de diferentes países en pro de encontrar la sostenibilidad energética.

TEMAS DE CONSULTA

- Colector solar de tubos de vacío (Flujo directo, flujo natural y tubos de calor).
- Criterios para la evaluación de la eficiencia en colectores solares (colector de placa plana, concentración y tubos de vacío).
- Relaciones geométricas para la determinación de la inclinación de los rayos solares respecto a una superficie.
- Energías alternativas.
- Métodos para la medición y estimación de la irradiancia.

IMPLEMENTOS

- Field-point
- Piranómetros para la medición de radiación total y radiación difusa
- Computador⁴.
- Banco de colector solar de tubos de vacío con tubo conductor de fluido.

PROCEDIMIENTO

1. Ubicación del colector solar de tubos al vacío:
 - Se procede a la ubicación del colector solar de tubos al vacío en un lugar despejado en donde los rayos solares no encuentre obstrucción alguna a lo largo del día.
 - Es necesario desarrollar la inclinación de la superficie absortiva en función del ángulo de declinación declinación (Dirección norte o sur en función de la fecha del año).
 - Se procede a conectar el colector solar a una fuente de alimentación.
 - Se ubican los piranómetros para la medición de radiación total y difusa.

⁴ Se debe contar con el software Labview y el programa para almacenamiento de los datos del colector solar.

2. Encendido del colector solar

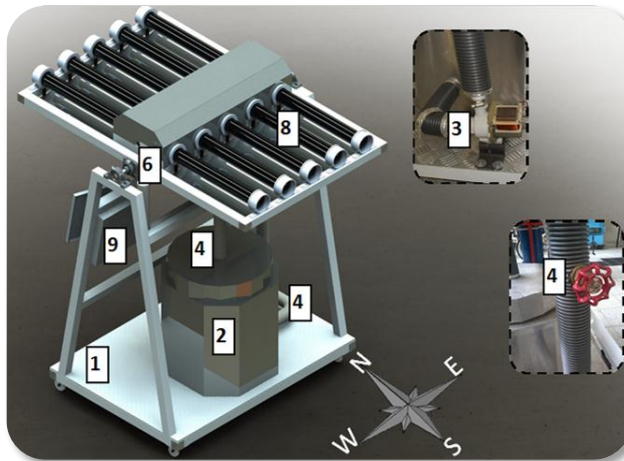
- Se energiza el Field-point oprimiendo el switch S1.
- Se energiza la bomba y el ventilador oprimiendo el switch S2.
- Se regular el caudal para la prueba mediante la válvula V1 y se procede a realizar su medición.
- Se conecta el computador al Field point (Modulo de adquisición de datos FP-1000 o FP-1601 y modulo FP-TC-120) para medición de radiación y temperatura (ver anexo).
- Se pone en funcionamiento el programa desarrollado en la plataforma de Labview introduciendo los datos requeridos (ver anexo) para el registro de la toma de datos:
 - ✓ Radiación total.
 - ✓ Radiación difusa.
 - ✓ Temperatura salida tanque.
 - ✓ Temperatura entrada del tanque.
 - ✓ Irradiancia.

3. Se procede a desarrollar la prueba por un tiempo aproximado de 5 horas.

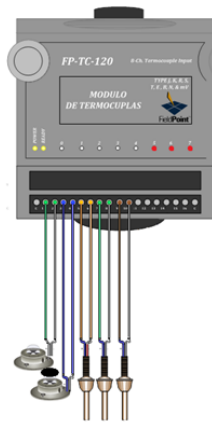
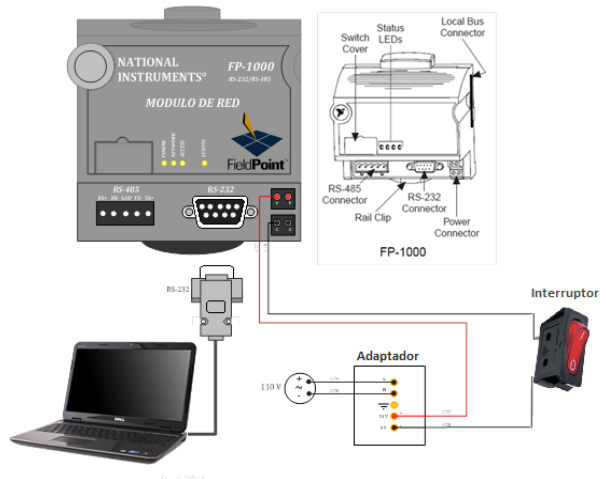
ESQUEMA

- Diagrama general del colector solar de tubos al vacío:

- | | |
|---|---|
| 1. Marco inferior. | 6. Plataforma superior para soportar sistema captador de energía. |
| 2. Tanque de almacenamiento. | 7. Placa para regular el ángulo. |
| 3. Bomba de circulación de fluido. | 8. Tubos de vacío. |
| 4. Ductos de entrada y salida. | 9. Caja para control y monitoreo. |
| 5. Válvula para regular el caudal (V1). | |



➤ Diagramas de conexión de módulos Field point FP-1600 y FP-TC-120



Canal	Número de terminal		
	IN (+)	IN (-)	
0	1	2	P1
1	3	4	P2
2	5	6	T1
3	7	8	T2
4	9	10	T3
5	11	12	--
6	13	14	--
7	15	16	---

P1: Piranometro radiación total
P2: Piranometro radiación difusa
T1: Temperatura entrada colector
T2: Temperatura salida colector
T3: Temperatura ambiente

MARCO TEÓRICO

DETERMINACIÓN DE LA INCLINACIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR θ RESPECTO A UNA SUPERFICIE.

En el estudio de la geometría de un plano no perpendicular a la radiación solar es necesario determinar la radiación total en función a un plano equivalente que permita facilitar el análisis. Este procedimiento depende de muchos parámetros entre ellos:

- Factores dependientes del movimiento de la tierra: Dentro del estudio de la radiación solar sobre una superficie terrestre los factores que afectan en mayor proporción la radiación incidentes sobre una superficie son:

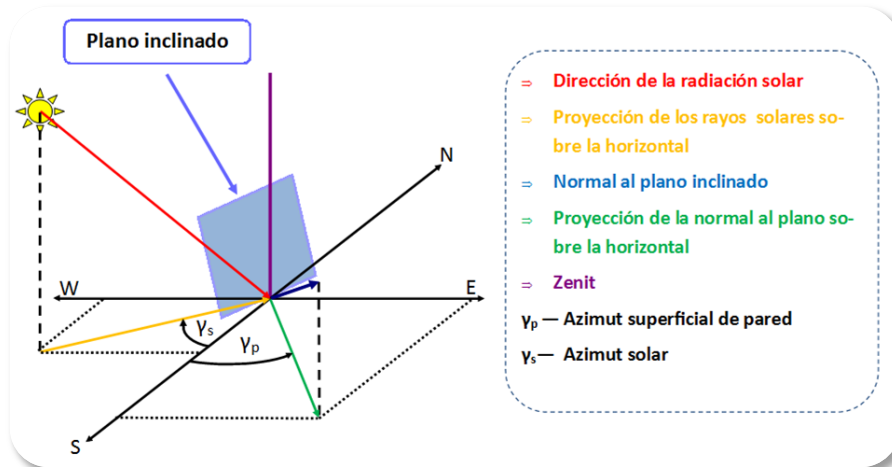
- ✓ Angulo de declinación δ (Relacionado con la translación de la tierra): En este caso se relaciona al ángulo de declinación con la inclinación del eje de rotación de la tierra, el cual determina la inclinación de los rayos solares respecto a una superficie vertical con sus caras de frente a los polos.

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

Donde n representa el día del año (Con n=1 el 1ro de Enero).

- ✓ Angulo de inclinación horaria [ω]: Este ángulo depende de la rotación terrestre y mide el desplazamiento angular del sol respecto al mediodía. Cada hora es igual a 15° de longitud, tomando un valor positivo (+) por las mañanas y negativos (-) por las tardes.
- Factores dependientes de la ubicación sobre tierra: La ubicación y orientación de un plano, cambia en todo la superficie terrestre. Además si el plano presenta una inclinación respecto a la horizontal y su normal no apunta al sur, las variaciones del área efectiva para el estudio de la radiación deben ser consideradas. De esta forma, los factores que afectan la radiación solar sobre una superficie en función de su ubicación son:
 - ✓ Latitud terrestre (φ): Es el ángulo entre el plano de la línea ecuatorial y punto P ubicado sobre la superficie terrestre medido a lo largo del meridiano del lugar.
 - ✓ Angulo de inclinación superficial (β): es el ángulo formado entre una superficie y la horizontal del lugar

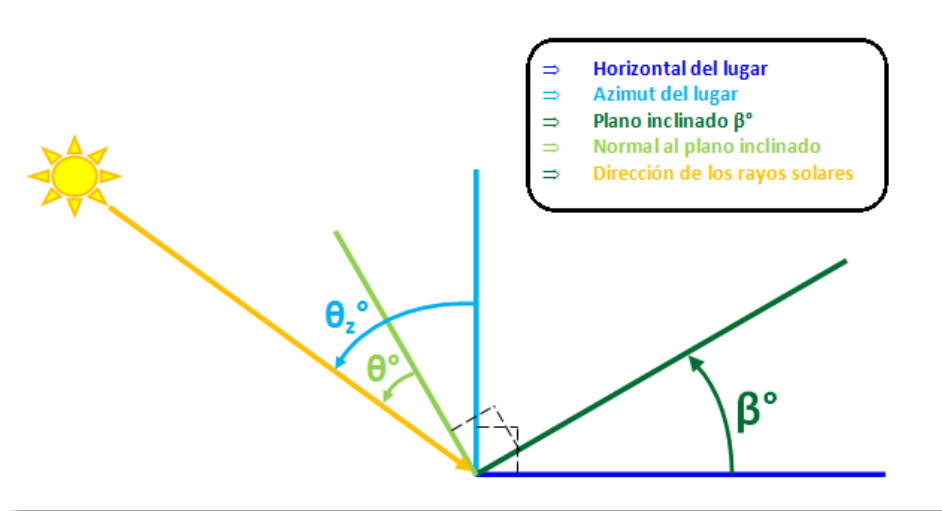
- ✓ Azimut superficial de la pared (γ_p): es el ángulo formado entre la línea norte-sur y una proyección sobre la horizontal de la normal de la pared es negativo hacia el este y positivo hacia el oeste.
- ✓ Azimut solar (γ_s): es el ángulo formado entre la línea norte-sur y una proyección sobre la horizontal de la dirección de la radiación solar, es negativo hacia el este y positivo hacia el oeste.



CALCULO DE INCLINACIÓN DE RADIACIÓN SOLAR θ PARA DIFERENTES SUPERFICIES.

La inclinación de la radiación solar (θ) es el ángulo formado entre la normal del plano y la dirección de la radiación, se puede determinar para tres tipos de planos diferentes

- Superficies horizontales ($\beta = 0$)
- Superficie inclinada mirando al sur ($\beta \neq 0 \rightarrow \gamma_p = 0$)
- Superficie inclinada indiferentemente ($\beta \neq 0 \rightarrow \gamma_p \neq 0$)



Superficies horizontales: para una superficie horizontal se puede demostrar que la inclinación de la radiación solar es independiente del azimut de pared γ_p y la inclinación de la radiación solar, de esta forma el ángulo θ para una superficie horizontal es igual al ángulo de inclinación de la radiación cenital del lugar θ_z ($\theta_z = f(\delta, \omega, \varphi)$).

$$\cos \theta_z = \sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos \omega$$

Superficies inclinadas mirando al sur: para una superficie inclinada un ángulo $\beta \neq 0$ y con un azimut de pared $\gamma_p = 0$, la inclinación de la radiación solar sobre la superficie se ve influenciada por la declinación, el ángulo horario, el ángulo de inclinación de la superficie y la latitud ($\theta = f(\delta, \omega, \varphi, \beta)$).

$$\cos \theta = \sin \delta \sin(\varphi - \beta) + \cos \delta \cos(\varphi - \beta) \cos \omega$$

Superficie inclinada indiferentemente: una superficie inclinada ($\beta \neq 0$) con azimut de pared diferente de cero ($\gamma_p \neq 0$) presenta un estudio más complejo pues la inclinación de los rayos solar tiene en cuenta todos los factores que afectan la radiación ($\theta = f(\delta, \omega, \varphi, \beta, \gamma_p, \gamma_s)$).

$$\cos \theta_z = \sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos \omega$$

$$\alpha_s = 90 - \theta_z$$

$$\cos \gamma_s = \frac{\cos \theta_z * \sin \varphi - \cos \delta}{\cos \theta_z * \sin \varphi}$$

$$\cos \theta = \cos(\gamma_s - \gamma_p) \cos \alpha_s \sin(\beta) + \sin \alpha_s \cos(\beta)$$

DETERMINACIÓN DE IRRADIANCIA $q_{S\beta}$ SOBRE SUPERFICIE:

Para el cálculo de la irradiancia sobre una superficie plana inclinada ($q_{S\beta}$) ubicada sobre la superficie terrestre se debe determinar la componente de la radiación directa, la radiación difusa y la radiación reflejada. De esta forma $q_{S\beta}$ se determina a partir de:

$$q_{S\beta} = H_b^5 * \frac{\cos(\theta)}{\cos(\theta_z)} + Hd^6 * \cos^2\left(\frac{\beta}{2}\right) + H^7 * \rho^8 * \text{sen}^2\left(\frac{\beta}{2}\right)$$

Teniendo en cuenta los métodos de medición y estimación de la radiación total, difusa y reflejada es posible determinar el calor útil sobre la superficie teniendo en cuenta los siguientes casos:

1. Medir la radiación total con un piranometro y medir la radiación directa con un pirheliómetro.
2. Medir la radiación total con un piranometro y medir la radiación difusa con un piranometro bloqueando la radiación directa.
3. Medir la radiación total, determinar la constante de claridad y estimar la radiación directa.
4. Medir la radiación total, determinar la constante de claridad y estimar la radiación difusa.
5. Estimar la constante de claridad, determinar la radiación total y determinar la radiación directa mediante ecuaciones.
6. Estimar la radiación directa en función de la ubicación del lugar, calcular la constante de claridad y calcular la radiación total.

EFICIENCIA EN LOS COLECTORES SOLARES

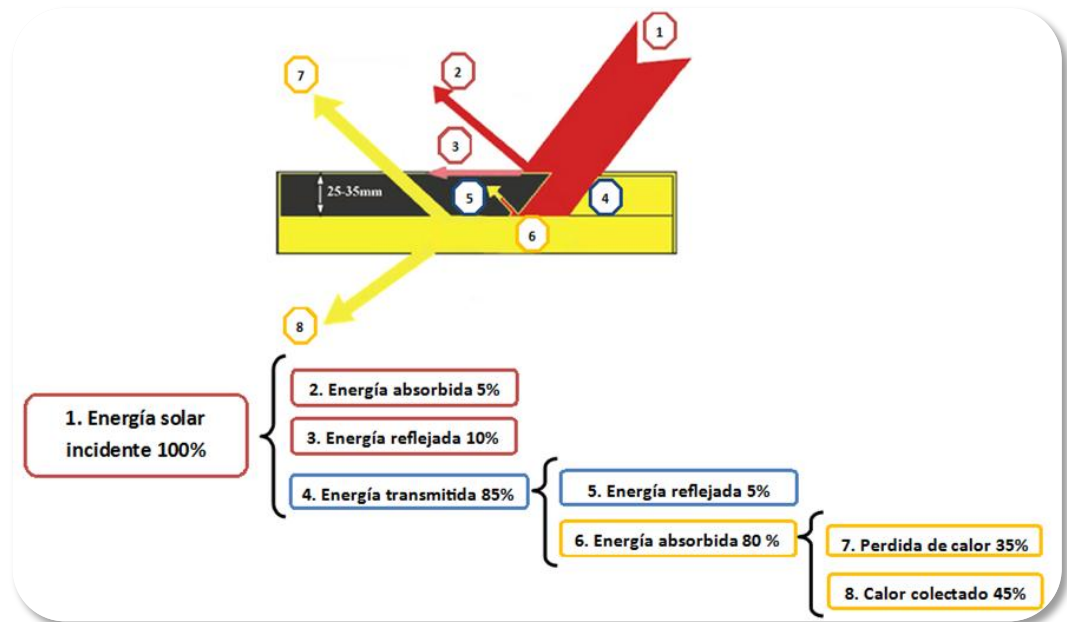
La eficiencia de un colector solar se define como la relación entre la ganancia de energía útil (Q_u) y la energía solar incidente (Q_i) sobre el colector en un determinado tiempo. De esta forma es importante definir como puede ser determinados cada uno de estos factores.

⁵ Radiación directa sobre una superficie horizontal

⁶ Radiación difusa sobre una superficie horizontal

⁷ Radiación total sobre una superficie horizontal ($H=H_b+H_d$)

⁸ Albedo de los alrededores a la superficie captadora (Generalmente =0.3)



Cierta cantidad de calor se incide sobre la superficie externa del colector, cuya cubierta formada por un vidrio o superficie protectora refleja, absorbe y transmite la energía incidente hacia la placa absorbente. Seguidamente, la placa absorbente también presenta la misma condición del vidrio, en donde se refleja y se absorbe el calor transmitido por el vidrio.

De esta forma se determina el calor incidente sobre el colector como:

$$Q_i = q_{s\beta} * A$$

Donde $q_{s\beta}$ representa la irradiancia ($\frac{W}{m^2}$) y A representa el área de la superficie captadora (m^2).

Sin embargo como fue ilustrado en la figura anterior, parte de este calor incidente sobre el colector se refleja a la atmosfera, el vidrio absorbe parte de este calor y el remanente es transmitido a la placa absorbidora. De esta forma el porcentaje de la irradiancia que es transmitida por la placa transparente y el porcentaje de irradiancia que es absorbida, se indica mediante el factor de conversión $\tau\alpha$, el cual representa el producto de la tasa de transmisión del vidrio y la absorción de la placa:

$$Q_{ia} = q_{s\beta} * \tau\alpha * A$$

Sin embargo a medida que el colector absorbe calor, la temperatura de la placa absorbidora aumenta más que en los alrededores, por lo tanto cierta cantidad de calor es transmitido a la

atmosfera por efectos de radiación y convección, para lo cual se define una tasa de calor perdido como:

$$Q_0 = U_L * A * (T_c - T_a)$$

Con U_L representando al coeficiente global de pérdida, T_c la temperatura media del colector y T_a la temperatura del ambiente.

De esta forma el calor útil extraído por el colector Q_u , es proporcional a la cantidad de calor absorbido por la placa menos la cantidad de calor perdido con los alrededores.

$$Q_u = Q_{ia} - Q_0 = q_{s\beta} * \tau\alpha * A - U_L * A(T_c - T_a)$$

Por otro lado se puede expresar este calor útil en función del fluido que retiene el calor o lo almacena.

$$Q_u = m * C_p * (T_o - T_i)$$

Teniendo T_o como la temperatura de salida del fluido, T_i la temperatura de entrada, m como el flujo másico y C_p el Calor específico del fluido a la temperatura media entre la entrada y la salida.

Sin embargo para determinar el calor se presenta cierta dificultad de establecer la temperatura media del colector, para lo cual se recurre a definir un factor que relaciona la energía útil en la superficie absorbente en función de la temperatura de entrada del fluido en el colector, este factor se conoce como el factor de remoción de calor.

$$F_r = \frac{(m * C_p * (T_o - T_i))}{A * (\tau\alpha - U_L * (T_i - T_a))}$$

Así, cuando todo el colector se encuentra a la temperatura de entrada del fluido se alcanza la máxima ganancia de calor, por lo tanto la energía útil del sistema puede ser determinada como:

$$Q_u = A_c * F_r * (q_{s\beta} * \tau\alpha - U_L(T_i - T_a))$$

De esta forma es posible definir la eficiencia del colector.

$$\eta = \frac{Q_u}{A * I} = A_c * F_r * \frac{q_{s\beta} * \tau\alpha - U_L(T_i - T_a)}{A * q_{s\beta}}$$

$$\eta = F_r * (\tau\alpha) - F_r * U_L * \frac{T_i - T_a}{q_{s\beta}}$$

$$\eta = F_r * (\tau\alpha) - F_r * U_L * I$$

I – Factor potencial de perdida por unidad de calor incidente

Sin embargo, es posible definir una correlación que establezca la eficiencia para cualquier tipo de colector.

$$\eta = a_0 * K_{\alpha\tau} - a_1 * \frac{\Delta T}{q_{s\beta}} - a_2 * \left(\frac{\Delta T^2}{q_{s\beta}} \right)$$

En este caso se define ΔT como $(T_i - T_a)$. De esta forma la ecuación presenta la misma forma que la ecuación determinada previamente, sin embargo se considera un tercer elemento a_2 el cual hace referencia a colectores solares con seguimiento solar. En este caso los factores a_0 y a_1 son función de las propiedades ópticas del colector y el factor de perdida de calor respectivamente.

TABLA DE DATOS

ENTRADAS AL PROGRAMA DE LABVIEW

Colector solar de tubos de vacío datos de entrada								
Caudal (L/s)	Inclinación	Latitud	Masa de agua en el tanque(Kg)	Reflectividad	Hora inicio	Día	Mes	Año

SALIDAS DEL PROGRAMA

El programas genera un matriz que registra datos cada tres segundo una vez está en funcionamiento, mostrando los siguientes datos.

- Radiación total.
- Radiación difusa.
- Irradiación total.
- Energía incidente total.
- Eficiencia global.
- Energía captada total.
- Temperatura de salida.
- Temperatura entrada.
- Temperatura ambiente.
- Eficiencia instantánea.

ANALISIS DE RESULTADO

Una vez registrados los datos es necesario desarrollar una análisis promedio de los mismo, los cuales se pueden desarrollar por periodos de tiempo de media (1/2) a una (1) hora. Para lo cual es necesario determinar.

Energía incidente cada hora	Energía captada cada hora	Eficiencia Horario	Temperatura promedio entrada	Temperatura promedio ambiente	delta horario	qs promedio	delta/qs

BIBLIOGRAFÍA

- ✓ KALOGIROU, Soteris. The potential of solar industrial process heat applications. En: Applied Energy 76, 2003, 337–361.
- ✓ LUNDE, Peter J. Solar thermal engineering, space heating and hot water systems. New York: John Willey & sons, 1980. 603p.
- ✓ INSTITUTO DE HODROLOGIA, METEOROLOGIA Y ESTUDIOS AMBIENTALES Y UNIDAD DE PLANEACION MINERO ENERGETICA. Atlas de radiación solar en Colombia. Bogotá: Casa editorial de Colombia, 2005. 175p.
- ✓ HOSSAINB, M.S , et al. Review on solar water heater collector and thermal energy performance of circulating pipe. EN: Renewable and Sustainable Energy Reviews 15, 2011, 3801– 3812.

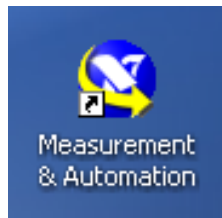
ANEXO

GUÍA DE FUNCIONAMIENTO DEL HARDWARE Y SOFTWARE DE MONITOREO Y CONTROL

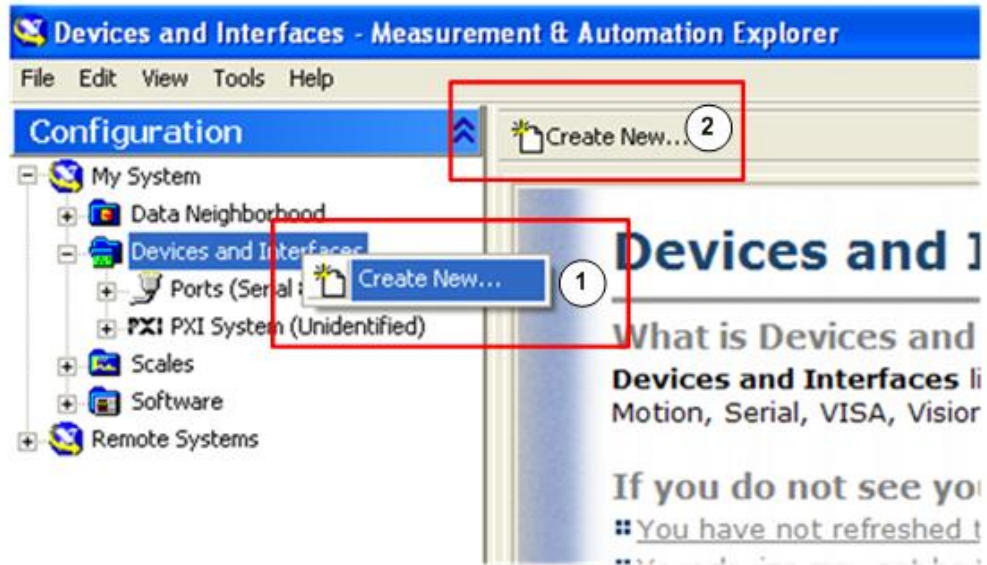
Lo primero que se debe hacer es revisar las conexiones de todos los equipos antes de energizar la caja de control, posteriormente se oprime el interruptor para el encendido del Field Point. Se procede a conectar el cable RS-232 al PC que permitirá la transmisión de los datos.

El programa de control y monitoreo implementado para la toma de datos del colector solar de tubos al vacío se desarrolló en el software Labview, sin embargo antes de correr este programa es necesario configurar el Field Point mediante el siguiente procedimiento:

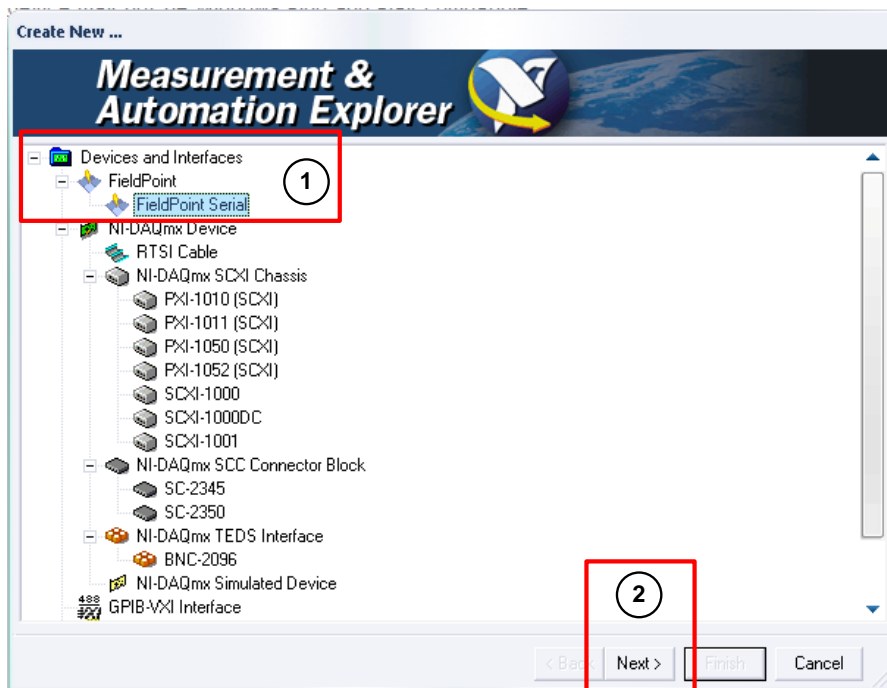
1. Abrir el Measurement & Automation, este es el software que permite configurar los diferentes dispuestos en el Field point. Para acceder a este programa se puede desde inicio-programa-National Instruments-MAX o simplemente desde el escritorio donde se encuentra el siguiente icono:



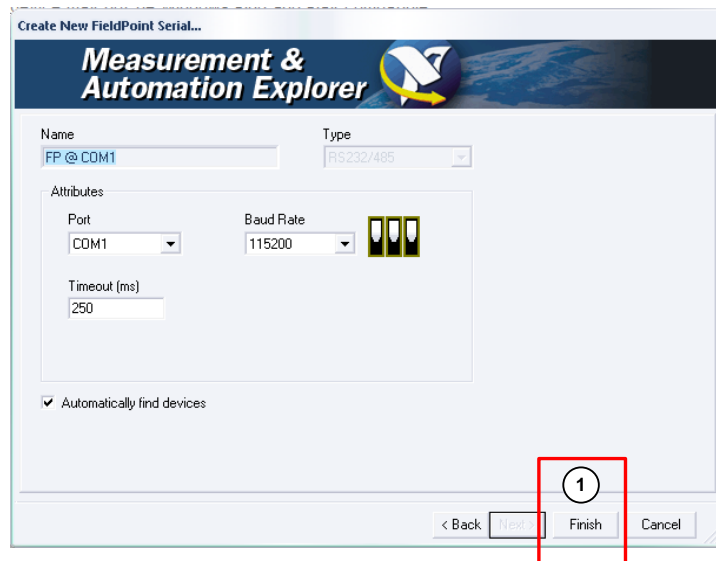
2. Posteriormente se abrirá una pantalla como la mostrada en la figura, que permitirá configurar el hardware Field Point, hay dos maneras de hacerlo: la primera es siguiendo la ruta **Configuración/My System/Devices and Interfaces** click derecho y seleccionar **crear uno nuevo** o simplemente seleccionar **Device and Interfaces** del menú de configuración y dar click a **Crear nuevo** que aparece en la parte derecha.



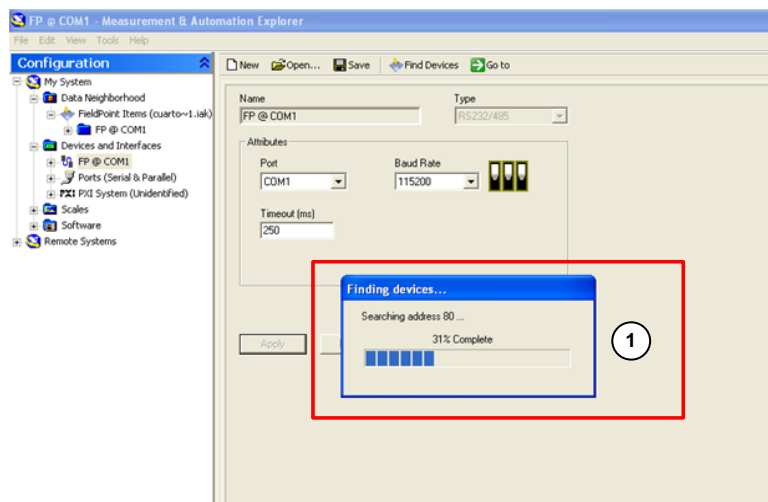
3. Al dar click en crear nuevo aparece la siguiente pantalla, se selecciona **Devices and Interfaces/FieldPoint/FieldPoint Serial** y se da click al botón **next**.



4. En la siguiente ventana donde sale el nombre del instrumento y el puerto donde lo va a leer se le da click en el botón **finish**.

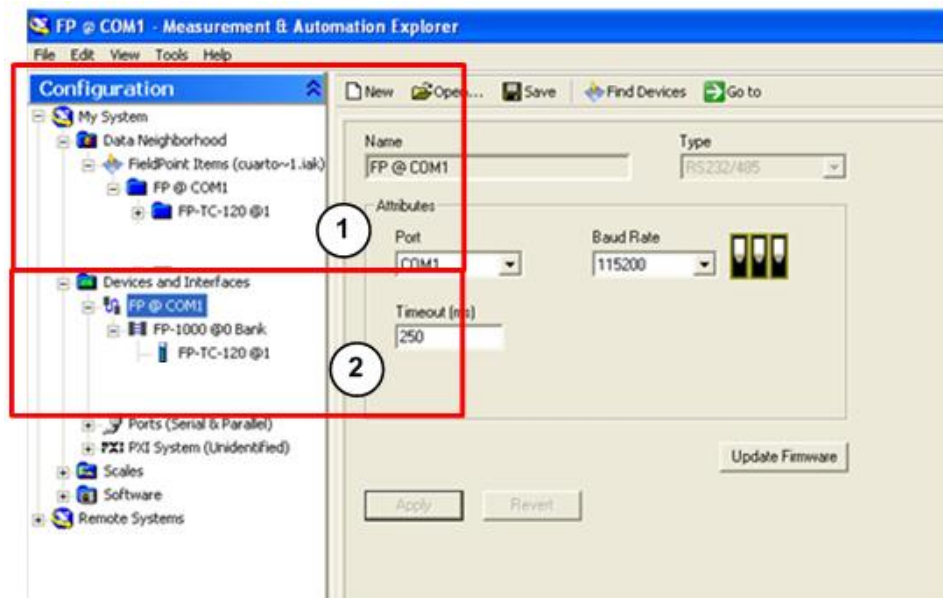


5. Automáticamente el software empieza a buscar y reconocer el modulo de FieldPoint mostrando en la pantalla el porcentaje completado de la búsqueda.

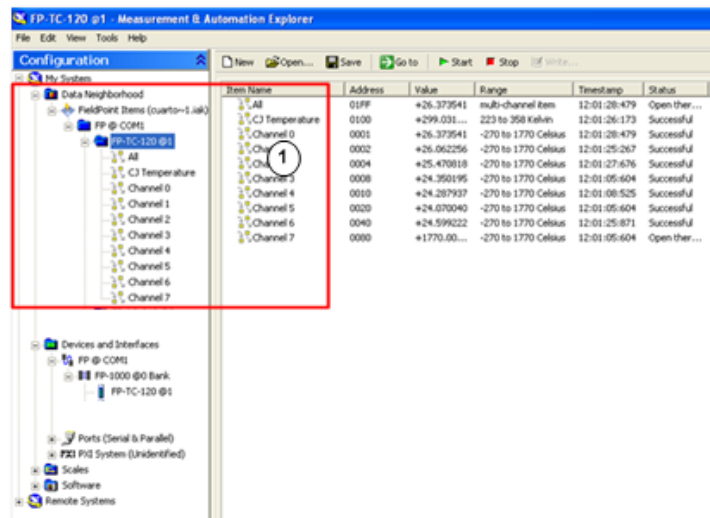


6. Cuando el porcentaje de búsqueda llega al 100% aparecen al lado derecho de la pantalla dos rutas:
 - a. **Configuration/ My System / Data Neighborhood /Fieldpoint Item / FP@COM1** donde aparecen todos los ítems de los módulos de FieldPoint conectados en ese momento por medio del cable RS-232 al PC.

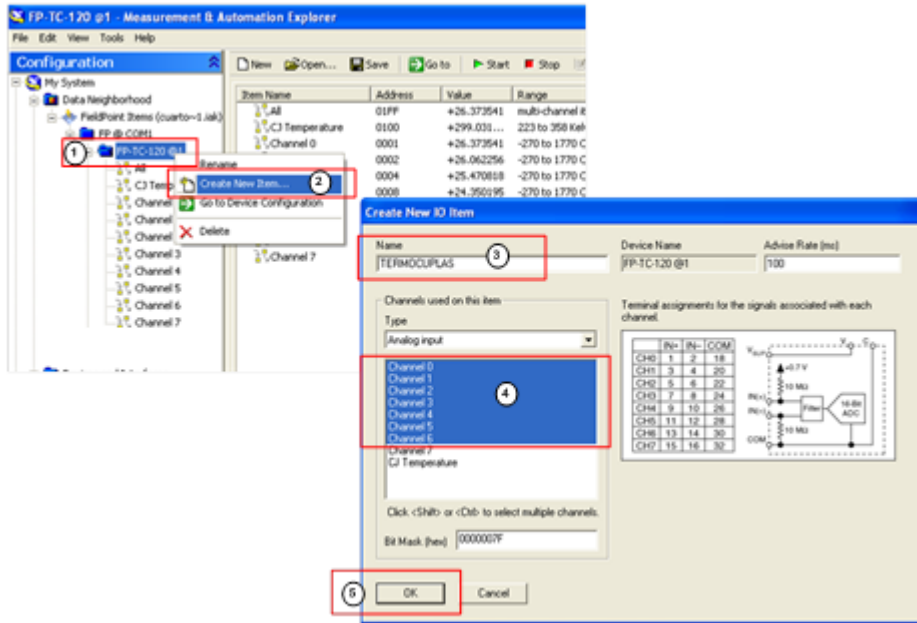
- b. **Configuration/ My System / Devices and Interfaces/ FP@COM** donde aparecen todos los módulos que conforman el FP@COM1.



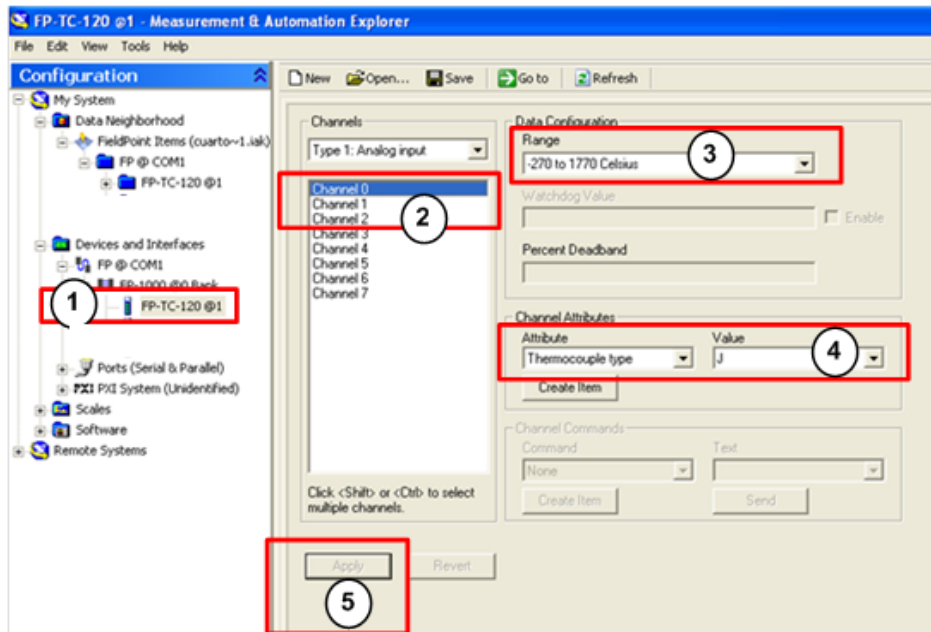
7. Por medio de la ruta (a) nombrada en el ítem anterior se puede reunir varios canales con un solo nombre para posteriormente cuando se requieran usar no se tenga que configurar uno por uno. Por ejemplo, al dar click en la carpeta FP-TC-120@1 se muestran todos los 8 canales que conforman ese modulo.



8. Para crear un nuevo ítem se da click derecho en la carpeta FP-TC-120@1 y en el menú desplegable se escoge crear nuevo ítem dando origen a una nueva pantalla en la parte superior se coloca el nombre del nuevo ítem y posteriormente se seleccionan los canales que van a conformar ese nuevo ítem manteniendo a la vez presionado el botón ctrl y dando click sobre el canal que se desee incluir en el nuevo ítem.



8. Para configurar los canales de los diferentes módulos se da click en el módulo y al lado derecho aparece una ventana donde se listan los canales que conforman el módulo, se selecciona el canal y se le cuadra las unidades y el rango de operación, en el caso del módulo de termocuplas el tipo de termocupla usada o las señales de voltaje que se desean registrar. Se da click en aplicar y los cambios quedan automáticamente hechos. Para este caso el canal 0 y el canal 1 se configuran como senales de voltaje de menos -0.025 a 0.025 Voltios y los canales 2, 3 y 4 como señales de termocuplas tipo K con temperatura en °C



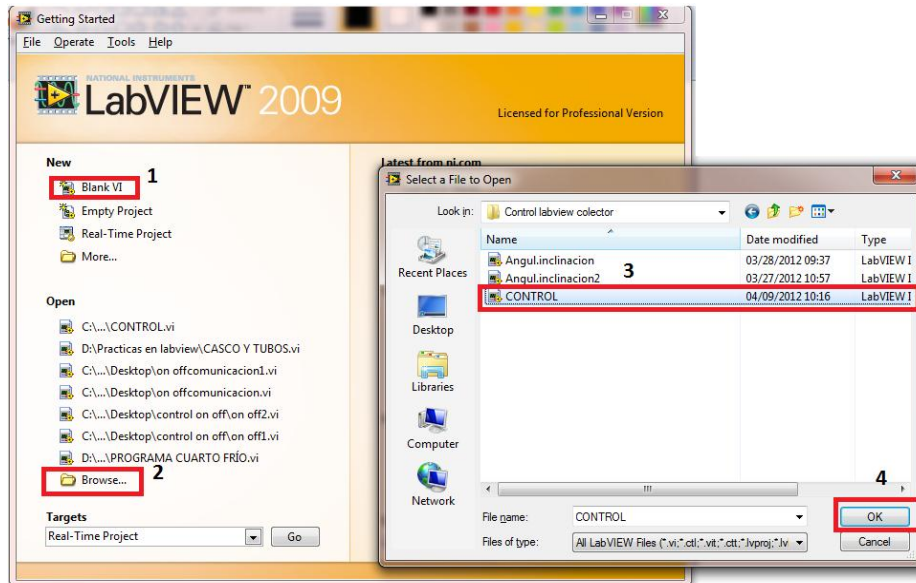
9. Para verificar que todos los canales de los módulos en uso estén sirviendo se le da click en el módulo que se quiere probar y en la pantalla derecha se le da click en el botón **Go to** donde sale una pantalla de todos los canales en servicio mostrando si están o no conectados y el rango de operación.

Una vez configurados cada uno de los canales requeridos del sistema, se da inicio al programa desarrollado en el software Labview, para lo cual es necesario desarrollar el siguiente procedimiento:

10. Se cierra el MAX y se realiza el mismo procedimiento descrito en el punto 1 pero ahora para abrir LabVIEW. Este es el software de entorno grafico de programación que permite realizar monitoreo, almacenamiento de datos y control. Para acceder a este programa se puede desde **inicio-programa-National Instruments-LabVIEW** o simplemente desde el escritorio donde se encuentra el siguiente icono:



11. Se ejecuta el programa y aparece una ventana como la que se muestra donde se puede buscar un archivo existente o simplemente crear uno nuevo. El programa realizado para este estudio se encuentra en el escritorio del PC del laboratorio Sistemas Termicos en una carpeta llamada **Control labVIEW colector** click en el archivo CONTROL.cx y final mente OK



12. Automáticamente el panel frontal del programa seleccionado en el ítem anterior abre. En este caso se presentan al usuario dos ventanas las cuales se relacionan con el entorno grafico presentado al usuario y la ventana de programación:

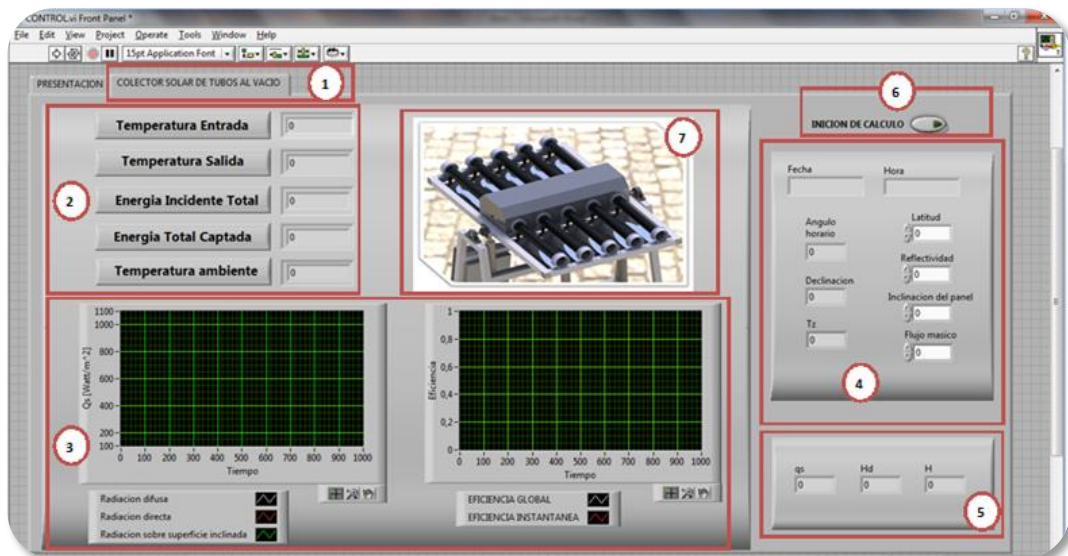
➤ **Ventana de usuario o panel frontal**

- ✓ Esta ventana del programa de monitoreo describe los elementos que se presentan al usuario del sistema de adquisición de datos, en este caso se ha subdividido la ventana en dos pestañas denominadas “Presentación” y “Colector solar de tubos al vacío”.
- ✓ La pestaña de presentación determina la información general acerca del proyecto de grado, se encuentra compuesta por las siguientes partes.
 1. Nombre de la pestaña ejecutada (Presentación).
 2. Logo de la universidad
 3. Logo de la escuela donde se realizó el proyecto de grado.



4. Nombre del proyecto de grado
 5. Autores del proyecto de grado.
 6. Director del proyecto de grado.
 7. Universidad, facultad, escuela, área, lugar y año en el que se realizó el proyecto de grado.
- ✓ Finalmente, dentro de la ventana de usuario o panel frontal se encuentra la pestaña “Colector solar de tubos al vacío” en la cual se relacionan las variables presentes en el colector solar, en ellas se pueden encontrar los siguientes elementos

Ventana “Colector solar de tubos al vacío”



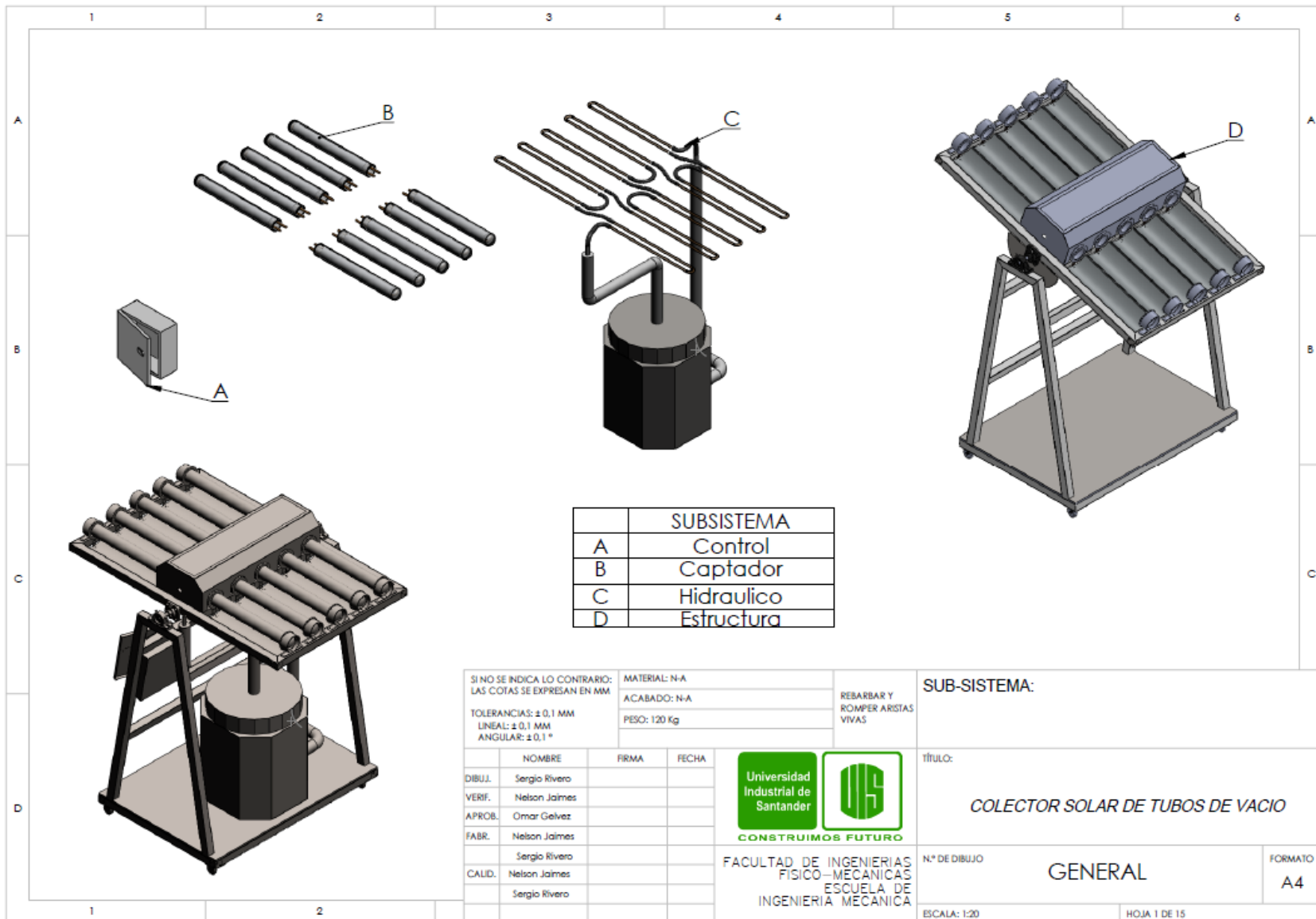
1. Nombre de la pestaña ejecutada (Colector solar de tubos al vacío).
2. Conjunto de indicadores numéricos encargados de suministrar al usuario los datos correspondientes a la temperatura de entrada y salida del colector, la energía total incidente, la energía total captada y por último un registro de la variación de la temperatura ambiente.
3. Gráficas del historial de datos: en este campo se presenta a la derecha la evolución de la energía incidente en el tiempo contemplando los valores de radiación total, radiación difusa y la radiación sobre el plano inclinado. Finalmente, a la izquierda se presenta la variación de la eficiencia global e instantánea presentes en el colector.
4. Controladores e indicadores solares: en este caso se presenta al usuario datos relevantes relacionados con la posición solar a lo largo del día. Además, se le permite el ingreso de datos tales como la latitud, la reflectividad promedio presente en los alrededores del colector, el ángulo de inclinación del panel respecto al plano horizontal y el flujo másico presente en el colector solar.
5. Indicadores de radiación solar: este campo presenta el valor numérico de la radiación total, radiación difusa y radiación sobre el plano inclinado presentes en el colector solar.
6. Botón de ejecución del programa: permite dar inicio al registro y almacenamiento de datos.
7. Figura que representa un esquema del colector solar de tubos de vacío.

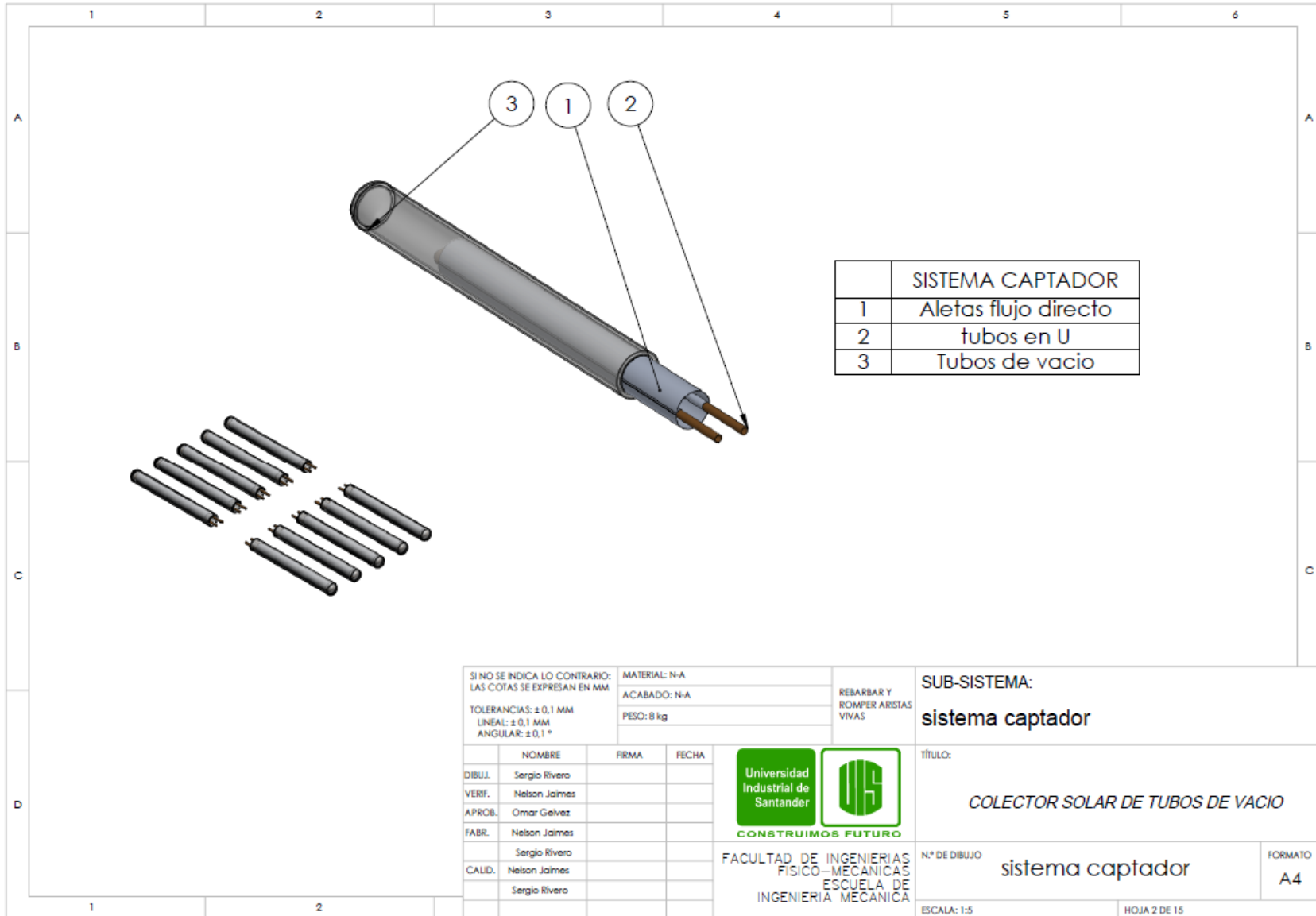
➤ **Ventana de programación o diagrama de bloques**

La ventana de programación o diagrama de bloques contiene las diversas interacciones entre las variables relacionadas con el desempeño del colector solar. Es de destacar que este tipo de programación se desarrolla de forma gráfica permitiendo facilidad en el manejo de las variables.

13. Posteriormente llenados estos datos se procede a verificar en el diagrama de bloques que los canales de donde se van a leer o enviar señales correspondan a los que se hallan configurado en el MAX.
14. Cumpliendo con los pasos anteriores se procede a ejecutar el programa para el desarrollo de las pruebas de desempeño.
15. Después de ejecutar el programa durante aproximadamente 5 horas se busca el archivo generado por el programa con el nombre y dirección establecida en el ítem 16.6 estos datos son importados a Excel para su posterior análisis.

ANEXO D: PLANOS DEL COLECTOR SOLAR DE TUBOS AL VACÍO.





SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM

TOLERANCIAS: ± 0,1 MM
LINEAL: ± 0,1 MM
ANGULAR: ± 0,1 °

MATERIAL: N/A
ACABADO: N/A
PESO: 8 kg

REBARBAR Y
ROMPER ARISTAS
VIVAS

SUB-SISTEMA:
sistema captador

	NOMBRE	FIRMA	FECHA
DIBUL.	Sergio Rivero		
VERIF.	Nelson Jaimes		
APROB.	Omar Gelvez		
FABR.	Nelson Jaimes		
	Sergio Rivero		
CALID.	Nelson Jaimes		
	Sergio Rivero		

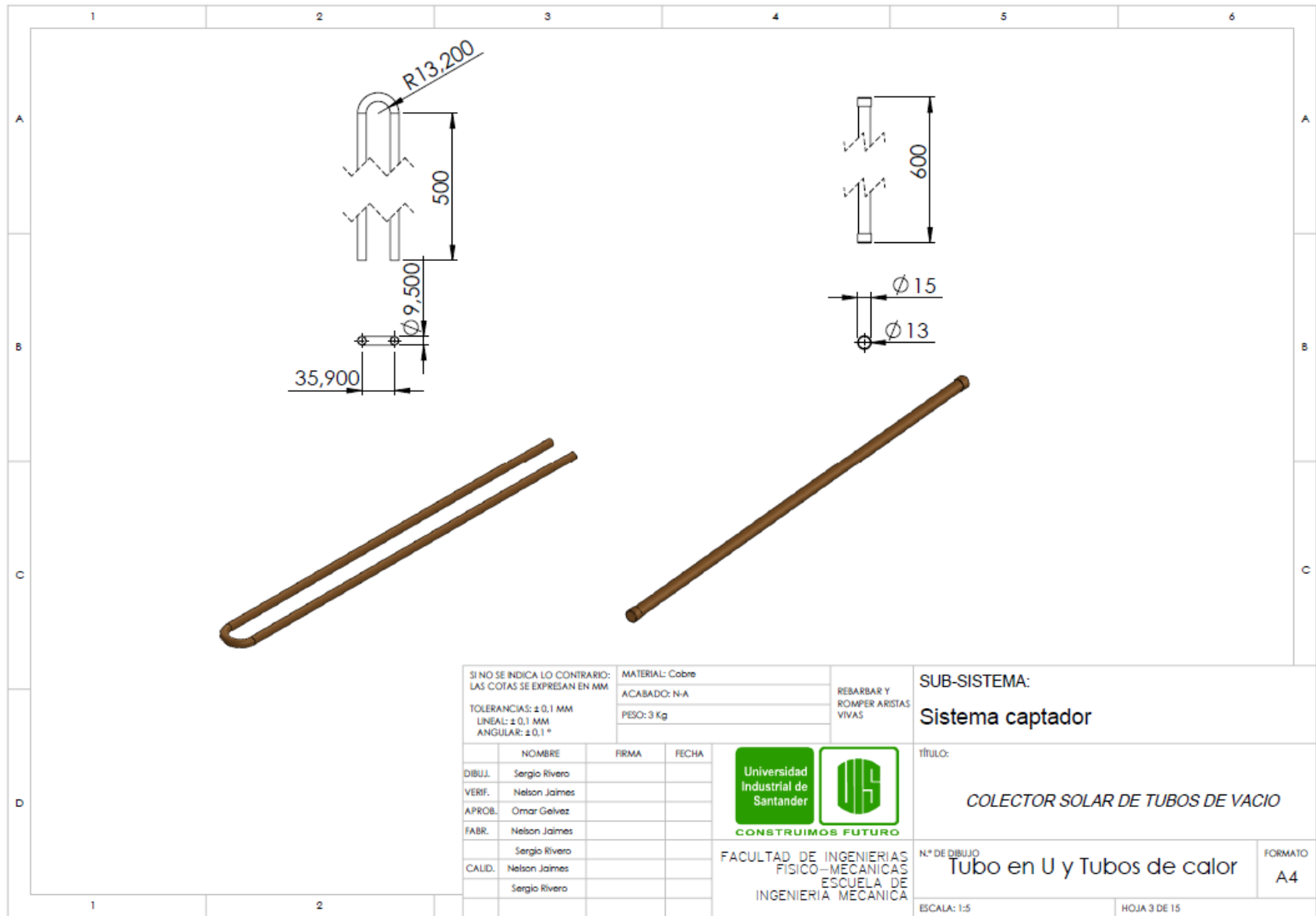


FACULTAD DE INGENIERIAS
FISICO-MECANICAS
ESCUELA DE
INGENIERIA MECANICA

TÍTULO:
COLECTOR SOLAR DE TUBOS DE VACIO

N.º DE DIBUJO **sistema captador** FORMATO **A4**

ESCALA: 1:5 HOJA 2 DE 15



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
 LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
 TOLERANCIAS: ± 0,1 MM
 LINEAL: ± 0,1 MM
 ANGULAR: ± 0,1 °

MATERIAL: Cobre
 ACABADO: N-A
 PESO: 3 Kg

REBARBAR Y
 ROMPER ARISTAS
 VIVAS

SUB-SISTEMA:
Sistema captador

	NOMBRE	FIRMA	FECHA
DIBUJ.	Sergio Rivero		
VERIF.	Nelson Jaimes		
APROB.	Omar Golvez		
FABR.	Nelson Jaimes		
CALID.	Sergio Rivero		
	Nelson Jaimes		
	Sergio Rivero		




CONSTRUIMOS FUTURO
 FACULTAD DE INGENIERIAS
 FISICO-MECANICAS
 ESCUELA DE
 INGENIERIA MECANICA

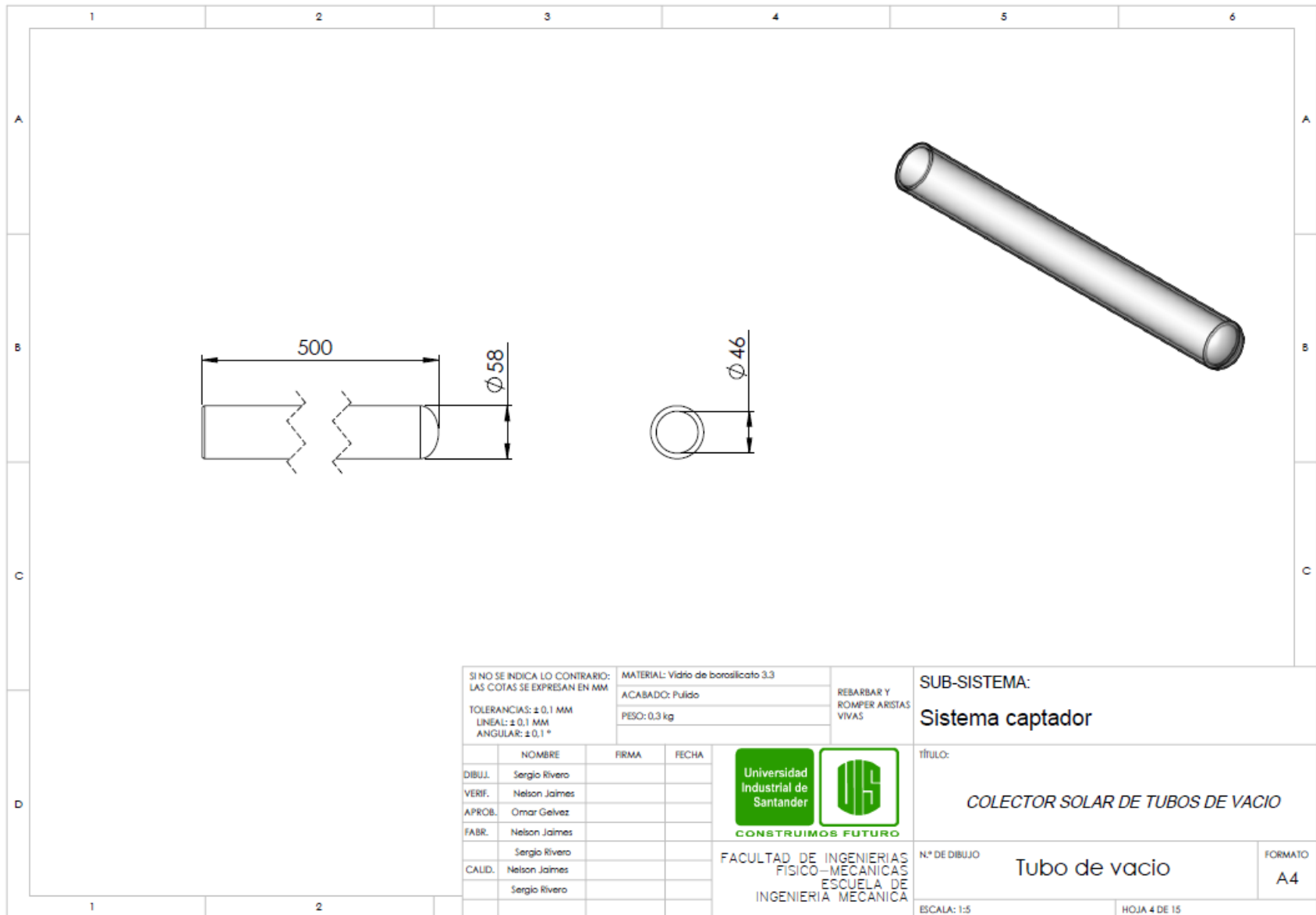
TÍTULO:
COLECTOR SOLAR DE TUBOS DE VACIO

N.º DE DIBUJO
Tubo en U y Tubos de calor

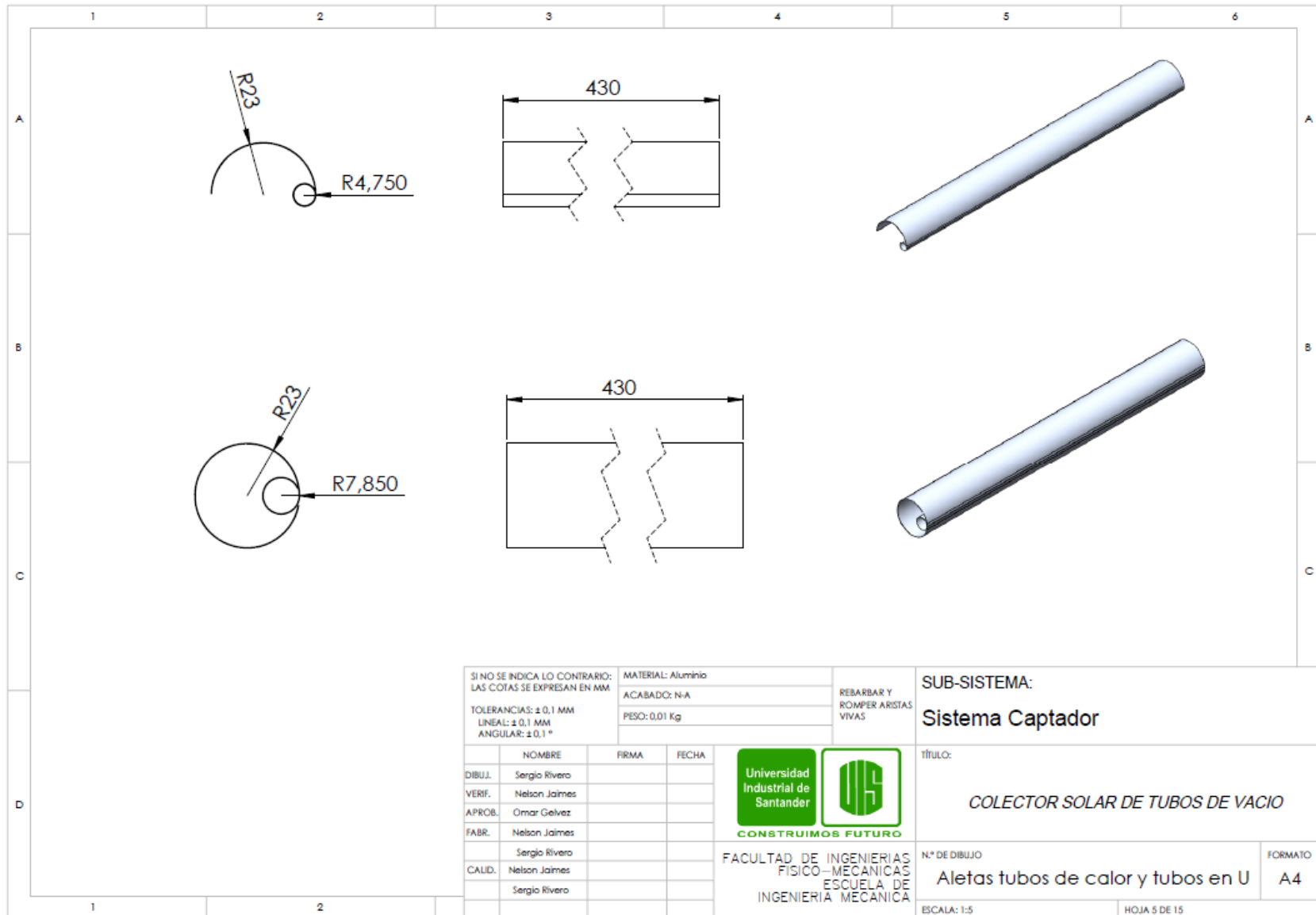
FORMATO
A4

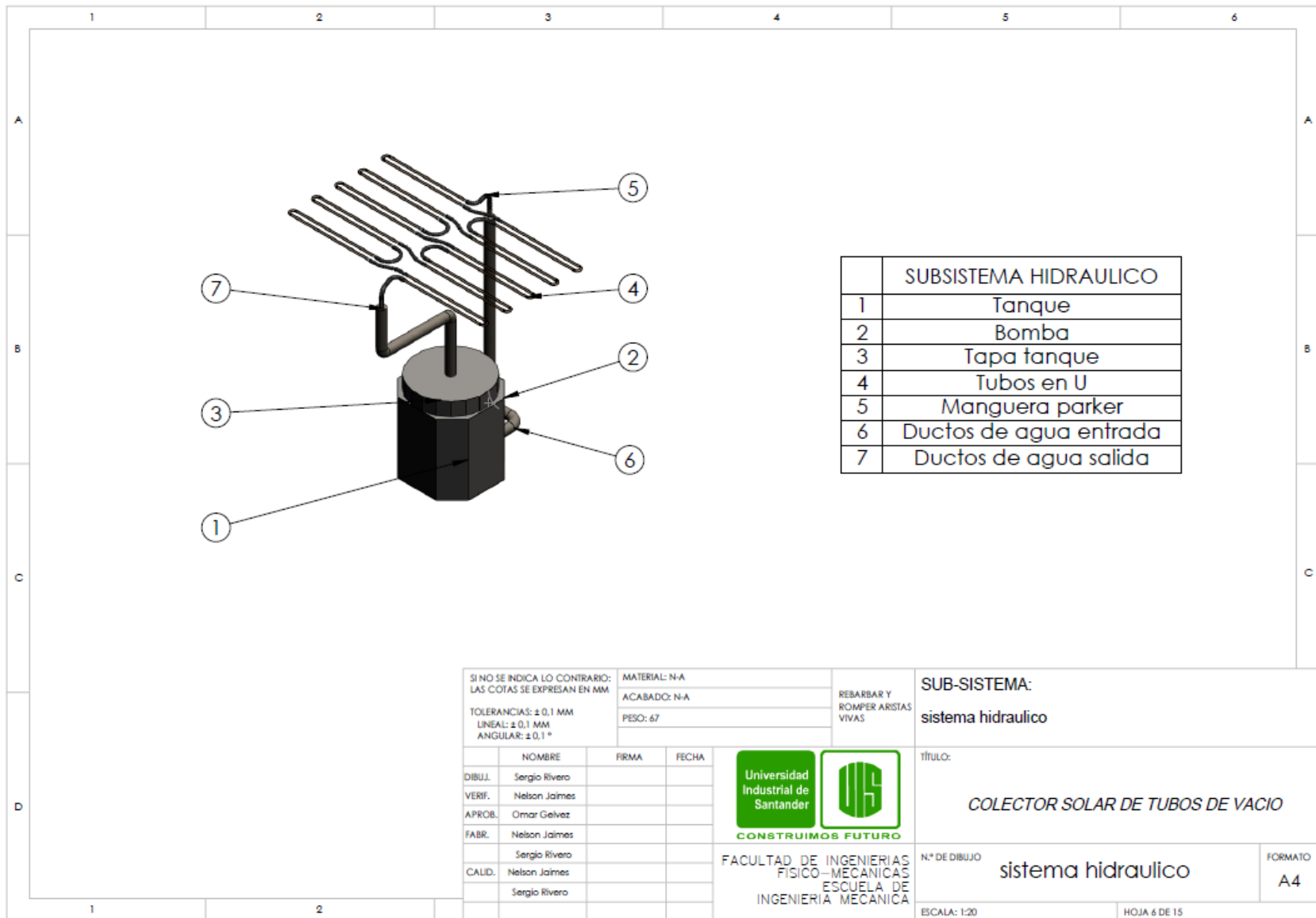
ESCALA: 1:5

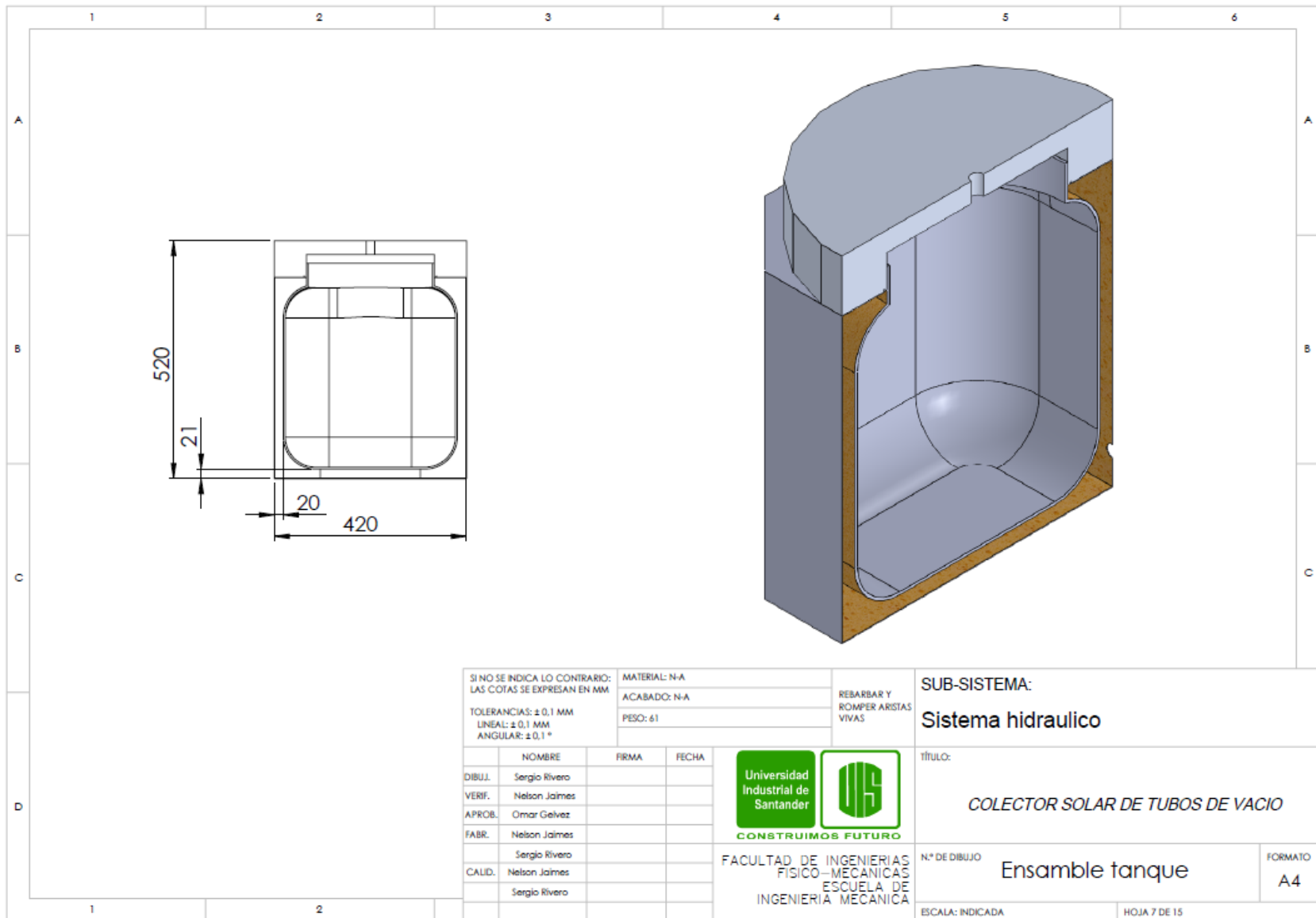
HOJA 3 DE 15



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM			MATERIAL: Vidrio de borosilicato 3.3	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	SUB-SISTEMA:	
TOLERANCIAS: ± 0,1 MM LINEAL: ± 0,1 MM ANGULAR: ± 0,1 °			ACABADO: Pulido		Sistema captador	
			PESO: 0,3 kg		TÍTULO:	
	NOMBRE	FIRMA	FECHA	 Universidad Industrial de Santander  CONSTRUIMOS FUTURO	<i>COLECTOR SOLAR DE TUBOS DE VACIO</i>	
DIBUJ.	Sergio Rivero					
VERIF.	Nelson Jaimés					
APROB.	Omar Gelvez					
FABR.	Nelson Jaimés					
CAUID.	Sergio Rivero			FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECANICAS ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA	N.º DE DIBUJO	FORMATO
	Nelson Jaimés				Tubo de vacio	A4
	Sergio Rivero				ESCALA: 1:5	HOJA 4 DE 15







SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM

TOLERANCIAS: ± 0,1 MM
LINEAL: ± 0,1 MM
ANGULAR: ± 0,1 °

MATERIAL: N-A
ACABADO: N-A
PESO: 61

REBARBAR Y
ROMPER ARISTAS
VIVAS

SUB-SISTEMA:
Sistema hidraulico

	NOMBRE	FIRMA	FECHA
DIBUJ.	Sergio Rivero		
VERIF.	Nelson Jaimes		
APROB.	Omar Gelvez		
FABR.	Nelson Jaimes		
	Sergio Rivero		
CALID.	Nelson Jaimes		
	Sergio Rivero		

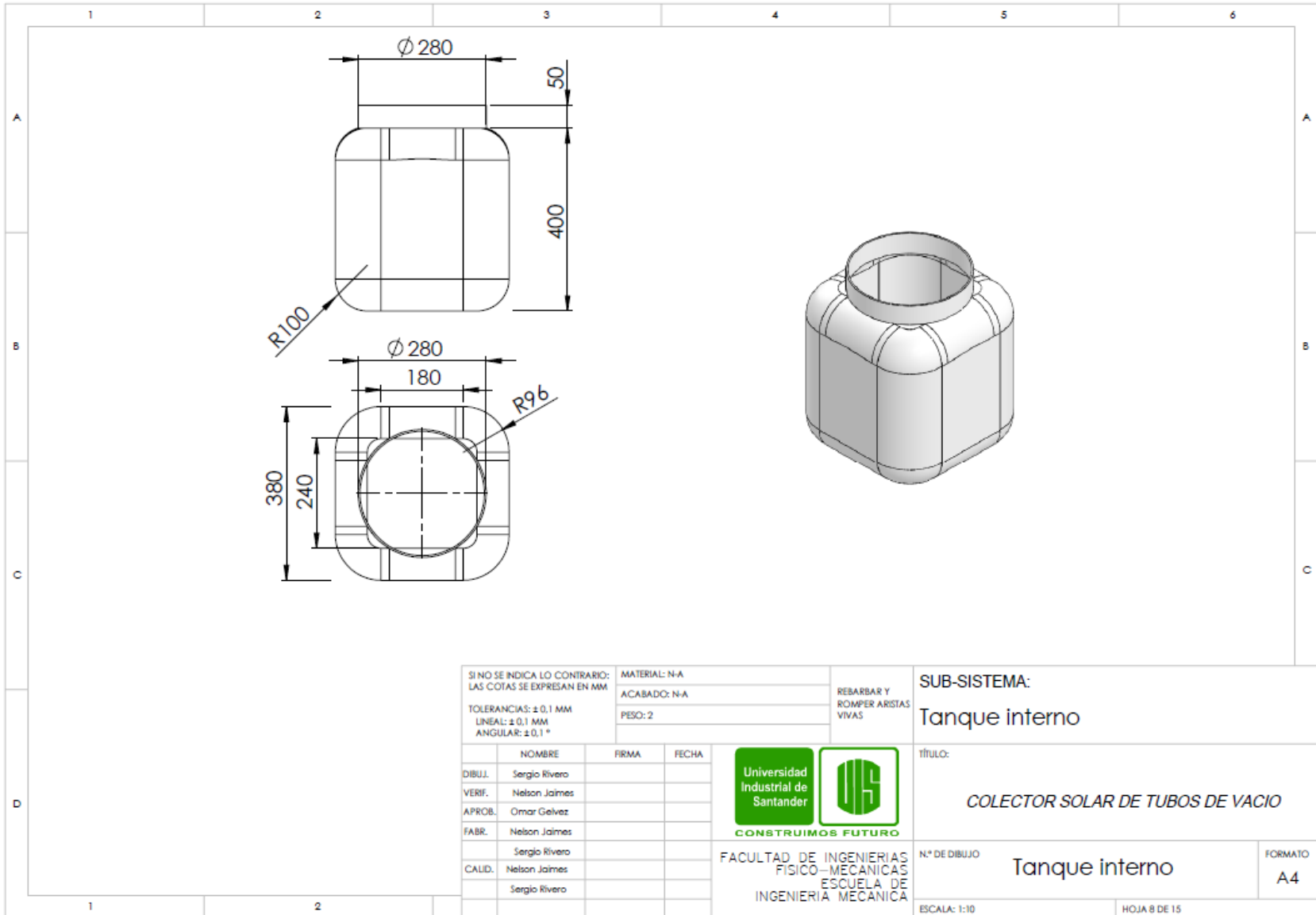


CONSTRUIMOS FUTURO
 FACULTAD DE INGENIERIAS
 FISICO-MECANICAS
 ESCUELA DE
 INGENIERIA MECANICA

TÍTULO:
COLECTOR SOLAR DE TUBOS DE VACIO

N° DE DIBUJO: **Ensamble tanque** FORMATO: **A4**

ESCALA: INDICADA HOJA 7 DE 15



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM

TOLERANCIAS: ± 0.1 MM
LINEAL: ± 0.1 MM
ANGULAR: ± 0.1 °

MATERIAL: N/A
ACABADO: N/A
PESO: 2

REBARBAR Y
ROMPER ARISTAS
VIVAS

SUB-SISTEMA:
Tanque interno

	NOMBRE	FIRMA	FECHA
DIBUJ.	Sergio Rivero		
VERIF.	Nelson Jaimes		
APROB.	Omar Gelvez		
FABR.	Nelson Jaimes		
CALID.	Sergio Rivero		
	Nelson Jaimes		
	Sergio Rivero		

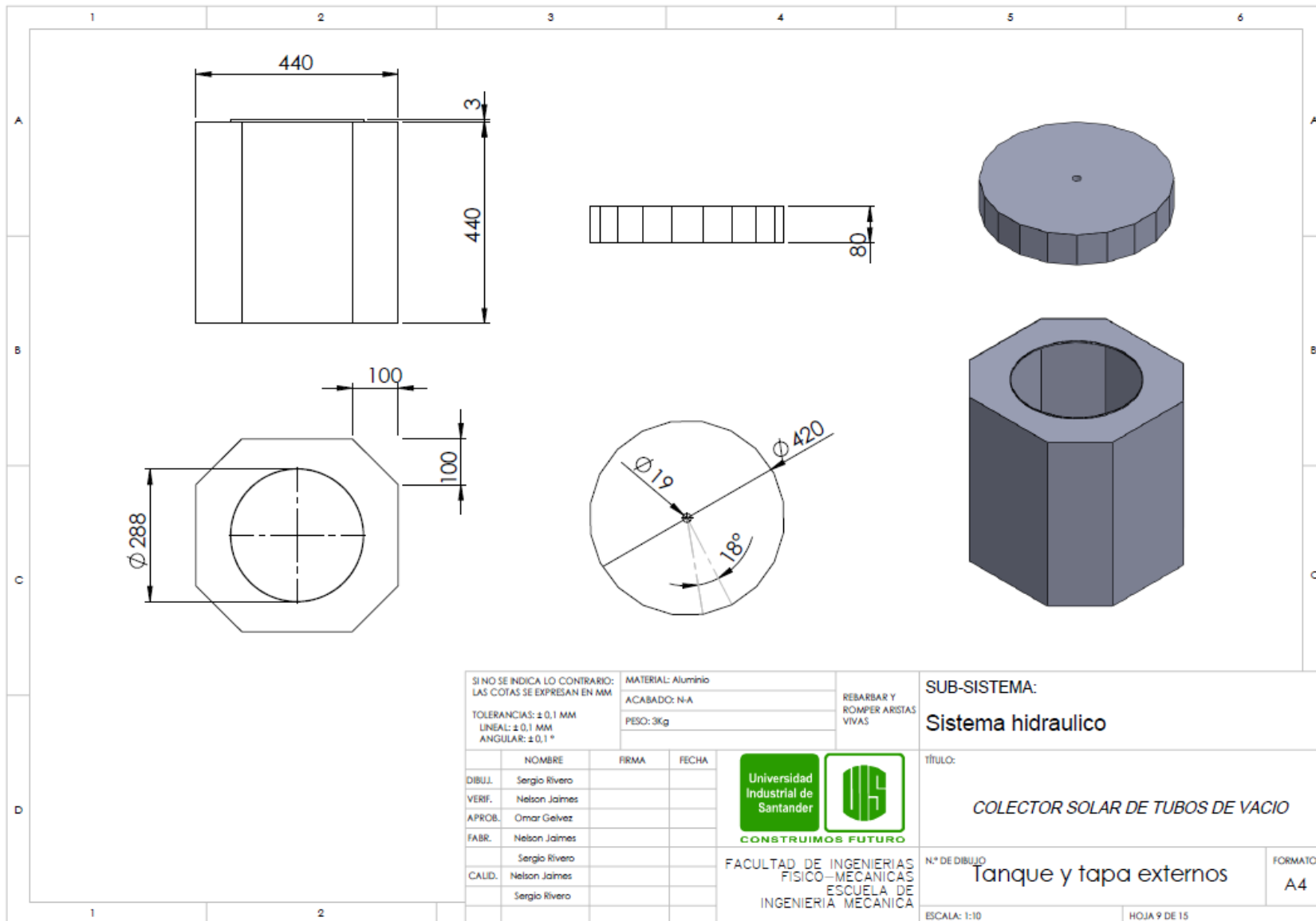


CONSTRUIMOS FUTURO
 FACULTAD DE INGENIERIAS
 FISICO-MECANICAS
 ESCUELA DE
 INGENIERIA MECANICA

TÍTULO:
COLECTOR SOLAR DE TUBOS DE VACIO

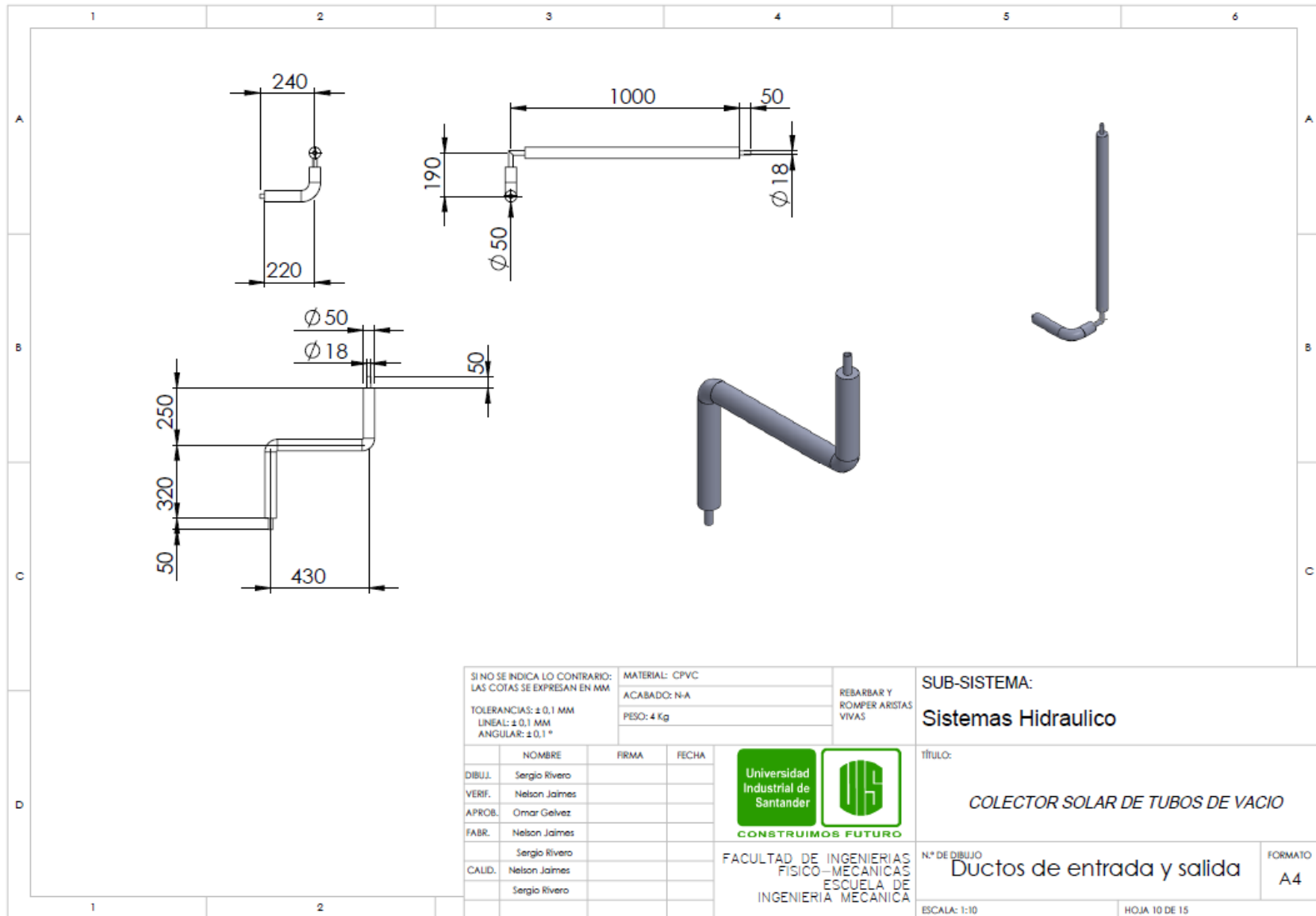
N° DE DIBUJO: **Tanque interno** FORMATO: **A4**

ESCALA: 1:10 HOJA 8 DE 15



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM			MATERIAL: Aluminio	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS
TOLERANCIAS: ± 0,1 MM LINEAL: ± 0,1 MM ANGULAR: ± 0,1 °			ACABADO: N-A	
			PESO: 3Kg	
	NOMBRE	FIRMA	FECHA	
DIBUJ.	Sergio Rivero			  CONSTRUIMOS FUTURO
VERIF.	Nelson Jaimes			
APROB.	Omar Gelvez			
FABR.	Nelson Jaimes			
CALID.	Sergio Rivero			
	Nelson Jaimes			FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECANICAS ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA
	Sergio Rivero			

SUB-SISTEMA: Sistema hidraulico	
TÍTULO: <i>COLECTOR SOLAR DE TUBOS DE VACIO</i>	
N° DE DIBUJO Tanque y tapa externos	FORMATO A4
ESCALA: 1:10	HOJA 9 DE 15



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM	MATERIAL: CPVC	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS
TOLERANCIAS: ± 0,1 MM LINEAL: ± 0,1 MM ANGULAR: ± 0,1 °	ACABADO: N-A	
	PESO: 4 Kg	

SUB-SISTEMA:
Sistemas Hidraulico

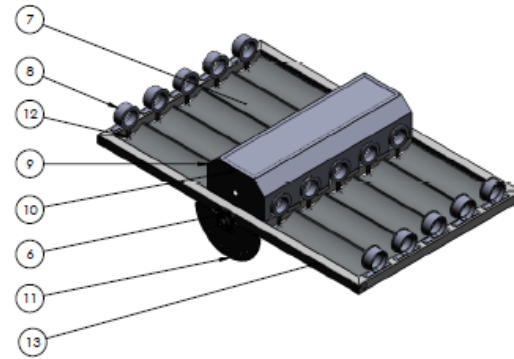
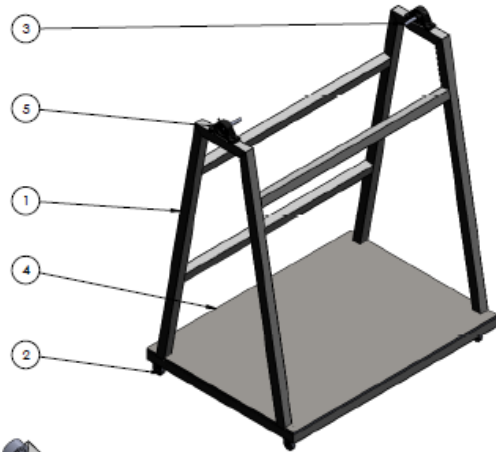
	NOMBRE	FIRMA	FECHA
DIBUJ.	Sergio Rivero		
VERIF.	Nelson Jaimes		
APROB.	Omar Gelvez		
FABR.	Nelson Jaimes		
	Sergio Rivero		
CALID.	Nelson Jaimes		
	Sergio Rivero		



CONSTRUIMOS FUTURO
 FACULTAD DE INGENIERIAS
 FISICO-MECANICAS
 ESCUELA DE
 INGENIERIA MECANICA

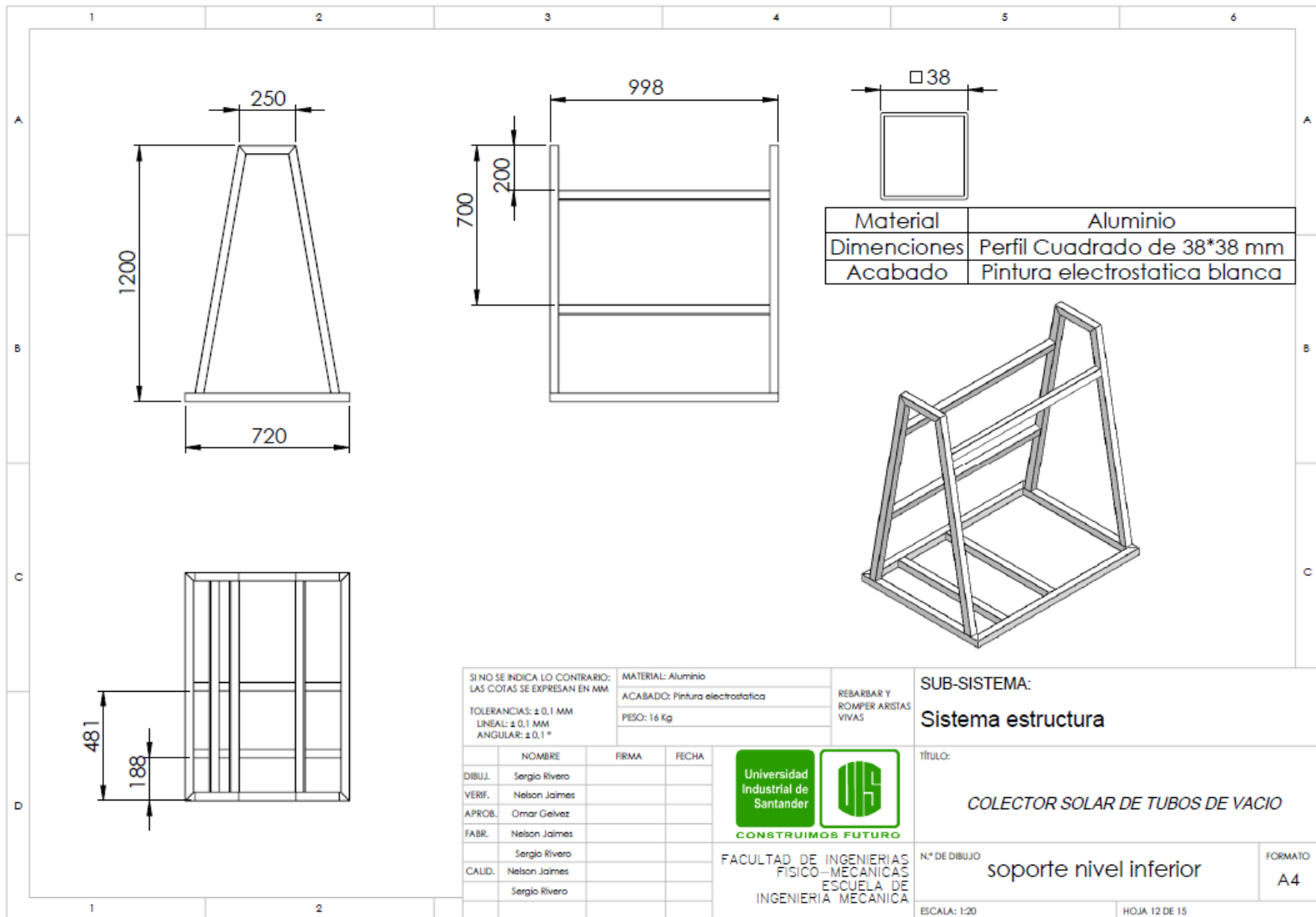
TÍTULO:
COLECTOR SOLAR DE TUBOS DE VACIO

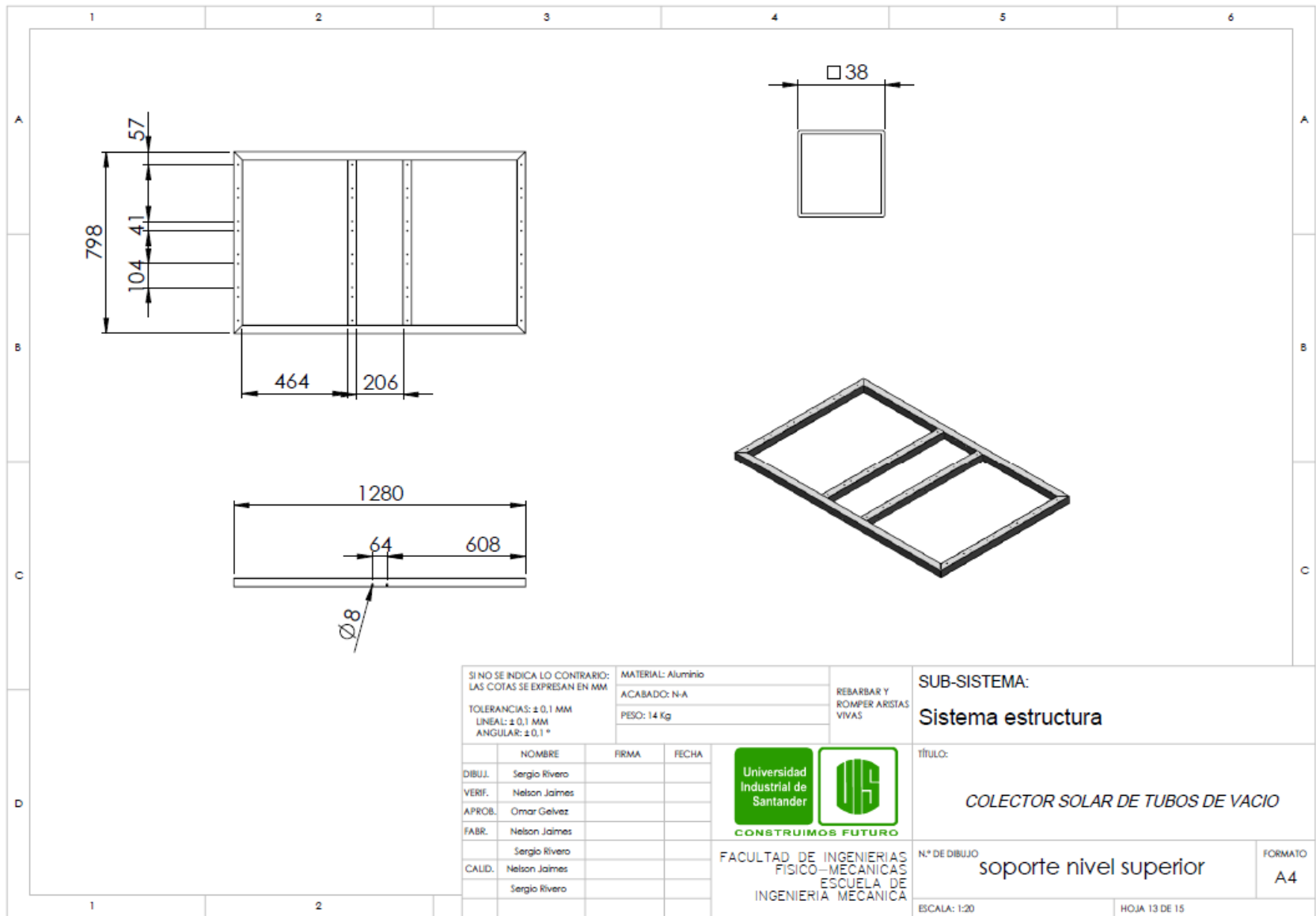
N.º DE DIBUJO Ductos de entrada y salida	FORMATO A4
ESCALA: 1:10	HOJA 10 DE 15

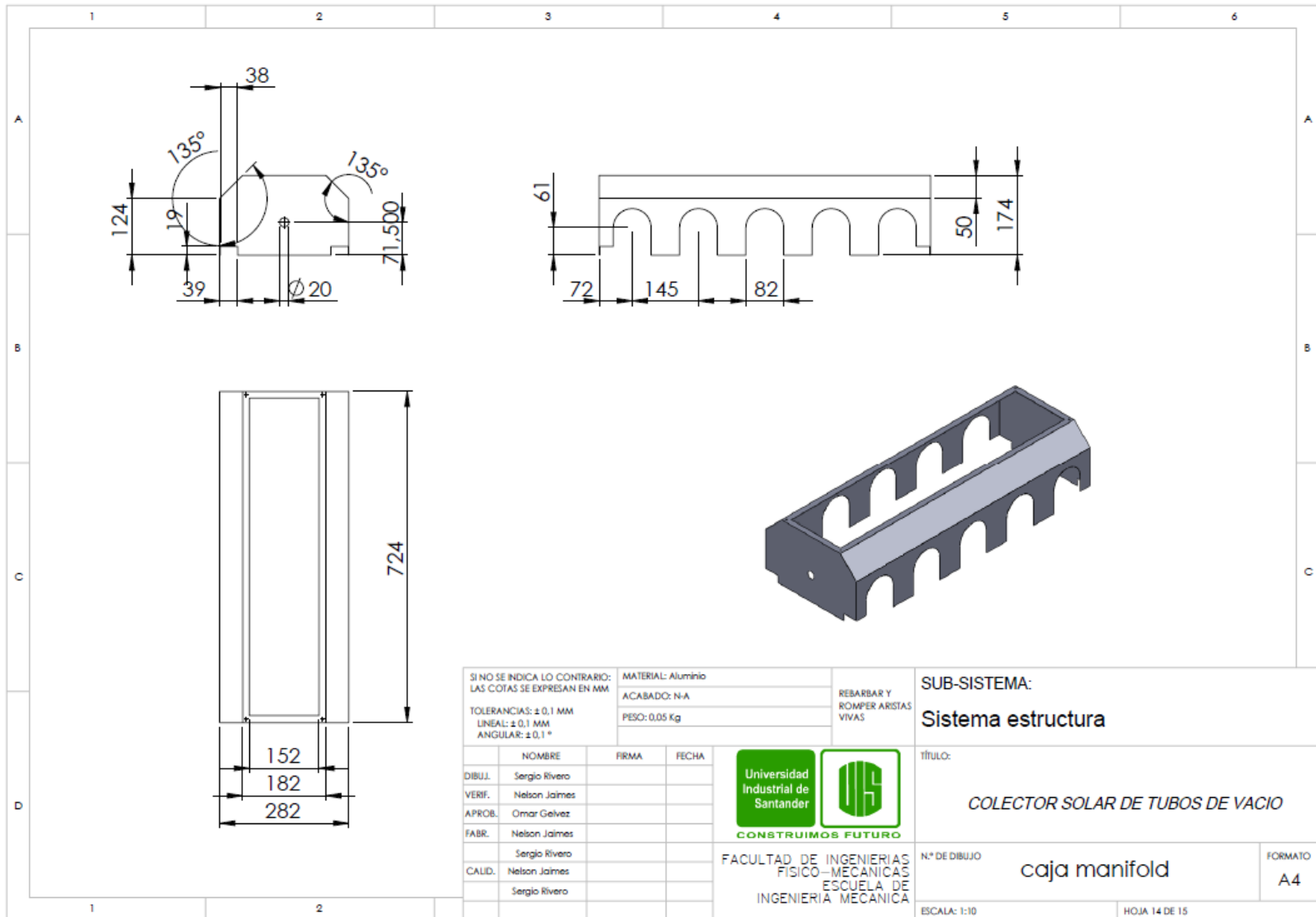


MARCO PRIMARIO		Materiales	
1	Soporte nivel inferior	Marco de perfil cuadrado de aluminio de 38 mm con union remachado	
2	Llantas	Rueda giratoria con freno total, trasero zincado carga 50 kg.	
3	Ejes	Acero 4140 de diametro 1/2" y 5" longitud	
4	Lamina corrugada	Lamina de aluminio corrugada calibre 22 de 1x0.7 m	
5	Chumacera de puente		
MARCO SECUNDARIO			
6	Chumacera parche		
7	Superficie reflectiva	acero inoxidable pulido al espejo	
8	Buje soldado	buje soldado sanitario de 4x2"	
9	Caja manifold	lamina de aluminio liza calibre 30	
10	Tapa caja manifold	lamina de aluminio liza calibre 30	
11	Platina posicion	acero comert con una galvanizado superficial	
12	Escuadras soporte	escuadras de pulgada	
13	Soporte nivel superior		

ICABRE	FRMA	PCNA	PCO		
DBL	Dagoberto Razo			sistema estructura	
UPR	Ulises Ricardo Lopez				
APR	Alfonso Carlos Arellano				
MAR	Dagoberto Razo				
MAJ	Manuel Ricardo Lopez				
CAJ	Dagoberto Razo			N-A	Nº DE DISEÑO
	Manuel Ricardo Lopez				sistema estructura
		PROJ		RECALA-02	NOA-11 DE 12







SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM			MATERIAL: Aluminio	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS
TOLERANCIAS: ± 0,1 MM LINEAL: ± 0,1 MM ANGULAR: ± 0,1 °			ACABADO: N-A	
			PESO: 0.05 Kg	
	NOMBRE	FIRMA	FECHA	
DIBUJ.	Sergio Rivero			 CONSTRUIAMOS FUTURO
VERIF.	Nelson Jaimes			
APROB.	Omar Gelvez			
FABR.	Nelson Jaimes			
	Sergio Rivero			
CALID.	Nelson Jaimes			FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECANICAS ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA
	Sergio Rivero			

SUB-SISTEMA: Sistema estructura	
TÍTULO: <i>COLECTOR SOLAR DE TUBOS DE VACIO</i>	
N° DE DIBUJO caja manifold	FORMATO A4
ESCALA: 1:10	HOJA 14 DE 15

