

**DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN SISTEMA DE CALENTAMIENTO
DE AGUA PARA USO RESIDENCIAL POR ENERGIA SOLAR**

**ANDRES DAVID BONILLA CORTES
SERGIO AUGUSTO CACERES PAREDES**

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

2014

**DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN SISTEMA DE CALENTAMIENTO
DE AGUA PARA USO RESIDENCIAL POR ENERGIA SOLAR**

**ANDRÉS DAVID BONILLA CORTÉS
SERGIO AUGUSTO CACERES PAREDES**

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

**Director
OMAR ARMANDO GÉLVEZ AROCHA
Ingeniero Mecánico**

**Codirector
SERGIO ARMANDO RIVERO GEREDA
Ingeniero Mecánico**

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

2014

DEDICATORIA

Para Gladys, mi madre, por su amor.

Para Jorge, mi padre, mi refugio.

Andrés Bonilla Cortés

DEDICATORIA

Para mi hermosa familia de la cual recibí su apoyo incondicional y especialmente para mi madre que estuvo presente en todo momento.

Sergio Augusto Caceres Paredes

AGRADECIMIENTOS

A los ingenieros Omar Armando Gélvez Arocha y Sergio Rivero Gereda, por su orientación en el desarrollo de este proyecto.

Al ingeniero Jabid Quiroga Méndez, por su confianza y credibilidad en esta labor.

A todas las personas que nos acompañaron en este proceso.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	26
1. ENERGIA RENOVABLE	29
<i>1.1 FUENTES DE ENERGIA RENOVABLE</i>	<i>29</i>
1.1.1 Energía solar	29
1.1.2 Energía Eólica	30
1.1.3 Energía Geotérmica	31
1.1.4 Energía Hidráulica	31
1.1.5 Biomasa	33
1.1.6 Energía Mareomotriz	33
1.1.7 Energía Maremotérmica	33
<i>1.2 MARCOS REGULADORES EN EL USO DE ENERGÍA</i>	<i>34</i>
1.2.1 Protocolo de Kyoto sobre el cambio climático	35
1.2.2 Convenio de Viena	36
1.2.3 ISO 50001	36
1.2.4 Ley URE 697 del 2001	37
<i>1.3 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA Y TÉRMICA</i>	<i>37</i>
1.3.1 Energía solar fotovoltaica	37
1.3.2 Energía solar térmica	40
<i>1.4 DESARROLLO DE LA ENERGIA SOLAR EN COLOMBIA</i>	<i>43</i>
1.4.1 Fuentes Fotovoltaicas	44
1.4.2 Fuentes Térmicas	47
<i>1.5 NORMATIVIDAD DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA Y TERMICA EN COLOMBIA</i>	<i>48</i>
1.5.1 Normatividad de sistemas solares térmicos	49
1.5.1.1 NTC 2774	49

1.5.1.2 NTC 3322	49
1.5.1.3 NTC 3507	50
1.5.1.4 NTC 5291	50
1.5.1.5 NTC 5434, Parte 1 y 2. Colectores solares	50
1.5.2 Normatividad de sistemas solares fotovoltaicos.	50
1.5.2.1 NTC 2883	50
1.5.2.2 NTC 5464	51
1.5.2.3 NTC 5549	51
1.5.2.4 NTC 5287	51
1.5.2.5 NTC 5433	51
1.5.2.6 NTC 5627	52
2. ENERGIA SOLAR	53
<i>2.1 GENERALIDADES DE LA ENERGIA SOLAR</i>	<i>53</i>
<i>2.2 DETERMINACION DEL ANGULO DE INCIDENCIA θ DE LA RADIACION SOLAR RESPECTO A UNA SUPERFICIE</i>	<i>55</i>
2.2.1 Factores dependientes del movimiento de la tierra	55
2.2.1.1 Angulo de declinación [δ]	57
2.2.1.2 Angulo de inclinación horaria ω	58
2.2.2 Factores dependientes de la ubicación de la tierra	60
2.2.2.1 Latitud terrestre (φ)	60
2.2.2.2 Angulo de inclinación superficial (β)	60
2.2.2.3 Azimut de la pared (γ_p)	60
2.2.2.4 Azimut solar (γ_s)	60
2.2.3 Cálculo del ángulo de incidencia θ de la radiación solar para diferentes superficies	62
2.2.3.1 Superficies horizontales	63
2.2.3.2 Superficies inclinadas orientadas hacia el sur	63
2.2.3.3 Superficies inclinadas con cualquier orientación	64

2.3 CALCULO DE LA IRRADIANCIA (q_s) PARA UN PLANO SOBRE LA SUPERFICIE TERRESTRE	65
2.3.1 Constante solar (I_0)	65
2.3.2 Atenuación atmosférica de la radiación solar	67
2.3.3 Métodos para la determinación de la irradiancia a nivel terrestre	70
2.3.3.1 Instrumentos para la medición de la radiación solar	70
2.3.3.2 Métodos para la estimación de la radiación solar	73
2.3.3.3 Estimación de la radiación solar global sobre superficies horizontales	73
2.3.3.4 Estimación de la radiación solar difusa sobre superficies horizontales	74
2.3.4 Irradiancia sobre una superficie plana inclinada ubicada sobre la superficie terrestre ($q_s \beta$)	75
2.4 MAPAS DE RADIACION SOLAR	76
2.4.1 Radiación solar mundial	76
2.4.2 Radiación Solar en Colombia	77
3. COLECTORES SOLARES	79
3.1 CLASIFICACION DE LOS COLECTORES SOLARES	79
3.1.1 Colector solar de placa plana	79
3.1.1.1 Cubierta transparente	81
3.1.1.2 Placa captadora	81
3.1.1.3 Aislamiento térmico	82
3.1.1.4 Carcasa	82
3.1.2 Colector solar concentrador de enfoque	83
3.1.2.1 Colectores cilíndricos parabólicos	84
3.1.2.2 Colectores de disco parabólico	85
3.1.2.3 Tecnología de torre con helióstatos	86
3.1.3 Colectores solares de tubos de vacío	86
3.1.3.1 Tubos de vacío de cubierta simple	87
3.1.3.2 Tubos de vacío de cubierta doble	88
3.2 EFICIENCIA DE LOS COLECTORES SOLARES	92

4. DISEÑO DEL CALENTADOR DE AGUA SOLAR BASADO EN UN MODELO MATEMATICO	96
<i>4.1 DETERMINACION DEL CALOR INCIDENTE SOBRE EL COLECTOR SOLAR DE TUBOS EVACUADOS SIMPLES</i>	<i>96</i>
4.1.1 Determinación de la irradiancia instantánea para colectores de placa plana	96
4.1.2 Determinación de la irradiancia instantánea sobre colectores de tubos de vacío	97
4.1.2.1 Radiación directa sobre los tubos de vacío	97
4.1.2.2 Radiación difusa sobre los tubos de vacío	98
4.1.2.3 Radiación reflejada sobre los tubos de vacío	99
<i>4.2 PARAMETROS DEL DISEÑO TERMICO PARA EL MODELAMIENTO</i>	<i>100</i>
4.2.1 Volumen de agua para el tanque de almacenamiento	101
4.2.2 Numero de tubos de vacío	102
4.2.3 Inclinación de los tubos de vacío	102
4.2.4 Distancia entre tubos	103
4.2.5 Tanque de almacenamiento de agua caliente	103
<i>4.3 MODELO MATEMÁTICO DEL COMPORTAMIENTO TRANSITORIO DE LA TEMPERATURA DEL AGUA AL INTERIOR DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO AISLADO DEL SISTEMA SOLAR TÉRMICO</i>	<i>107</i>
4.3.1 Determinación del estado inicial	110
4.3.1.1 Datos para cálculo	110
4.3.1.2 Propiedades físicas del sistema	110
4.3.2 Determinación del calor incidente en la superficie absortiva	110
4.3.2.1 Determinación del calor de pérdidas de los tubos de vacío	111
4.3.3 Determinación de la energía ganada	112
4.3.3.1 Determinación del calor de pérdidas del tanque	112
4.3.4 Comparación entre modelos matemáticos en función del número de tubos evacuados simples y el porcentaje de pérdidas de energía a través del tanque de almacenamiento aislado	114

4.3.4.1 Modelo matemático con 18 tubos de vacío y 5% de pérdidas de energía en el tanque	114
4.3.4.2 Modelo matemático con 15 tubos de vacío y 5% de pérdidas de energía en el tanque	114
4.3.4.3 Modelo matemático con 20 tubos de vacío y 5% de pérdidas de energía en el tanque	116
4.3.4.4 Modelo matemático con 18 tubos de vacío y 10% de pérdidas de energía en el tanque	117
4.3.4.5 Modelo matemático con 18 tubos de vacío y 15% de pérdidas de energía en el tanque	118
4.4 MODELO MATEMÁTICO DEL COMPORTAMIENTO NOCTURNO DE LA TEMPERATURA DEL AGUA AL INTERIOR DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO AISLADO DEL SISTEMA SOLAR TÉRMICO	121
4.4.1 Calculo del coeficiente global de pérdidas de energía del tanque de almacenamiento a partir del diseño	121
5. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA Y MONTAJE DEL CALENTADOR DE AGUA CON CAPTACIÓN DE ENERGÍA POR TUBOS EVACUADOS SIMPLES	125
5.1 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA	125
5.1.1 Subsistema de captación de energía	125
5.1.1.1 Colector Solar de Tubos de Vacío (Evacuados) simples	126
5.1.1.2 Empaque de silicón	127
5.1.2 Subsistema de calentamiento auxiliar	128
5.1.3 Subsistema de almacenamiento	130
5.1.3.1 Tanque de almacenamiento aislado	130
5.1.3.2 Jarro de aire	133
5.1.4 Subsistema hidráulico	134
5.2 DESCRIPCIÓN DEL MONTAJE	137
5.2.1 Ensamble de marco estructural (estructura)	138
5.2.2 Posición del sistema	139

5.2.3	Instalación del tanque	141
5.2.4	Instalación de los tubos evacuados simples	141
5.2.5	Instalación del subsistema hidráulico	143
6.	PRUEBAS Y ANALISIS DE RESULTADOS	145
6.1	<i>SISTEMA DE MONITOREO Y CONTROL</i>	146
6.1.1	Adaptador	146
6.1.2	Field point	146
6.1.3	Termocuplas	148
6.1.4	Piranómetros	151
6.1.5	Software de adquisición de datos	151
6.2	<i>PRUEBA DE ESTANCAMIENTO</i>	153
6.3	<i>PRUEBA CON CONSUMO DE AGUA CALIENTE</i>	156
6.3.1	Prueba con consumo de agua caliente en horas de la noche	156
6.3.2	Prueba con consumo de agua caliente en horas de la mañana	157
6.4	<i>PRUEBA DE CALENTAMIENTO DE AGUA POR MEDIO DE RESISTENCIAS ELECTRICAS</i>	160
6.5	<i>VALIDACION DEL MODELO MATEMATICO RESPECTO A LAS PRUEBAS REALIZADAS</i>	161
7.	EVALUACIÓN SOCIO-AMBIENTAL Y ECONÓMICA	164
7.1	<i>EVALUACIÓN SOCIO-AMBIENTAL</i>	164
7.2	<i>EVALUACIÓN ECONÓMICA</i>	166
7.2.1	Tendencia del consumo de energía eléctrica y gas	166
7.2.2	Tendencia del uso de electro y gasodomésticos	168
7.2.3	Medición de costo de electricidad y gas natural	170
7.2.3.1	Método de estimación del consumo de energía eléctrica	170
7.2.3.2	Método de estimación del costo de energía eléctrica	172
7.2.3.3	Método de estimación del consumo de gas natural	172
7.2.3.4	Método de estimación del costo de gas natural	173

7.2.4 Análisis de valor presente neto	174
7.2.4.1 Análisis de VPN para el sistema solar térmico	175
7.2.4.2 Análisis de VPN para sistema eléctrico	177
7.2.4.3 Análisis de VPN para gas natural	182
CONCLUSIONES	187
RECOMENDACIONES	193
BIBLIOGRAFÍA	194
ANEXOS	197

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Central solar de colectores planos	30
Figura 2. Aerogeneradores de energía eólica	31
Figura 3. Planta geotérmica	32
Figura 4. Represa hidroeléctrica	32
Figura 5. Central mareomotriz	34
Figura 6. Posición de los diversos países respecto del protocolo de Kyoto.	35
Figura 7. Célula solar fotovoltaica	38
Figura 8. Esquema de modulo fotovoltaico	39
Figura 9. Colector solar	41
Figura 10. Cantidad de energía de la radiación solar que incide por metro cuadrado de superficie horizontal sobre el territorio colombiano.	45
Figura 11. Espectro electromagnético	53
Figura 12. Capas de la atmosfera terrestre	54
Figura 13. Rotación terrestre	56
Figura 14. Movimiento de traslación de la tierra	56
Figura 15. Movimiento de precesión y nutación	57
Figura 16. Angulo de declinación	58
Figura 17. Angulo de declinación para distintas épocas del año	59
Figura 18. Angulo de inclinación horaria	59
Figura 19. Latitud terrestre	61
Figura 20. Inclinación de una superficie respecto a la horizontal	61
Figura 21. Azimut solar y de la pared para una superficie inclinada	62
Figura 22. Angulo cenital de una superficie horizontal	63
Figura 23. Angulo de incidencia para una superficie inclinada y orientada en cualquier dirección	64
Figura 24. Variación de la radiación solar-extraterrestre con la época del año	66

Figura 25. Radiación directa	68
Figura 26. Atenuación de la radiación solar	69
Figura 27. Piranómetro	71
Figura 28. Piranómetro de radiación difusa	71
Figura 29. Pirheliómetro	71
Figura 30. Actinógrafo	72
Figura 31. Heliógrafo	72
Figura 32. Curva de radiación difusa en función de Kk	75
Figura 33. Irradiancia solar promedio mundial	77
Figura 34. Colector solar de placa plana para uso residencial	80
Figura 35. Componentes de un colector solar de placa plana	83
Figura 36. Colector solar de concentración	84
Figura 37. Colector solar cilíndrico parabólico	85
Figura 38. Colector de disco parabólico	86
Figura 39. Tecnología de torre con helióstatos	87
Figura 40. Colector solar de tubos de vacío	88
Figura 41. Colector solar de tubos de vacío de cubierta simple	88
Figura 42. Colector solar de tubos de vacío de cubierta doble	89
Figura 43. Colector solar de tubos de vacío de cubierta doble de contacto directo	90
Figura 44. Colector solar de tubos de vacío de cubierta doble de contacto indirecto con tubo de calor o heat pipe	91
Figura 45. Colector solar de tubos de vacío de cubierta doble de contacto con tubo conductor	92
Figura 46. .Análisis de radiación incidente sobre un colector solar	93
Figura 47. Radiación directa sobre una superficie cilíndrica	97
Figura 48. Radiación difusa sobre una superficie cilíndrica	99
Figura 49. Criterio de consumo de agua caliente	101
Figura 50. Cenit solar en la mesa de los santos	103
Figura 51. Distancia entre tubos	104

Figura 52. Medidas del tanque de almacenamiento aislado	107
Figura 53. Diagrama de flujo del modelo analítico transitorio del sistema solar térmico	108
Figura 54. Resistencias térmicas de los colectores solares	111
Figura 55. Diagrama de flujo del modelo matemático del comportamiento transitorio de la temperatura de la temperatura del agua al interior del tanque aislado realizado en MATLAB.	113
Figura 56. Curva teórica de la temperatura del agua en el tanque con 18 tubos de vacío y 5% de pérdidas de energía en el tanque.	115
Figura 57. Curva teórica de la temperatura del agua en el tanque con 15 tubos de vacío y 5% de pérdidas de energía en el tanque.	115
Figura 58. Curva teórica de la temperatura del agua en el tanque con 20 tubos de vacío y 5% de pérdidas de energía en el tanque.	116
Figura 59. Curva teórica de la temperatura del agua en el tanque con 18 tubos de vacío y 10% de pérdidas de energía en el tanque.	117
Figura 60. Curva teórica de la temperatura del agua en el tanque con 18 tubos de vacío y 15% de pérdidas de energía en el tanque.	118
Figura 61. Curvas de comparación entre los modelos teóricos matemáticos	119
Figura 62. Circuito de resistencias térmicas del tanque	121
Figura 63. Curva teórica del comportamiento nocturno de la temperatura del agua al interior del tanque de almacenamiento aislado	124
Figura 64. Colector solar de tubos de vacío simples	126
Figura 65. Tubo de Vacío (Evacuado) simple	127
Figura 66. Empaque de silicón para el interior del tanque	127
Figura 67. Resistencia tubular eléctrica	129
Figura 68. Ubicación de la resistencia tubular eléctrica	129
Figura 69. Tanque de almacenamiento aislado	130
Figura 70. Composición del tanque de almacenamiento asilado	132
Figura 71. Cubre Polvo (empaque)	132
Figura 72. Distribución en el tanque de almacenamiento asilado	133

Figura 73. Jarro de aire a nivel del agua dentro del tanque domestico	134
Figura 74. Válvula cheque de ½ pulgada PVC	135
Figura 75 Válvula de bola de ½ pulgada PVC	135
Figura 76. Estructura	136
Figura 77. Calentador en la cabaña de la Finca Villa Elisa	137
Figura 78. Tanque domiciliario	138
Figura 79. Explosión marco estructural	138
Figura 80. Instalación de la base de los tubos y su empaque	139
Figura 81. Columnas en ladrillo de tierra.	140
Figura 82. Sistema solar térmico posicionado	141
Figura 83. Instalación del tanque	142
Figura 84. Adición de los empaques de silicón	142
Figura 85. Instalación del subsistema hidráulico	144
Figura 86. Elementos básicos de la red hidráulica del sistema solar térmico	144
Figura 87. Modulo de Field Point FP-1000	147
Figura 88: Modulo de Field point FP-TC-120	148
Figura 89. Ubicación termocupla temperatura de entrada	149
Figura 90. Ubicación termocupla temperatura de salida	149
Figura 91. Ubicación termocupla temperatura interior del tanque	150
Figura 92. Ubicación termocupla temperatura ambiente	150
Figura 93. Ubicación de los piranómetro de medición	151
Figura 94. Entorno de usuario para el programa de LabView realizado	152
Figura 95. Entorno de programación grafica para el programa de LabView realizado	153
Figura 96. Grafica de temperaturas de la prueba de estancamiento	154
Figura 97. Grafica de radiación solar de la prueba de estancamiento	155
Figura 98. Grafica prueba con consumo de agua caliente en la noche	157
Figura 99. Grafica de temperatura segunda parte prueba consumo	158
Figura 100. Grafica de radiación solar de la prueba de consumo	160
Figura 101. Grafica de T de prueba de calentamiento con subsistema auxiliar	161

Figura 102. Comparación entre las curvas de temperatura teórica y real	163
Figura 103. Tendencia de electro y gasodomésticos en cuatro ciudades del país	167
Figura 104. Tendencia de calentadores de agua por tecnología	168
Figura 105. Tendencia del uso de electro y gasodomésticos	169
Figura 106. Línea de tiempo en años para el sistema solar térmico	177
Figura 107. Pronostico del valor de consumo de energía eléctrica por uso de ducha eléctrica	179
Figura 108. Pronostico del valor de consumo de gas natural para higiene personal	183

LISTA DE CUADROS

	pág.
Cuadro 1. Ventajas e inconvenientes de la energía solar fotovoltaica	40
Cuadro 2. Aplicaciones, ventajas e inconvenientes de la energía solar térmica	43
Cuadro 3. Subsistemas y elemento que componen el sistema de calentamiento de agua	125
Cuadro 4. Propiedades de los tubos de vacío simples	128
Cuadro 5. Ciclos de consumo de agua caliente	159
Cuadro 6. Resumen de la evaluación socio-ambiental	165
Cuadro 7. Tiempo promedio de uso de electro y gasodomésticos	170
Cuadro 8. Medición de costo de electricidad y gas natural	173
Cuadro 9. Las tasas de colocación por modalidad de crédito	175
Cuadro 10. Inversión sistema solar térmico	176
Cuadro 11. Inversión inicial sistema eléctrico	179
Cuadro 12. Desarrollo del VP a través de los meses durante 12 años	180
Cuadro 13. Inversión inicial sistema de calentamiento a gas natural	183
Cuadro 14. Desarrollo del VP a través de los meses durante 12 años	184
Cuadro 15. Medición de costo de electricidad y gas natural	186

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Código del modelo matemático del sistema solar térmico en MATLAB	198
Anexo B. Planos del sistema de calentamiento de agua asistido por energía solar	207
Anexo C. Datos almacenados por medio del sistema de monitoreo y control	224
Anexo D. Datos pronosticados del costo de la energía eléctrica y gas natural utilizados para la evaluación económica	247

RESUMEN

TITULO:

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN SISTEMA DE CALENTAMIENTO DE AGUA PARA USO RESIDENCIAL POR ENERGIA SOLAR *

AUTORES:

Andrés David Bonilla Cortés

Sergio Augusto Cáceres Paredes **

PALABRAS CLAVES:

Calentamiento de agua, energía solar, tubos evacuados simples, termosifón.

DESCRIPCIÓN:

En la actualidad la mayor cantidad de energía consumida en el planeta proviene de los combustibles fósiles, estos son responsables de grandes problemas medioambientales de gran relevancia en la humanidad. Uno de los principales usos de la energía es el calentamiento de fluidos, en particular de agua.

El calentamiento de agua a través de la energía solar térmica, como fuente de energía renovable, se ha convertido en un campo de desempeño a nivel ingenieril y contribuir con esta área se establece como objetivo de este proyecto de grado al diseñar y construir un sistema de calentamiento de agua para uso residencial asistido por energía solar como fuente de energía principal orientado al desarrollo socioeconómico y ambiental en el área rural, con un subsistema de captación de energía basado en los últimos avances tecnológicos disponibles como lo son los tubos evacuados simples que trabajan con circulación por termosifón; un subsistema auxiliar de calentamiento por resistencias eléctricas y un tanque de almacenamiento aislado. A fin de evaluar su desempeño, el sistema fue instalado en una zona rural del municipio La mesa de los Santos, Santander.

Entre los resultados más importantes, se destaca la evaluación de la eficiencia global real del sistema, la cual fue de 78.6%, obteniendo temperaturas de trabajo cercanas a 59°C. También se realizó la estimación del costo total de producción, incluyendo la instalación, operación y mantenimiento, el cual fue de \$ 3.013.150 pesos colombianos. Finalmente, se pudo establecer la viabilidad económica por medio del análisis de VPN respecto a los sistemas de calentamiento por energía eléctrica y por gas natural.

* Proyecto de grado

** Facultad de ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Ing. Omar Armando Gélvez Arocha. Codirector: Ing. Sergio Armando Rivero Gereda

ABSTRACT

TITLE:

DESIGN AND CONSTRUCTION OF A WATER HEATING SYSTEM FOR SOLAR ENERGY FOR RESIDENTIAL USE*

AUTHORS:

Andrés David Bonilla Cortés
Sergio Augusto Cáceres Paredes**

KEY WORDS:

Water heating, solar energy, Simple evacuated tubes, thermosyphon.

DESCRIPTION:

Just now the most consume energy in the planet comes from fossil combustible; these are responsible of environment problems for humanity. The main energy using is the fluids heating, especially the water.

Water heating through solar thermal energy, as a renewable energy source, has become in a field performance area of an engineering level and participate in this area is targeted this degree project to designed and build a water heating system for residential use attended of solar energy as a principal energy source oriented in a socioeconomic and environmental develop of a rural area, with an energy harvesting subsystem based in technological and availed advances as those are simple evacuated tubes, thermosyphon circulation, heating subsystem auxiliary electric heaters and insulated storage tank., the system was installed in a rural area of La mesa de los Santos, Santander, and so can after check the process.

Among the most important results, the global system real efficiency evaluation is stand out, which one was of 78.6 percent, with work temperatures close to 59°C. Also was performed the budget of production, include the installation, operation and support, which was of \$ 3.013.150 Colombian pesos. Finally, it was stipulating the economic viability across the VPN analysis respect to the heating system for electric energy and natural gas.

* Graduation Project

** Faculty of Physics-Mechanic Engineering's, School of Mechanic Engineering. Director: Ing. Omar Armando Gélvez Arocha. Codirector: Ing. Sergio Armando Rivero Gereda

INTRODUCCIÓN

A través del tiempo la humanidad se ha constituido en la dependencia energética. Actualmente la vida sin energía no sería posible, ya que nuestro entorno y prácticas cotidianas funcionan a base de consumo energético. Se han experimentado diferentes sistemas que proporcionen un abastecimiento a tal demanda. Los combustibles fósiles, que suponen casi el 90% de la energía comercial empleada en el planeta, han sido los protagonistas del impulso industrial desde la invención de la máquina de vapor, dependiendo de ellos la mayor parte de la industria y el transporte en la actualidad.

Sin embargo, este hecho también trajo consigo un fenómeno que no se visualizó a profundidad desde un inicio: la contaminación mundial. Evidencia de ello es la acumulación de gases invernadero, acidificación, contaminación del aire, contaminación del agua, daño de las capas superficiales y en el ozono troposférico. Es aún más preocupante este hecho si se tiene en cuenta que la demanda energética dentro del globo terráqueo aumenta en gran medida y con el paso del tiempo será aún mayor. Por esta razón, la búsqueda de alternativas que minimicen el impacto ambiental, a través de tecnologías no convencionales y el interés por mejorar sus procesos de obtención, se ha convertido en un campo de desempeño necesario a nivel ingenieril.

En la actividad humana uno de los principales usos de la energía es el calentamiento de fluidos, en particular, del agua. En Colombia el calentamiento de agua a bajas temperaturas es un proceso que se obtiene, principalmente, con la quema de combustibles fósiles. En el sector residencial el agua es calentada para la higiene personal, el lavado de ropa o el lavado de utensilios relacionados con la preparación y consumo de alimentos. También, en los sectores residenciales de alto consumo, se utiliza para calentar piscinas u otros tipos de albercas. Este

calentamiento se realiza utilizando electricidad, gas natural, gas LP y/o leña (utilizada generalmente en zonas rurales).

En algunas zonas rurales el proceso de calentamiento de agua para la higiene personal no es muy aplicado. En primer lugar por el hecho de que son muy escasas las poblaciones que tienen acceso al servicio de gas natural y en segunda medida porque esta actividad resulta costosa si se realiza con la aplicación de energía eléctrica y trabajosa si se hace con leña.

Entendiendo la problemática anteriormente planteada, se ha hecho necesario recurrir a fuentes de energía no convencionales: El calentamiento de agua a través de la energía solar térmica es una alternativa que está logrando una gran implementación, con la energía solar como fuente renovable. Esta aplicación ha tenido un gran aceptación en los últimos años debido a mejoras de la tecnología, reducción de costos, aumento de la eficiencia y manejo de temperaturas más altas de operación. Estos logros se han dado como consecuencia principalmente del apoyo e interés de las administraciones de diferentes países con el interés de encontrar la sostenibilidad energética. Por tanto, asistiendo con este principio y en concordancia con la misión de la Universidad Industrial de Santander en conjunto con la Escuela de Ingeniería Mecánica, se desarrolla y analiza un calentador de agua por energía solar térmica para ducha o regadera, que se implementa en la finca *Villa Elisa* del municipio de La Mesa de los Santos, Santander, para una demanda de 4 a 6 usuarios promedio en un día.

De tal forma, se obtiene un sistema solar térmico moderno que logra satisfacer la necesidad del calentamiento de agua para la zona especificada. Se pretende, a través de esta labor contribuir al uso de energías renovables, que permitan observar su viabilidad económica (por medio de la relación costo/beneficio) en comparación con los sistemas de calentamiento por energía eléctrica y gas natural.

Lo relacionado con este sistema solar térmico se encuentra en el actual libro bajo el siguiente orden:

Capítulo 1, en este capítulo se describe brevemente la clasificación de las energías alternativas desarrollando un énfasis en la energía solar térmica y fotovoltaica y su respectiva normatividad.

Capítulo 2, en este capítulo se hace una descripción general acerca del movimiento solar, la radiación solar y los elementos necesarios para evaluar el potencial solar.

Capítulo 3, en este capítulo se realiza una descripción de las diferentes clasificaciones de los colectores solares y se establece un método para la evaluación de la eficiencia.

Capítulo 4, en este capítulo se realizó el proceso de diseño y el modelo matemático para establecer el comportamiento del sistema solar térmico.

Capítulo 5, en este capítulo se realiza una descripción de los componentes que integran cada subsistema del calentador de agua solar. También, se describe el montaje realizado en zona rural.

Capítulo 6, en este capítulo se describe el montaje y el desarrollo para la realización de pruebas experimentales para determinar el comportamiento del sistema y su validación con el modelo matemático.

Capítulo 7, en este capítulo se realiza una evaluación socio-ambiental y económica. La evaluación socioeconómica se realiza mediante la comparación del VPN de diferentes sistemas de calentamiento.

1. ENERGIA RENOVABLE

Bajo la denominación de energías renovables, alternativas o blandas, se engloban una serie de fuentes energéticas que a veces no son nuevas, como la leña o las centrales hidroeléctricas, ni renovables en sentido estricto (geotermia), y que no siempre se utilizan de forma blanda o descentralizada, y su impacto ambiental puede llegar a ser importante, como los embalses para usos hidroeléctricos o los monocultivos de biocombustibles. Actualmente suministran un 20% del consumo mundial (las estadísticas no suelen reflejar su peso real), siendo su potencial enorme, aunque dificultades de todo orden han retrasado su desarrollo en el pasado.

Con la excepción de la geotermia, la totalidad de las energías renovables derivan directa o indirectamente de la energía solar. Directamente en el caso de la luz y el calor producidos por la radiación solar, e indirectamente en el caso de las energías eólica, hidráulica, mareas, olas y biomasa, entre otras. Las energías renovables, a lo largo de la historia y hasta bien entrado el siglo XIX, han cubierto la práctica totalidad de las necesidades energéticas del hombre. Sólo en los últimos cien años han sido superadas, primero por el empleo del carbón, y a partir de 1950 por el petróleo y en menor medida por el gas natural. La energía nuclear, con 441 centrales nucleares en 2003, con una potencia instalada de 360 GW, cubre una parte insignificante del consumo mundial, y a pesar de algunas previsiones optimistas, su papel será siempre marginal.¹

1.1 FUENTES DE ENERGIA RENOVABLE

Todas las energías renovables son consideradas de origen solar. No obstante, se logra realizar de forma explícita la siguiente clasificación.

1.1.1 Energía solar. Este término se suele utilizar para referirse a las técnicas que utilizan de forma directa la radiación solar (Ver Figura 1).

¹ SANTAMARTA FLOREZ, José. Las energías renovables son el futuro. En: World Watch. Septiembre, 2004, vol. 25, p. 34-35.

La energía solar puede clasificarse en dos tipos: *la solar fotovoltaica* que se encarga de transformar directamente la radiación en electricidad gracias al efecto fotovoltaico y *la solar térmica* que utiliza la capacidad directa de calentamiento del sol...Véase el numeral 1.3...

Figura 1. Central solar de colectores planos



Fuente: <http://ecol-a-t.blogspot.com/2012/08/energia-solar-i.html>

1.1.2 Energía Eólica. Se conoce con el nombre de energía eólica aquella que transforma la energía cinética del viento. La Tierra recibe una cantidad de energía procedente de la radiación solar y, funcionando como si se tratara de una máquina térmica, transforma este calor solar en energía mecánica, la energía cinética del viento. (Ver figura 2).

Para transformar esta energía cinética en energía mecánica aprovechable se utilizan variedad de máquinas eólicas, son todas aquellas máquinas accionadas por el viento logrando clasificar en los aeromotores, si se usa directamente la energía mecánica y en los aerogeneradores, si se acciona un generador eléctrico.

Figura 2. Aerogeneradores de energía eólica



Fuente: <http://aerogeneradores-energia-eolica.blogspot.com>

1.1.3 Energía Geotérmica. “Se conoce por geotermia al calor almacenado en el interior de la tierra, por tanto la energía geotérmica es la que se deriva de este calor que es producido por la desintegración espontánea, natural y continua de los isótopos radioactivos que existen, en muy pequeña cantidad, en todas las rocas naturales”.² El calor se suele transmitir por conducción a través de los materiales del subsuelo, pero a causa de la baja conductividad térmica de los mismos, gran parte de esta energía se almacena en interior de la tierra durante largo tiempo. (Ver figura 3).

1.1.4 Energía Hidráulica. La energía del agua es esencialmente una forma de energía solar: el sol inicia el ciclo hidrológico evaporando las aguas de la Tierra. Más tarde se encarga de calentar el aire que transporta dicho vapor de agua.

² PICÓ HERAS, S. Desarrollo e implantación de energías renovables: situación actual y tendencias. Trabajo de grado de la carrera de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental. Cataluña: Universidad de Cataluña, 2002. 25 p.

Finalmente el agua volverá a caer sobre la superficie terrenal en forma de precipitación mientras se disipa su energía potencial a lo largo de las largas distancias que recorre sobre tierra firme. Es decir, la energía hidráulica aprovecha la energía potencial que aparece en algunos puntos del ciclo evaporación-condensación del agua. (Ver Figura 4).

Figura 3. Planta geotérmica



Fuente: http://en.wikipedia.org/wiki/Nesjavellir_Geothermal_Power_Station

Figura 4. Represa hidroeléctrica



Fuente: <http://somosloquecreemos.blogspot.com/energia-hidraulica-la-fuerza-del-gua.html>

1.1.5 Biomasa. Encontramos varios tipos de biomasa: *la vegetal* que es la producida directamente como consecuencia de la fotosíntesis, *la animal* que es producida mediante el consumo de los seres vivos de la anterior, *la biomasa residual* que se origina a partir de los residuos de producción y de consumo respectivamente de las dos anteriores y *la biomasa fósil* que una vez enterrada y bajo determinados mecanismos químicos o por condiciones físico-químicas producirán los combustibles fósiles. Para usar a la biomasa como fuente de energía se puede optar por dos alternativas, además de para usos domésticos, que son las siguientes: *usar residuos como fuente de biomasa y realizar cultivos energéticos destinados a la producción de energía.*

1.1.6 Energía Mareomotriz. El movimiento periódico y alternativo de ascenso y descenso de las aguas del mar, producido por las acciones del Sol y de la luna, es lo que se conoce como marea.

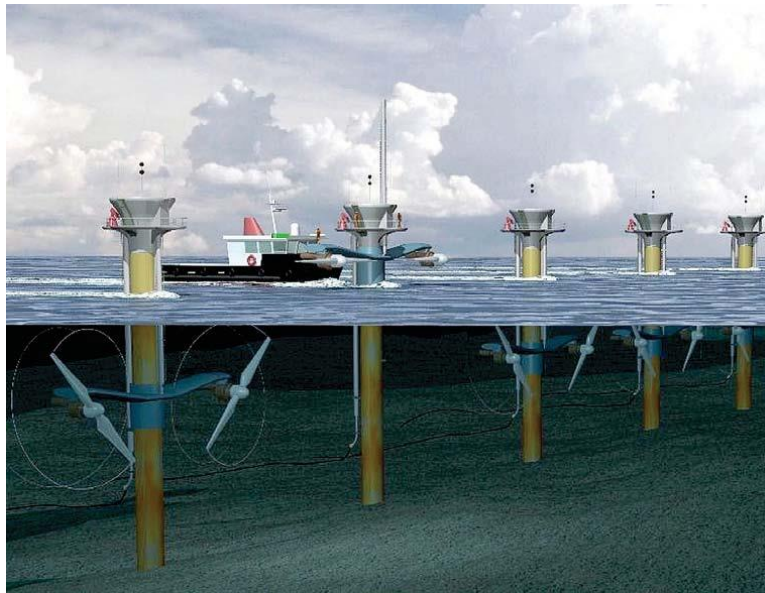
Para lograr aprovechar el potencial energético de las mareas se usan las centrales mareomotrices. Su funcionamiento consiste en retener las aguas en un depósito artificial mientras dura la pleamar y soltarla durante la bajamar. El agua pasa a través de unas turbinas con el fin de generar la energía eléctrica. Las centrales encargadas, se suelen ubicar en los estuarios alrededor de las costas. (Ver figura 5).

1.1.7 Energía Maremotérmica. El mar cubre las tres cuartas partes de la superficie del planeta. Por este motivo, gran parte de la radiación solar incidente se acumula en forma de calor en la superficie de los océanos.

La superficie del mar (capa de entre 100 y 200 m de espesor) funciona como un inmenso colector de calor y asegura el almacenamiento térmico, con temperaturas comprendidas entre los 25 y los 30 °C. Después encontramos una zona donde la temperatura varía muy rápidamente, entre los 200 y los 400 metros de profundidad, actuando como una barrera térmica. Finalmente tenemos una capa de aguas profundas en la que la temperatura decrece progresivamente hasta alcanzar los 4°C

en los 1000 m. y los casi 0°C en los 4000 m. Este gradiente térmico constituye una enorme fuente potencial de energía. No obstante, debemos conocer el rendimiento del proceso de aprovechamiento, que está basado en un ciclo termodinámico: aplicando las condiciones más favorables, gradiente de 30 a 4 °C, obtenemos un rendimiento del 9 %; pero si añadimos los problemas asociados a las distintas eficacias de los elementos de una central mareomotérmica (cambiadore de calor, turbinas, generadore) el rendimiento se reduce al 2-3 %. Como sucede con otros tipos de energías renovable, el bajo rendimiento es un problema asumible debido al gran volumen del “yacimie” energético y a su carácter limpio y respetuoso con el medio ambiente.³

Figura 5. Central mareomotriz



Fuente: <http://www.geo-termia.com/blog/wp-content/uploads/2013/04/mareomotriz01.jpg>

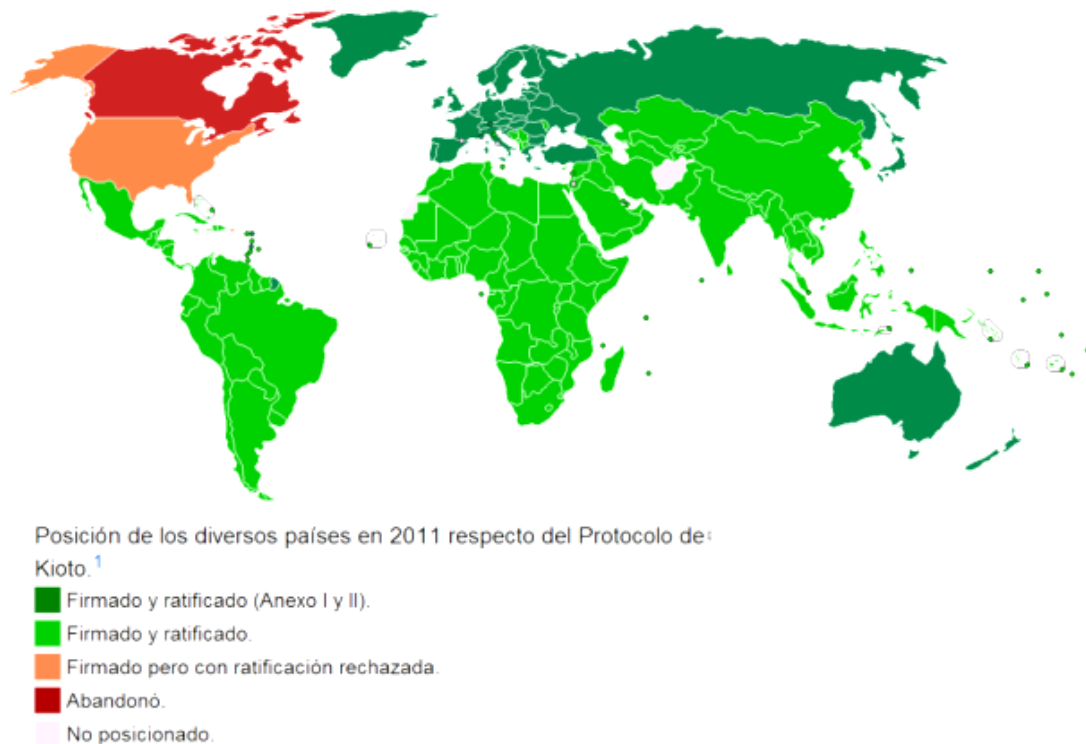
1.2 MARCOS REGULADORES EN EL USO DE ENERGÍA

Algunas organizaciones gubernamentales con el fin de lograr soluciones a muchos de los impactos provocados por el desarrollo industrial han desarrollado algunos acuerdos a nivel global, que luego se ven reflejados en ciertos tratados estatales. Algunos de los tratados son:

³ PICÓ HERAS, S. Desarrollo e implantación de energías renovables: situación actual y tendencias. Trabajo de grado de la carrera de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental. Cataluña: Universidad de Cataluña, 2002. 39 p.

1.2.1 Protocolo de Kyoto sobre el cambio climático. Es un protocolo de la CMNUCC (Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático), y un acuerdo internacional que tiene por objetivo reducir las emisiones de seis gases de efecto invernadero que causan el calentamiento global: *dióxido de carbono* (CO₂), *gas metano* (CH₄) y *óxido nitroso* (N₂O), además de tres gases industriales fluorados: *Hidrofluorocarbonos* (HFC), *Perfluorocarbonos* (PFC) y *Hexafluoruro de azufre* (SF₆), en un porcentaje aproximado de al menos un 5 %, dentro del periodo que va desde el año 2008 al 2012, en comparación a las emisiones al año 1990. El protocolo fue inicialmente adoptado el 11 de diciembre de 1997 en Kioto, Japón, pero no entró en vigor hasta el 16 de febrero de 2005. En noviembre de 2009, eran 187 estados los que ratificaron el protocolo. EE. UU., mayor emisor de gases de invernadero mundial, no ha ratificado el protocolo. (Ver Figura 6).

Figura 6. Posición de los diversos países respecto del protocolo de Kyoto.



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

La decimoctava Conferencia de las Partes (COP 18) sobre cambio climático ratificó el segundo periodo de vigencia del Protocolo de Kyoto desde el 1 de enero de 2013 hasta el 31 de diciembre de 2020. La duración de este segundo periodo del Protocolo será de ocho años, con metas concretas al 2020. Sin embargo, este proceso denotó un débil compromiso de los países industrializados, tales como Estados Unidos, Rusia, Japón y Canadá, los cuales decidieron no respaldar la prórroga.

1.2.2 Convenio de Viena. La comunidad internacional busca adoptar medidas para la recuperación de la capa de ozono mediante este convenio. Algunas de las actividades que se han propuesto a realizar son:

- Realizar Investigación acerca de los procesos físico- químicos que afectan la capa de ozono.
- Indagar sobre 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 medio ambiente.
- Realizar la investigación y búsqueda de soluciones de los efectos que puedan tener la radiación ultravioleta baja (UV-B) sobre los seres vivos debido a la contaminación de la capa de ozono.

1.2.3 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, con el fin de 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 de la misma.

1.2.4 Ley URE 697 del 2001. El gobierno nacional de la república de Colombia expide esta ley en el 2001, con el objetivo de incentivar el uso racional y eficiente de la energía en la comunidad en general.

Todo este proceso está a cargo del ministerio de minas y energía... Véase el numeral 1.5... Los objetivos planteados por este ministerio vos 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 inciten al uso de energías no convencionales dentro del programa de Uso Racional y Eficiente de la Energía.

1.3 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA Y TÉRMICA

Todas las energías renovables son consideradas de origen solar. No obstante, este término se suele utilizar para referirse a las técnicas que utilizan de forma directa la radiación solar.

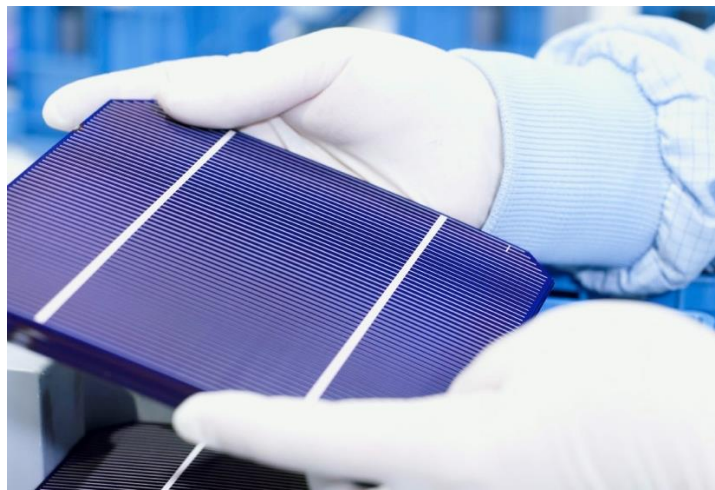
Como se ha mencionado anteriormente la energía solar puede dividirse en dos tipos: la solar fotovoltaica y la solar térmica. Estudiaremos detenidamente estas dos.

1.3.1 Energía solar fotovoltaica. Mediante este tipo de energía renovable se consigue suministrar energía eléctrica a partir células solares que transforman directamente parte de la energía solar. (Ver Figura 7).

Las células solares están formadas por un material semiconductor, en el cual los electrones están poco ligados como para ser arrancados mediante la energía de los fotones incidentes. Por tanto, los electrones pueden circular libremente por el semiconductor, recorriendo el cristal como si se tratara de una carga positiva. Es decir, el fenómeno es el de unos electrones recorriendo la célula solar y el de unos

espacios huecos que son los que quedan cuando el electrón es arrancado. Una vez se ha logrado esto se debe evitar que los enlaces se recompongan a través de la recombinación. Para evitarlo se crea un campo eléctrico interno que separa ambos tipos de cargas: electrones y huecos. Para conseguir este campo interno se suelen modificar las propiedades electroquímicas del semiconductor, formando lo que se conoce como una unión p-n.

Figura 7. Célula solar fotovoltaica



Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa_solar_fotovoltaica

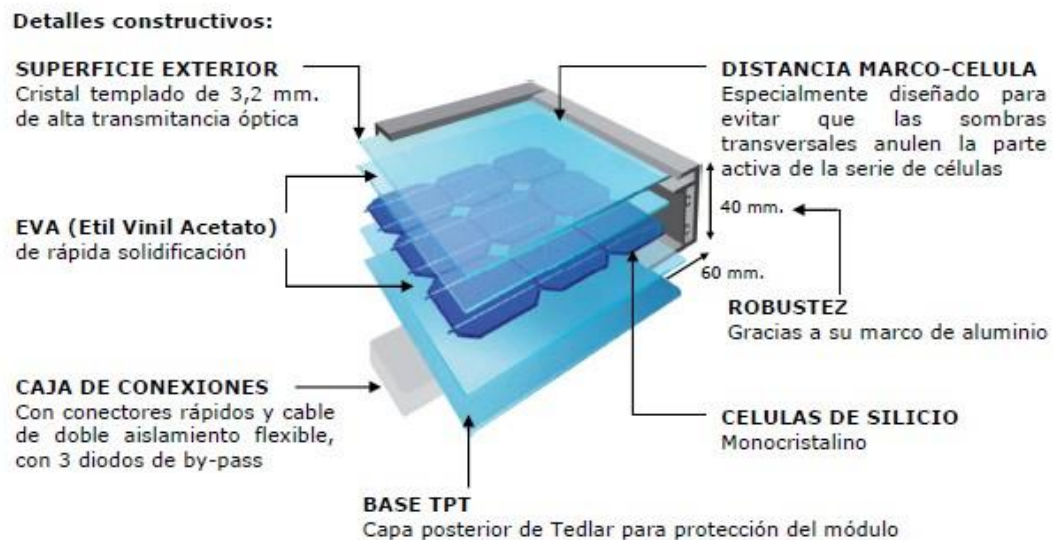
Este tipo de uniones (p-n) se caracterizan por tener una región donde los huecos son abundantes y los electrones escasos, región p, y otra región donde ocurre justamente lo contrario, región n. En la unión de ambas regiones existe un elevado gradiente de ambos tipos de portadores generando que abandonen por difusión la región en que son abundantes, es decir, los electrones hacia la zona p y los huecos hacia la zona n. Esto genera que a ambos lados de la unión p-n se produzca un dipolo eléctrico que da lugar a un campo eléctrico-circulante de la zona n a la zona p. Este campo eléctrico compensa la corriente de difusión explicada antes, y de esta forma se llega a la situación de equilibrio, evitando de este modo la recombinación.⁴

⁴ PICÓ HERAS, S. Desarrollo e implantación de energías renovables: situación actual y tendencias. Trabajo de grado de la carrera de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental. Cataluña: Universidad de Cataluña, 2002. 21 p.

Una célula solar fotovoltaica está constituida generalmente por un disco monocristalino de silicio, de tal manera que una de las superficies sea de tipo n y el substrato de tipo p. De esta manera la unión p-n es paralela al área expuesta a la radiación. Sobre ambas caras de la célula se sitúan dos capas metálicas para que el semiconductor pueda tomar contactos eléctricos. Una de las dos capas metálicas debe tener forma de rejilla para que la luz pueda penetrar en el semiconductor. La corriente fotovoltaica generada sale por el contacto p, atraviesa la carga y vuelve a entrar por el contacto n.

Las células solares son frágiles y generan poca energía, por tanto se precisa agruparlas para producir suficiente energía y proporcionar robustez. La unión de varias células solares da lugar al módulo fotovoltaico, cuyo esquema básico se representa en la Figura 8.

Figura 8. Esquema de modulo fotovoltaico



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

En el siguiente cuadro, se recogen las principales ventajas e inconvenientes de este tipo de fuente de energía renovable. (Ver Cuadro 1).

Cuadro 1. Ventajas e inconvenientes de la energía solar fotovoltaica

Energía solar fotovoltaica	
Ventajas	Inconvenientes
<ul style="list-style-type: none">• Permite llevar la electricidad a núcleos de población aislados.• Tecnología renovable.	<ul style="list-style-type: none">• Peso despreciable en la fabricación de energía respecto a otras fuentes de energía renovable.• Sólo se genera energía en presencia de radiación solar (salvo incorporación de sistemas de acumulación).• Producción eléctrica 6 veces más cara que con centrales de carbón• Costes de generación superiores a los costes de otros sistemas convencionales.• Técnicas de concentración para reducir los costos todavía en fase de desarrollo.

Fuente: Autores

1.3.2 Energía solar térmica. Es la energía que usa la capacidad de calentamiento del sol y se suele clasificar en térmica de alta y térmica de baja temperatura. La primera se suele usar para calentar un fluido que posteriormente moverá una turbina para generar electricidad, la segunda se suele usar para calefacción y agua caliente sanitaria.

Para captar la energía procedente del Sol, se utilizan colectores solares (Ver Figura 9), que son sistemas que permiten la transformación de la radiación solar en energía útil...Véase el numeral 3...

Figura 9. Colector solar



Fuente: <http://www.thermosolar.sk/?run=content&id=319>

En los colectores solares térmicos es donde se produce la transformación de energía, desde una fuente radiante distante a un fluido. Como la radiación incidente no suele llegar concentrada (acostumbra a tener un valor de unos 1000 wattios/m²) y como las longitudes de onda son muy cortas, se producen unos problemas diferentes a los típicos de intercambio de calor.

De todos los colectores existentes el más usado es el colector plano. Un colector plano suele constar de varias cubiertas transparentes, una superficie de absorción, tubos o un circuito impreso por el que circula el fluido y todo ello ubicado dentro de una caja aislada térmicamente, tanto por la parte posterior como por las partes laterales. El concepto se basa en que una placa plana, supuestamente tomada como si se tratara de un cuerpo negro, absorbe la energía solar de la radiación que logre incidir sobre ella. Todas las placas tienen una determinada absorción, o factor de absorción, que es un dato incluido en todos los colectores comerciales. La absorción final que tiene la placa es el resultado de multiplicar la energía incidente sobre la misma por el factor de absorción.

El proceso se complica porque al recibir la placa esta energía térmica se calentará, aumentando la temperatura y emitiéndola al medio a su vez. Para evitar esta pérdida se utilizan los cristales de la cubierta, produciéndose un “efecto invernadero”, es decir, los cristales permiten el paso de casi la totalidad del espectro solar y, en cambio, retienen la mayor parte de las radiaciones que emite la placa. Para evitar esta fuga de energía se colocan los cristales mencionados, pero no son totalmente claros, en ellos se refleja, emite y absorbe parte de la energía incidente, por lo que el rendimiento de la transformación de la energía no es del 100 %.

Los colectores planos suelen ser eficaces cuando trabajan a temperaturas medias de 60°C, es decir, son los que se suelen usar para la energía solar térmica de baja temperatura y por tanto funciones de climatización de piscinas, agua caliente sanitaria y calefacción que puede llegar a representar más de una décima parte del consumo.

Pese que a diferencia de otras tecnologías convencionales para calentar el agua, las inversiones iniciales son elevadas, requieren un periodo de amortización de entre 5 y 7 años, como después los gastos de mantenimiento son bajos y el combustible gratuito, con una vida útil de en promedio 20 años, la solar térmica de baja es tecnológicamente viable comercialmente, existiendo diversos fabricantes y un mercado interesante aunque poco estimulado. “Para conseguir la estimulación de dicho mercado, la solución pasa, como siempre, por fomentar las ayudas por parte de la administración y el avance de algunas políticas (como la de instalar colectores solares planos en las viviendas de nueva construcción)”⁵.

⁵ PICÓ HERAS, S. Desarrollo e implantación de energías renovables: situación actual y tendencias. Trabajo de grado de la carrera de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental. Cataluña: Universidad de Cataluña, 2002. 21 p.

Cuando se requieren temperaturas altas se acude a los colectores de concentración, los cuales pueden presentar temperaturas de trabajo desde 110 a 3600 °C. Los colectores de concentración están formados a partir de sistemas ópticos de reflexión que concentran las radiaciones solares en un punto focal óptico –para el caso de los concentradores esféricos o parabólicos- o en un eje focal –para los de tipología cilíndrica o cónica-.

En el siguiente cuadro se recogen los aspectos más destacados en relación a la energía solar térmica:

Cuadro 2. Aplicaciones, ventajas e inconvenientes de la energía solar térmica

Energía solar térmica			
	Aplicaciones	Ventajas	Inconvenientes
Baja temperatura	<ul style="list-style-type: none"> • Agua caliente sanitaria • Climatización piscinas • Calefacción 	<ul style="list-style-type: none"> • Bajos costos de mantenimiento • Combustible ilimitado • Comercialmente viable 	<ul style="list-style-type: none"> • Inversión inicial elevada • Periodo de amortización entre 5 y 7 años
Alta temperatura	<ul style="list-style-type: none"> • Generación Eléctrica • Cocinas Solares 		<ul style="list-style-type: none"> • Elevados Costos de inversión

Fuente: Autores

1.4 DESARROLLO DE LA ENERGIA SOLAR EN COLOMBIA

Los logros colombianos en el desarrollo de la energía solar son aún modestos y el desarrollo actual no pertenece al potencial de varias fuentes, ni tampoco, a las posibilidades de un desarrollo local, que permita al país realizar tecnologías energéticas libres de las tradicionales dependencias de tecnologías foráneas.

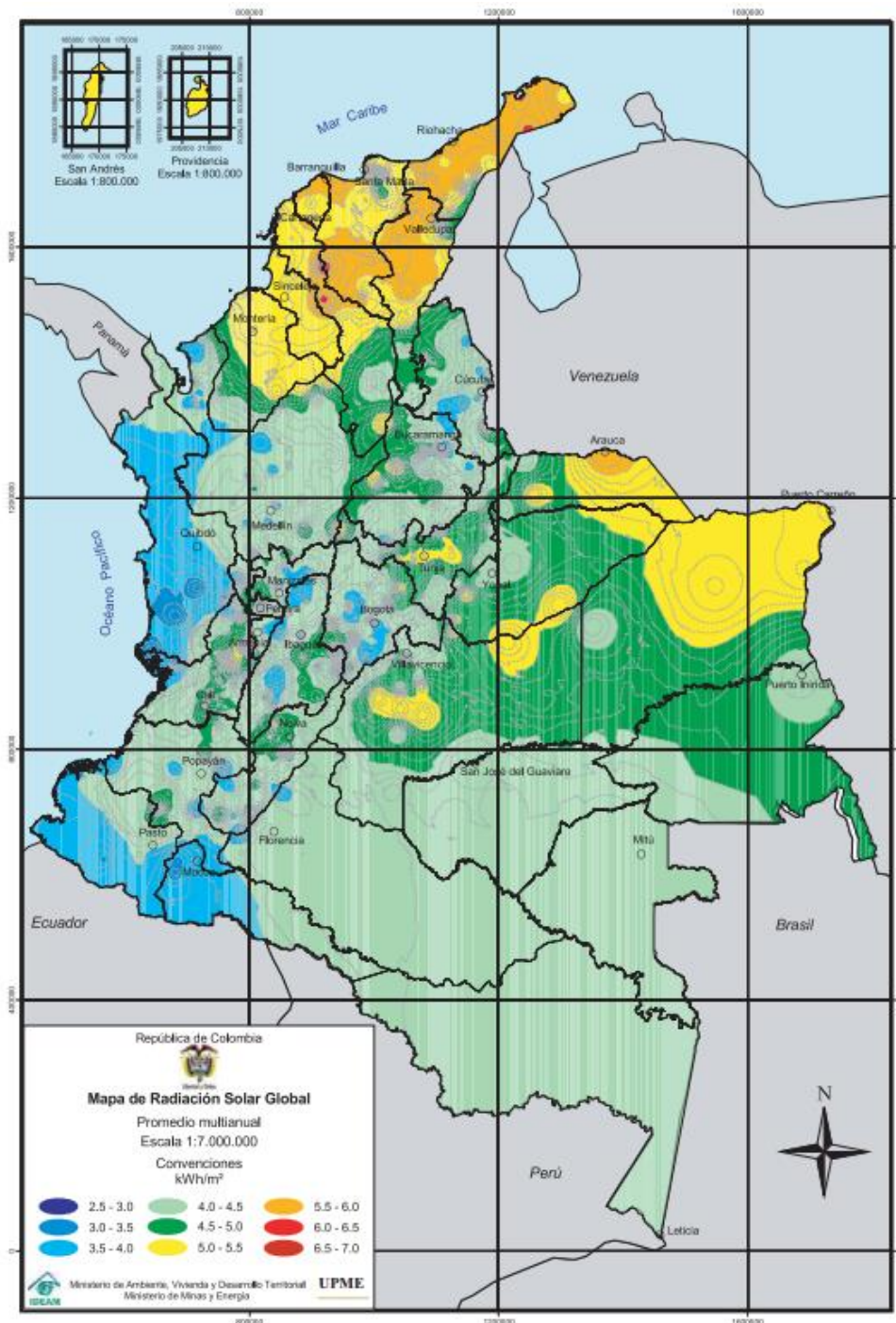
Se ha perdido tiempo, lo que hace que, si bien equipos desarrollados en los 80 causaban sorpresa en el país y en el exterior, no son actualmente ni medianamente comparables a los desarrollados en otras naciones y probablemente no serían competitivos frente a los productos extranjeros.

La evaluación del potencial solar de Colombia se ha realizado empleando principalmente información de estaciones meteorológicas del IDEAM (Instituto de Estudios Ambientales). El más reciente atlas solar colombiano ilustra una aproximación de promedios anuales diarios de la cantidad de energía de la radiación solar que incide por metro cuadrado de superficie horizontal sobre el territorio colombiano. (Ver Figura 10). Donde se puede observar que en el territorio colombiano existe suficiente recurso solar para orientar más fuertemente la política de investigación y desarrollo en energías renovables, esto lo hace evidente M. Sc Humberto Rodríguez ⁶ quien afirma “Si se tiene en cuenta que el máximo mundial es de aproximadamente 2 500 kWh/m, el potencial en Colombia en relación con este máximo varía entre 58 % en la Costa Pacifico y 84 % en la Guajira. Pero más importante aún que los valores es que la variación mensual de la radiación global frente a la media anual es pequeña comparada con las variaciones de otras regiones del mundo, lo que permite que los sistemas de acumulación de energía sean de capacidad reducida.”

1.4.1 Fuentes Fotovoltaicas. La generación de electricidad empleando sistemas fotovoltaicos ha estado siempre orientada al sector rural, en donde los altos costos de generación originados por los combustibles, y los costos de Operación y Mantenimiento en las distantes zonas remotas, hacen que la generación solar fotovoltaica resulte más económica en el largo plazo y confiable.

⁶ RODRÍGUEZ MURCIA, Humberto. Desarrollo de la energía solar en Colombia y sus perspectivas. En: Revista de ingeniería. Universidad de los Andes. Noviembre, 2008, vol. 28, p. 83-89.

Figura 10. Cantidad de energía de la radiación solar que incide por metro cuadrado de superficie horizontal sobre el territorio colombiano.



Fuente: INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIO AMBIENTAL y UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA. Atlas de radiación solar de Colombia promedio multianual. Escala 1:7.000.000. Bogotá: IDEAM y UPME, 2005.

Esta labor nace con el Programa de Telecomunicaciones Rurales de Telecom a comienzos de los años 80, con la asistencia técnica de la Universidad Nacional. En este programa se instalaron pequeños generadores fotovoltaicos de 60 Wp (Wp: vatio pico) para radioteléfonos rurales y ya en 1983 habían instalados 2.950. Pronto se avanzó a sistemas de 3 a 4 kWp para las antenas satelitales terrenas. Estos sistemas son hoy esenciales para las telecomunicaciones rurales del país. Según un estudio realizado⁷, entre 1985 y 1994 se importaron 48.499 módulos solares para una potencia de 2.05 MWp. De estos 21.238 módulos con una potencia de 843.6 kW en proyectos de telecomunicaciones y 20 829 módulos con 953.5 kWp en electrificación rural. El estudio anterior también indicó, sobre una muestra de 248 sistemas (con 419 módulos), que 56% de los sistemas funcionaban sin problemas, 37% funcionaban con algunos problemas y 8% estaban fuera de servicio. Estos problemas, que actualmente persisten, están relacionados con la falta de mínimo mantenimiento, suministro de partes de reemplazo (reguladores y lámparas) y sistemas sub-dimensionados. Indican, además, la importancia que tiene el asegurar la sostenibilidad del suministro del servicio de energía para los usuarios.

En los programas de electrificación rural, el sistema convencional para hogares aislados ha constado de un panel solar de 50 a 70 Wp, una batería entre 60 y 120 Ah y un regulador de carga. Estos pequeños sistemas suministran energía para iluminación, radio y TV, cubriendo las necesidades realmente básicas de los campesinos. El costo actual de este sistema es del orden de US\$ 1200 a 1500, afectado principalmente por los elevados costos de instalación en las zonas remotas.⁸

En últimos años, se han instalado en mayor proporción sistemas en los programas de electrificación rural, con financiación del Estado, haciendo uso actualmente de

⁷ INSTITUTO DE CIENCIAS NUCLEARES Y ENERGÍAS ALTERNATIVAS (INEA). Evaluación de sistemas fotovoltaicos en Colombia. Bogotá, INEA, 1995. p.35, p. 85-94.

⁸ RODRÍGUEZ MURCIA, Humberto. Desarrollo de la energía solar en Colombia y sus perspectivas. En: Revista de ingeniería. Universidad de los Andes. Noviembre, 2008, vol. 28, p. 86.

recursos como el FAZNI (Fondo de Apoyo Financiero para la Energización de las Zonas No Interconectadas).

El mercado de sistemas solares fotovoltaicos tuvo su auge a finales de los años ochenta con el programa de telecomunicaciones rurales de Teleco; las dificultades de orden público de la década de 90 frenaron el desarrollo del mercado, que aún se puede estimar en el orden de 300 kW por año. La generación de electricidad con energía solar tiene, entonces, diversas y necesarias perspectivas, teniendo en cuenta que en Colombia hay más de 1 millón de familias carecen del servicio de energía eléctrica en el sector rural.

1.4.2 Fuentes Térmicas. En Colombia a mediados del siglo pasado, fueron instalados en Santa Marta los primeros calentadores solares en las casas de los empleados de las bananeras. Luego, hacia los años sesenta, se instalaron calentadores en la Universidad Industrial de Santander se instalaron calentadores solares domésticos de origen Israelí para evaluar su comportamiento. Posteriormente, hacia finales de los setenta e influenciados por la crisis del petróleo de 1973, diferentes universidades (la Universidad de los Andes, la Universidad Nacional en Bogotá, la Universidad del Valle, entre otras) y fundaciones (como la Fundación centro experimental las Gaviotas) crean pautas para instalar calentadores solares domésticos y grandes sistemas de calentamiento de agua para uso en centros de servicios comunitarios (hospitales y cafeterías).

Estos sistemas tuvieron su máxima expresión a mediados de los ochenta en la aplicación masiva de calentadores en urbanizaciones en Medellín (Villa Valle de Aburrá) y Bogotá (Ciudad Tunal, Ciudad Salitre). Fueron instalados miles de calentadores, desarrollados y fabricados por el Centro experimental Las Gaviotas. A mediados de los ochenta surgieron compañías en Bogotá, Manizales y Medellín que fabricaron e instalaron miles de calentadores solares.

Los calentadores solares para uso residencial a mediados de los ochenta y noventa tenían un costo equivalente a US\$1000 por sistema (tanque de 120 litros, 2 m² de colectores solares), es decir, representaban una inversión inicial medianamente alta, las instituciones como el antiguo Banco Central Hipotecario, estimo que era más económico emplear calentadores solares que emplear electricidad para calentar agua. Pero posteriormente se introduce un energético más económico, el gas natural, desplazando del mercado esta industria desde mediados de los noventa hasta la actualidad. Como revela estudio⁹, el desarrollo alcanzado hasta 1996 indicaba que se habían instalado 48.901 m² de calentadores solares, principalmente en Medellín y Bogotá, y en barrios con financiación del Banco Central Hipotecario.

La mayoría de los sistemas funcionaban bien, aunque se ha entendido que la demanda era superior a la capacidad de los mismos. Actualmente se han realizado pocos estudios o evaluaciones sobre cómo se han comportado los sistemas instalados, sin embargo, se sabe como ejemplo que el calentador de la antigua sede de la Empresa de Energía de Bogotá lleva más de 30 años suministrando agua caliente.

1.5 NORMATIVIDAD DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA Y TERMICA EN COLOMBIA

Se presenta un resumen de la normatividad vigente en Colombia para sistemas de energía solar, según las normas técnicas colombianas publicadas por el ICONTEC. Se distinguen dos grupos de normas: aquellas que tratan sobre sistemas de energía solar térmica y el otro grupo de las normas que tratan sobre sistemas fotovoltaicos...Véase el numeral 1.3...

⁹ INSTITUTO DE CIENCIAS NUCLEARES Y ENERGÍAS ALTERNATIVAS (INEA). Evaluación de sistemas solares de calentamiento de agua. Bogotá, INEA, 1996. p.50-53.

Las normas están agrupadas por categorías temáticas: sistemas solares para calentamiento de agua, sistemas fotovoltaicos y eficiencia. Una parte de las normas sobre colectores solares fue publicada a comienzos de los 90's, mientras que las normas sobre sistemas fotovoltaicos comenzaron a publicarse a partir del 2005.

1.5.1 Normatividad de sistemas solares térmicos.

1.5.1.1 NTC 2774, Evaluación de materiales aislantes térmicos empleados en colectores solares. Esta norma establece una metodología de ensayo para evaluar algunas propiedades de los materiales aislantes térmicos empleados en colectores solares con razones de concentración menores que 10. Las propiedades en cuestión son: pH, características de ignición de la superficie, absorción de humedad, absorción de agua, resistencia térmica, contracción o dilatación lineal, rendimiento con la superficie caliente y envejecimiento acelerado.

1.5.1.2 NTC 3322, Sellos de caucho usados en colectores solares de placa plana. Esta norma especifica los requisitos generales que deben cumplir los sellos de caucho empleados en colectores solares de placa plana, a excepción de los colectores pasivos instalados verticalmente.

La norma inicia con una clasificación de los sellos de caucho según su tipo, grado de dureza o clase. Seguidamente se listan una serie de requisitos que deben cumplir estos sellos y más adelante se hacen anotaciones sobre las dimensiones de los sellos (que no deben presentar deformación mayor a un 25%) y se establecen los métodos de ensayo para cada material.

1.5.1.3 NTC 3507, Instalación de sistemas domésticos de agua caliente que funcionan con energía solar. Esta norma establece los requisitos mínimos que se deben cumplir para la instalación de sistemas de calentamiento de agua que funcionan con energía solar, aplicables a sistemas domésticos autónomos, para el suministro de agua caliente en edificios residenciales.

1.5.1.4 NTC 5291, Sistemas de calentamiento solar doméstico de agua (transferencia de calor de un líquido a otro). Esta norma trata sobre el desempeño, durabilidad y seguridad de los sistemas integrados de calentamiento solar doméstico de agua, diseñados para uso en edificaciones pequeñas.

1.5.1.5 NTC 5434, Parte 1 y 2. Colectores solares. Esta norma especifica los requisitos de durabilidad (incluyendo resistencia mecánica), confiabilidad y seguridad de los colectores solares para calentamiento de líquidos. Además, incluye las disposiciones para la evaluación de conformidad de dichos requisitos.

1.5.2 Normatividad de sistemas solares fotovoltaicos.

1.5.2.1 NTC 2883, Módulos fotovoltaicos (fv) de silicio cristalino para aplicación terrestre. Calificación del diseño y aprobación de tipo.

Hace referencia a los requisitos establecidos para la calificación del diseño y la aprobación del tipo de módulos fotovoltaicos para aplicación terrestre y para la operación en largos periodos de tiempo en climas moderados (al aire libre), según lo define la norma IEC 60721-2-1. Y su uso principal es en módulos fotovoltaicos que utilicen tecnologías en silicio cristalino.

1.5.2.2 NTC 5464, Módulos fotovoltaicos de lámina delgada para uso terrestre. Calificación del diseño y homologación. Indica los requisitos, según la norma IEC 721-2-1, para la clasificación del diseño de los sistemas de módulos fotovoltaicos de lámina delgada, que son diseñados principalmente para operar en largos periodos de tiempo y en climas moderados (al aire libre). La tecnología en la cual se basa es la de silicio amorfo pero también puede ser aplicable a otros módulos fotovoltaicos de lámina delgada.

1.5.2.3 NTC 5549, Sistemas fotovoltaicos terrestres. Generadores de potencia. Generalidades y guía. Esta norma brinda una visión general de los sistemas fotovoltaicos (fv) terrestres generadores de potencia y de los elementos funcionales que los constituye.

1.5.2.4 NTC 5287, Celdas y baterías secundarias para sistemas de energía solar fotovoltaica. Requisitos generales y métodos de ensayo. Esta norma suministra la información necesaria referente a los requisitos de las baterías que se utilizan en los sistemas solares fotovoltaicos y de los métodos de ensayo típicos utilizados para verificar la eficiencia de las baterías. No se incluye información acerca del tamaño de las baterías, el método de carga o al diseño en sí de los sistemas solares fotovoltaicos.

1.5.2.5 NTC 5433, Informaciones de las hojas de datos y de las placas de características para los módulos fotovoltaicos. La norma contiene información acerca de la configuración de sistemas con módulos fotovoltaicos para garantizar que estén constituidos de una manera óptima y segura.

Para esto se requiere información de los materiales por los que está constituido el modulo fotovoltaico, como es el funcionamiento eléctrico, características térmicas, clasificación de potencia y tolerancias de producción

y algunos valores característicos para la integración de sistemas (tensión de circuito abierto y corriente inversa).

1.5.2.6 NTC 5627, Componentes de acumulación, conversión y gestión de energía de sistemas fotovoltaicos. Calificación del diseño y ensayos ambientales.

La actual norma establece algunos requisitos para la clasificación del diseño, de los componentes de acumulación, conversión y gestión de energía de sistemas fotovoltaicos. Se centra principalmente en componentes solares específicos tales como baterías, inversores(onduladores), controladores de carga, conjuntos de diodos, radiadores, limitadores de tensión, cajas de conexiones y dispositivos de rastreo del punto de máxima potencia, pero puede aplicarse a otros componentes complementarios del sistema.

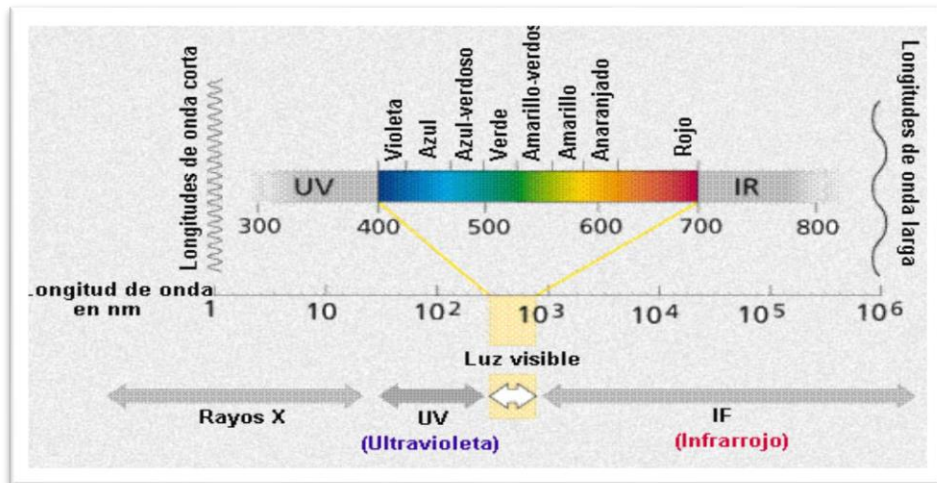
2. ENERGIA SOLAR

Es el conjunto de radiaciones electromagnéticas emitidas por el sol, el cual se comporta como un cuerpo negro el cual emite energía siguiendo la ley de Planck a una temperatura media de 6000 K.

2.1 GENERALIDADES DE LA ENERGIA SOLAR

El sol es una fuente de energía de la cual nuestro planeta depende, ya que abastece de energía a las plantas, animales, y en general a todos los ecosistemas. El hombre por medio de mecanismos transforma dicha energía proveniente del sol en energía útil ya sea para calentar algo o para generar electricidad. Esta energía es obtenida a partir del aprovechamiento de la radiación solar (o radiación electromagnética), que alcanza a la tierra.

Figura 11. Espectro electromagnético

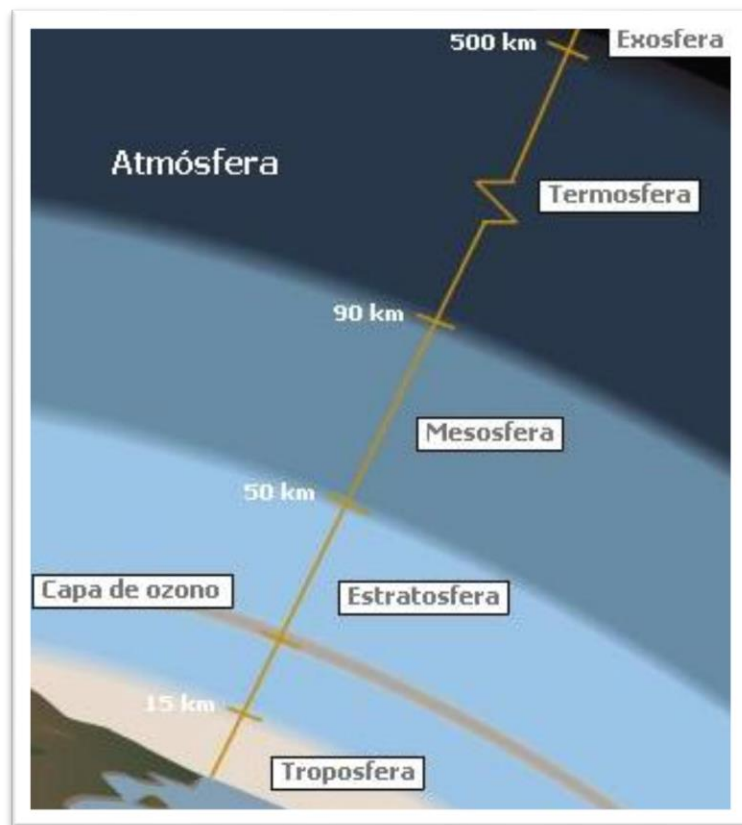


Fuente: http://www.oni.escuelas.edu.ar/2002/buenos_aires/radiacion.

Desde el punto de vista de distribución espectral (ver Figura 11), la radiación solar se divide en tres regiones según la longitud de onda λ : la región ultravioleta UV ($\lambda < 400$ nm), la región visible ($400 < \lambda < 750$ nm) y la región infrarroja IR ($\lambda > 750$ nm).

La región ultravioleta o radiación ultravioleta se divide en tres tipos más: tipo A (315-400 nm), tipo B (280-315 nm) y tipo C (100-280). Sin embargo no toda la radiación electromagnética alcanza la superficie de la Tierra, debido a la capa de ozono y a diversas partículas presentes en las distintas capas de la atmosfera terrestre (Ver figura 2), que permiten por un lado absorber o reflejar la radiación, y por otro lado penetrar y tocar la superficie terrestre.

Figura 12. Capas de la atmosfera terrestre



Fuente: <http://ficus.pntic.mec.es/vfem0006/hotpot/rhibrida.htm>.

Aproximadamente el 99% de la energía solar incidente en la superficie de la tierra se le llama radiación de onda corta (0.3 nm a 3.5 nm). La radiación global que llega a la superficie terrestre se expresa a partir de tres componentes: radiación directa, radiación difusa y radiación reflejada.

La irradiancia es la unidad que mide la relación de la energía por unidad de tiempo que toca una superficie. Para aprovechar de forma eficiente dicha energía, se debe tener en cuenta la incidencia solar que nos permite determinar la geometría que direcciona los rayos solares, permitiendo el cálculo de la radiación total en función de un determinado plano perpendicular a los rayos solares, o un plano inclinado no perpendicular a los rayos solares. Por lo tanto es de suma importancia conocer el ángulo de incidencia θ respecto a una determinada superficie.

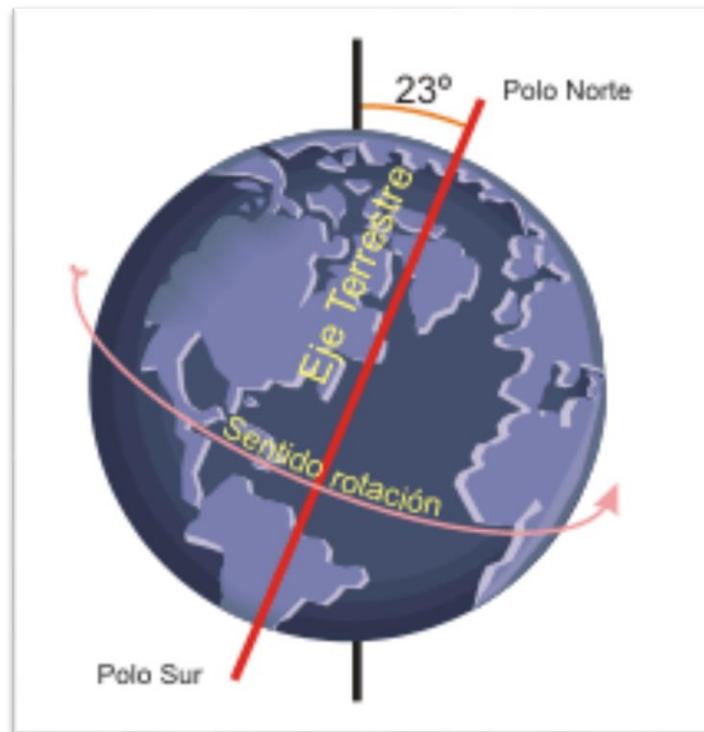
2.2 DETERMINACION DEL ANGULO DE INCIDENCIA θ DE LA RADIACION SOLAR RESPECTO A UNA SUPERFICIE

Este proceso depende de muchos parámetros dependientes del movimiento de la tierra y dependientes de la ubicación sobre la tierra.

2.2.1 Factores dependientes del movimiento de la tierra. La tierra está sometida a diversos movimientos, de los cuales los principales están referenciados al sol, y son los siguientes:

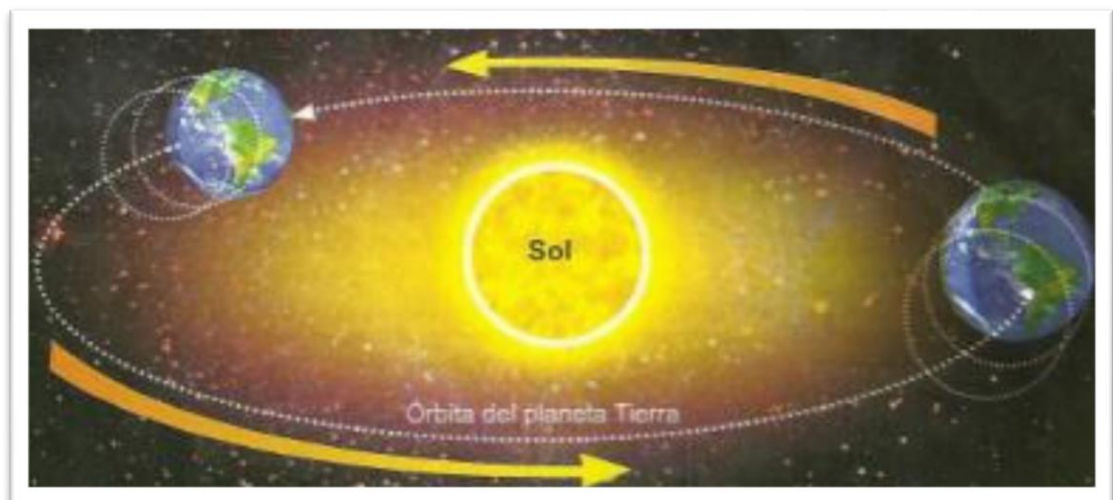
- **Movimiento de Rotación:** Es el movimiento en el cual la tierra gira alrededor del eje terrestre entre el polo sur magnético y el polo norte magnético, en sentido oeste a este. (Ver figura 13).
- **Movimiento de Traslación:** Es el movimiento por el cual el planeta tierra gira en una órbita elíptica alrededor del sol. (Ver figura 14).
- **Movimiento de precesión:** Es el cambio lento y gradual de la orientación del eje de rotación de la tierra. (Ver figura 15).
- **Movimiento de Nutación:** Es un movimiento de precesión acompañado de una oscilación del eje de rotación. (Ver figura 15).

Figura 13. Rotación terrestre



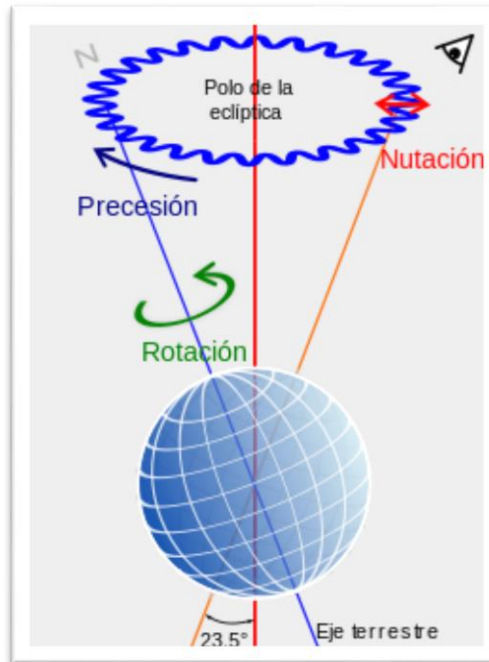
Fuente: <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:RotacionTerrestre.png>.

Figura 14. Movimiento de traslación de la tierra



Fuente: <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:RotacionTerrestre.png>.

Figura 15. Movimiento de precesión y nutación



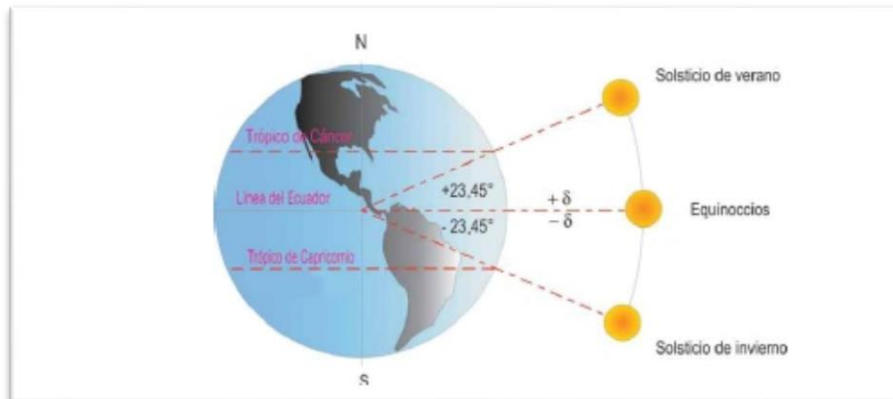
Fuente: Wikipedia, enciclopedia libre.

En el estudio de la radiación solar respecto a una superficie se tienen en cuenta con mayor importancia, los movimientos de rotación y traslación de la tierra ya que permiten determinar el ángulo de declinación [δ] y el ángulo de inclinación horaria [ω].

2.2.1.1 Ángulo de declinación [δ]. Es la posición angular del sol, al medio día solar, con respecto al plano del ecuador. Debido al movimiento de traslación de la tierra, este ángulo varía en todo su recorrido desde -23.5° (21 de diciembre) a 23.5° (21 de junio) aproximadamente (Ver figura 16).

Debido a que el ángulo de declinación varía conforme la tierra realiza su movimiento de traslación, un observador localizado en la tierra vea que la dirección de los rayos solares varía durante todo el año.

Figura 16. Angulo de declinación



Fuente: Wikipedia.

Para calcular el ángulo de declinación en cualquier momento del año se utiliza la siguiente expresión sencilla:

$$\delta = 23,45 * \sin\left(360 * \frac{284 + n}{365}\right) [1]$$

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

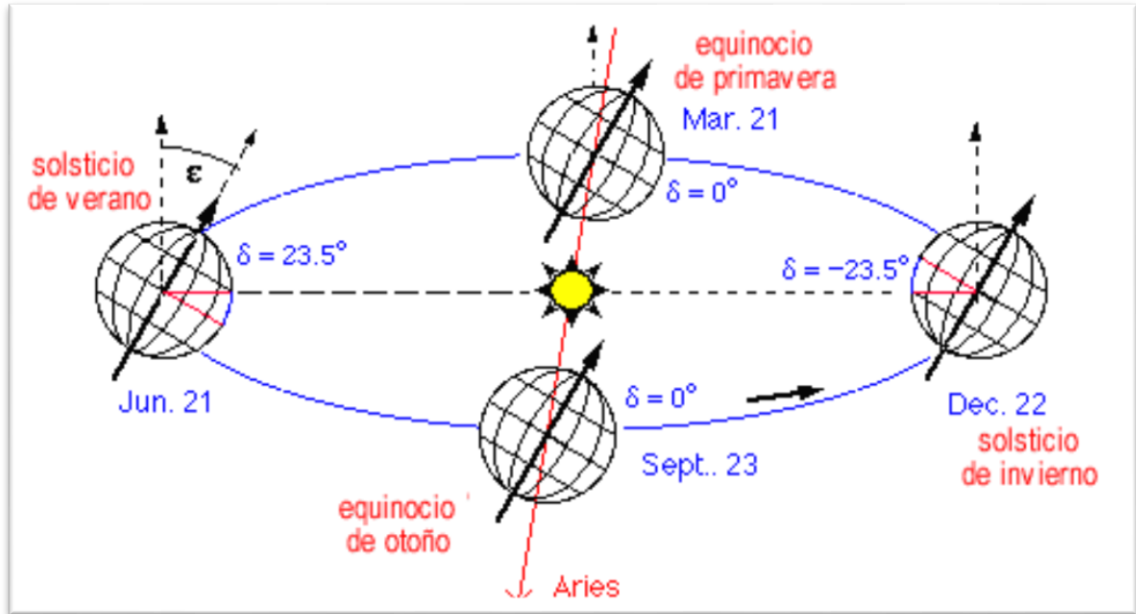
En la Figura 17 se puede ver como varia el ángulo de declinación en función de distintas épocas del año.

2.2.1.2 Angulo de inclinación horaria [ω]. Este ángulo depende de la rotación terrestre y mide el desplazamiento angular del sol respecto al medio día solar, tomando valores negativos en las horas de la mañana y valores positivos en las horas de la tarde. Una hora solar equivale a 15° (360°/24 horas) como se aprecia en la Figura 18.

Para determinar el ángulo de inclinación horaria se puede usar la siguiente ecuación que nos da el ángulo en grados [°]. Esta ecuación está en función de la hora, minutos y segundos para ser más exacta.

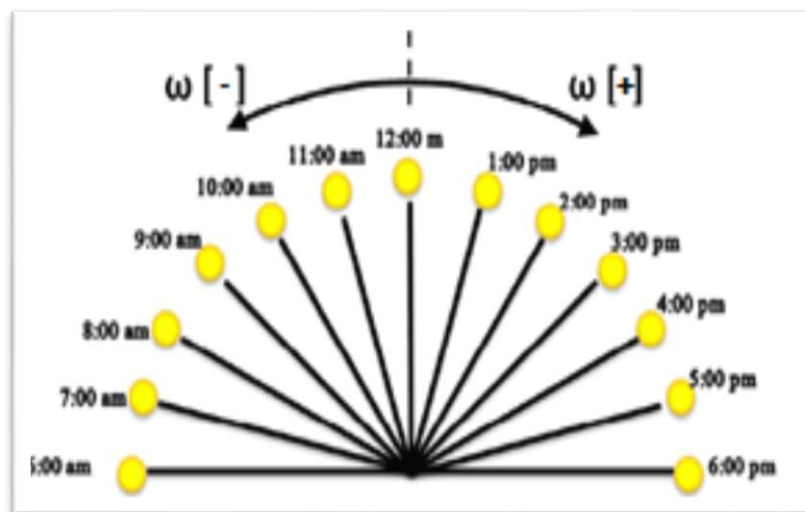
$$\omega = 15 * \left(\left(hora + \frac{min}{60} + \frac{seg}{3600} \right) - 12 \right) [2]$$

Figura 17. Angulo de declinación para distintas épocas del año



Fuente: personales.unican.es/gonzalmi/ssolar/articulos/movapsol.html.

Figura 18. Angulo de inclinación horaria



Fuente: Modificada por autores

2.2.2 Factores dependientes de la ubicación de la tierra. La ubicación, orientación e inclinación de un plano son factores importantes que influyen en el estudio de la irradiación para una determinada área o superficie. Por lo tanto los factores que afectan la radiación solar sobre una superficie orientada, ubicada e inclinada son:

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

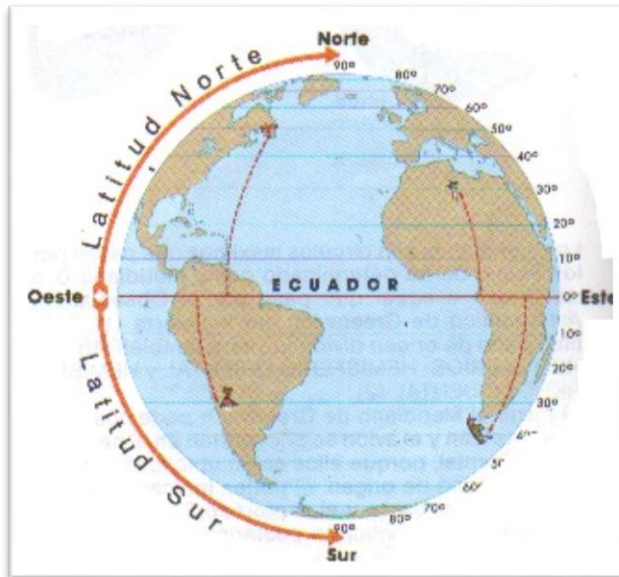
2.2.2.1 Latitud terrestre (φ). Es el ángulo entre la línea ecuatorial, y un punto determinado de la tierra medido a lo largo del meridiano en el que se encuentre dicho punto. La latitud puede estar orientada hacia el Sur o hacia el Norte según si está por encima del paralelo del ecuador (latitud norte) o si está por debajo de este (latitud sur). La latitud se mide en grados sexagesimales, entre -90° y 90° , donde el signo [-] significa latitud sur, y el signo [+] significa latitud norte (Ver Figura 19).

2.2.2.2 Angulo de inclinación superficial (β). Es el ángulo formado entre la superficie horizontal y la superficie captadora o colectora (Ver Figura 20).

2.2.2.3 Azimut de la pared (γ_p). Es el ángulo formado entre la línea Norte-Sur y la proyección horizontal de la normal de la superficie colectora. Se toma como positivo desde el sur hacia el oeste y como negativo desde el sur hacia el este (Ver figura 21).

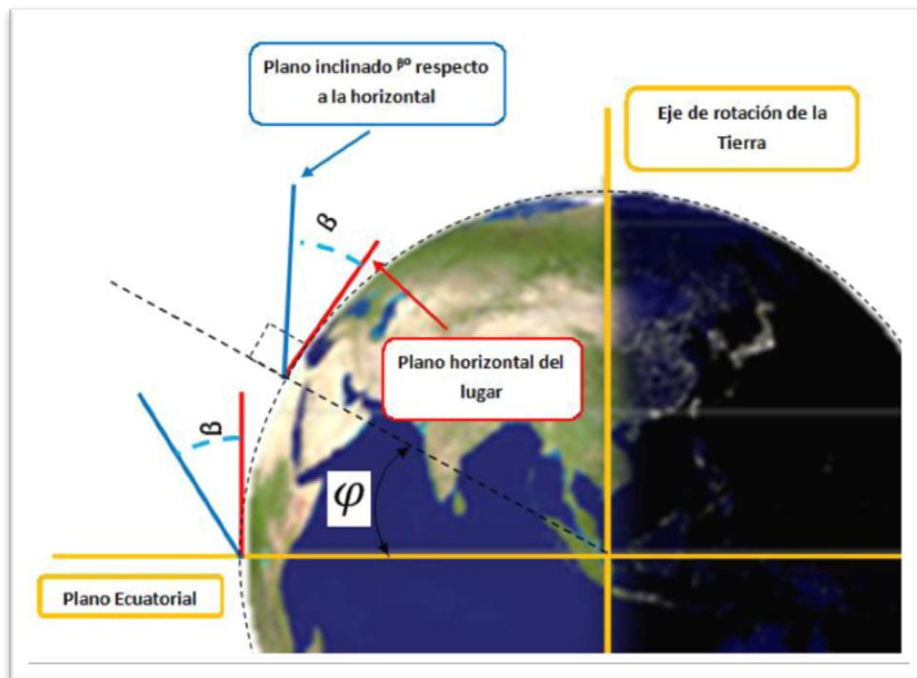
2.2.2.4 Azimut solar (γ_s). Es el ángulo formado entre la línea Norte-Sur y la proyección horizontal de la dirección de la radiación solar. (Ver figura 21).

Figura 19. Latitud terrestre



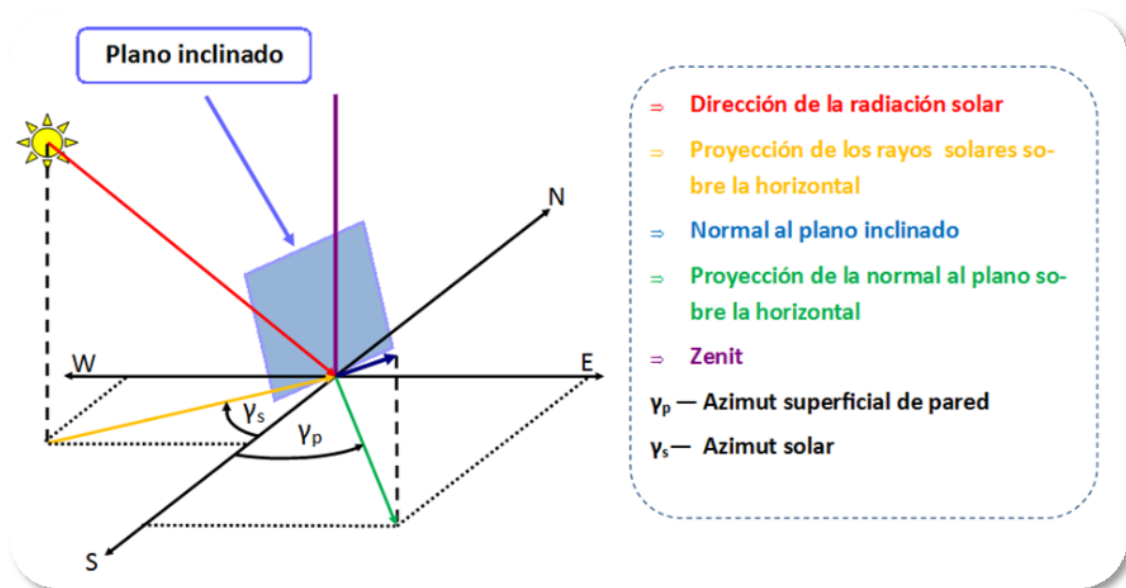
Fuente: <http://www.profesorenlinea.cl/geografiagraf/Coordenadasgeog.htm>.

Figura 20. Inclinación de una superficie respecto a la horizontal



Fuente: Wikipedia, modificada por los autores.

Figura 21. Azimut solar y de la pared para una superficie inclinada



Fuente: JAIMES, Nelson Eduardo y RIVERO, Sergio Armando. Diseño y construcción de un colector solar de tubos de vacío. Trabajo de grado de Ingeniería Mecánica. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander 2012. 34 p.

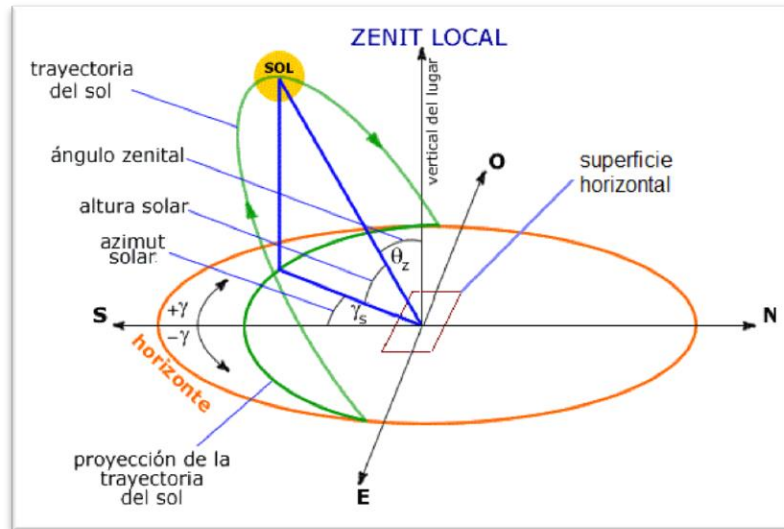
2.2.3 Cálculo del ángulo de incidencia θ de la radiación solar para diferentes superficies. El ángulo de incidencia de la radiación solar es el formado entre la normal al plano de la superficie y la dirección de la radiación solar. Dicho ángulo se puede tomar con referencia al eje vertical (zenit) y se conoce con el nombre de ángulo cenital (θ_z). El ángulo de incidencia se puede determinar para tres situaciones diferentes:

- Superficies horizontales, las cuales no tienen declinación ($\beta = 0$).
- Superficies inclinadas orientadas hacia el sur ($\beta \neq 0 \Rightarrow \gamma_p = 0$).
- Superficies inclinadas con cualquier orientación ($\beta \neq 0 \Rightarrow \gamma_p \neq 0$).

2.2.3.1 Superficies horizontales. Para una superficie horizontal el ángulo de incidencia de la radiación solar es igual al ángulo cenital ($\theta = \theta_z$), ya que el ángulo de inclinación de la superficie es cero y la normal de la superficie es el mismo eje vertical o zenit. Por lo tanto el ángulo de incidencia de la radiación solar es independiente del azimut de la pared (γ_p), y es función de la declinación, el ángulo horario y la latitud ($\theta_z = f(\delta, \omega, \varphi)$) (Ver figura 22).

$$\cos \theta_z = \sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos \omega \quad [3]$$

Figura 22. Angulo cenital de una superficie horizontal



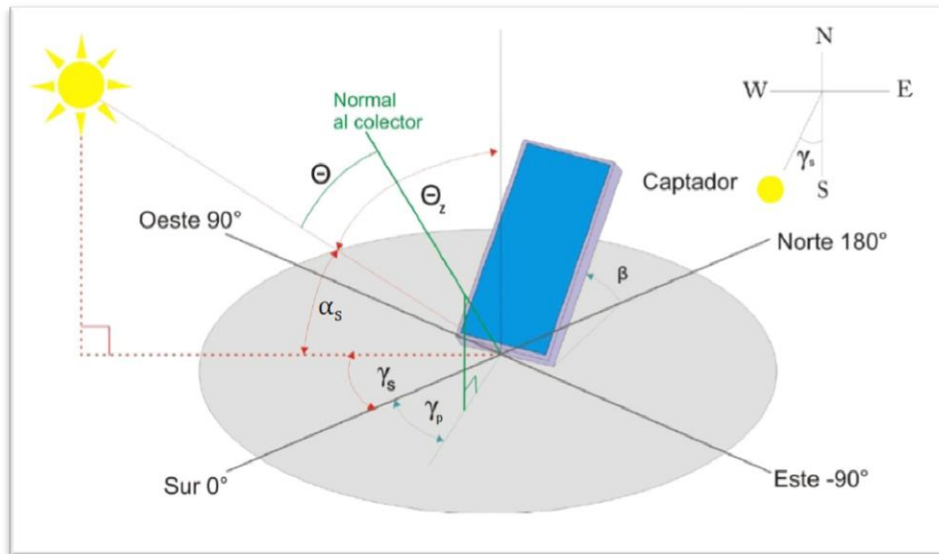
Fuente: Modificada por autores

2.2.3.2 Superficies inclinadas orientadas hacia el sur. Para una superficie con un ángulo de inclinación distinto de cero ($\beta \neq 0$) y con una azimut de la pared igual a cero ($\gamma_p = 0$) debido a que esta ubicada en dirección sur, el ángulo de incidencia de la radiación solar se ve influenciado por la declinación, el ángulo horario, el ángulo de inclinación de la superficie y la latitud ($f(\delta, \omega, \varphi, \beta)$).

$$\cos \theta = \sin \delta \sin(\varphi - \beta) + \cos \delta \cos(\varphi - \beta) \cos \omega \quad [4]$$

2.2.3.3 Superficies inclinadas con cualquier orientación. Para una superficie con ángulo de inclinación ($\beta \neq 0$) y azimut de pared diferente de cero ($\gamma_p \neq 0$), el ángulo de incidencia de la radiación solar se ve afectado por todos los factores que afectan la radiación solar, por lo tanto el ángulo de incidencia θ es función de la declinación, el ángulo horario, la inclinación de la superficie, el azimut de la pared y el azimut solar ($\theta = f(\delta, \omega, \varphi, \beta, \gamma_p, \gamma_s)$) (Ver figura 23).

Figura 23. Ángulo de incidencia para una superficie inclinada y orientada en cualquier dirección



Fuente: Modificada por autores.

$$\cos \theta_z = \sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos \omega \quad [5]$$

$$\alpha_s = 90 - \theta_z \quad [6]$$

$$\cos \gamma_s = \frac{\cos \theta_z * \sin \varphi - \cos \delta}{\cos \theta_z * \sin \varphi} \quad [7]$$

$$\cos \theta = \cos(\gamma_s - \gamma_p) \cos \alpha_s \sin \beta + \sin \alpha_s \cos \beta \quad [8]$$

Se puede calcular de forma directa con una sola ecuación:

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \sin \delta \sin \varphi \cos \beta \\ & - \sin \delta \cos \varphi \sin \beta \cos \gamma_p \\ & + \cos \delta \cos \varphi \cos \beta \cos \omega \\ & + \cos \delta \sin \varphi \sin \beta \cos \gamma_p \cos \omega \\ & + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma_p \sin \omega \end{aligned} \quad [9]$$

2.3 CALCULO DE LA IRRADIANCIA (q_s) PARA UN PLANO SOBRE LA SUPERFICIE TERRESTRE

Como se citó anteriormente...Véase numeral 2.1, párrafo 4... la irradiancia es la energía que incide en una superficie en un determinado tiempo. Por consiguiente una vez determinados los parámetros que nos permiten conocer el ángulo de incidencia de la radiación solar respecto a una determinada superficie, solo queda determinar la energía en forma de radiación que llega sobre esta. Por lo tanto se debe realizar un estudio para evaluar la intensidad con la cual la radiación solar llega a la tierra.

2.3.1 Constante solar (I_0). Es la tasa de radiación electromagnética solar recibida por unidad de área en la parte externa de la atmosfera terrestre, dicha constante está dada a una distancia media entre el Sol y la Tierra en la parte superior de la atmosfera, y tiene un valor estimado $I_0 = 1367 \text{ W/m}^2$ con una incertidumbre del orden del 1%, pero dicha energía se ve atenuada por el paso a la atmosfera.

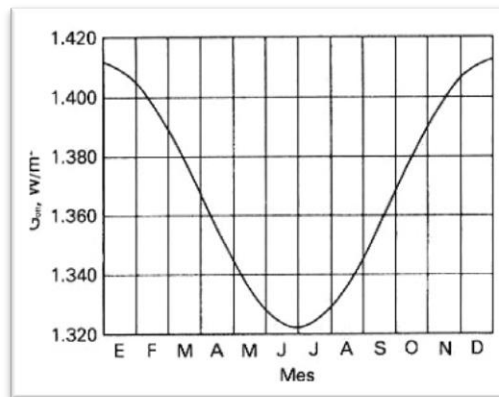
Mediante estudios se ha logrado determinar una forma práctica para calcular esta constante en función de un determinado día del año:

$$I_0 = 1353 \left(1 + 0,034 \cos \frac{360 n}{365} \right) [10]$$

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

En la figura 24, se aprecia la variación de la radiación solar extraterrestre en función de las épocas del año, ya que dicha radiación varía en +/- 3% debido a la excentricidad de la órbita terrestre que modifica la distancia Sol-Tierra y a la variación de energía producida por el sol, además se puede apreciar que a principios de Enero la intensidad aumenta debido a que la distancia Sol-Tierra es mínima, mientras que a principios de Julio la intensidad disminuye debido a que la distancia Sol-Tierra es máxima.

Figura 24. Variación de la radiación solar-extraterrestre con la época del año



Fuente: DUFFIE, Jhon y BECKMAN, William. Solar Engineering of Thermal Processes. 2 Ed. New York: A Wiley- Interscience Publication JOHN WILEY & SONS, INC, 1974. 9 p.

La intensidad de la radiación solar permite calcular la irradiancia (h_0) en un plano ubicado en la parte externa de la atmosfera mediante la siguiente ecuación:

$$h_0 = I_0 \cos \theta_z \quad [11]$$

Si existiera una atmosfera totalmente transparente, la radiación solar llegaría inalterada a la superficie terrestre. La atmosfera terrestre genera una atenuación a la radiación solar extraterrestre, por lo que la radiación que incide en la superficie terrestre disminuye cierto porcentaje.

2.3.2 Atenuación atmosférica de la radiación solar: La intensidad de radiación solar que alcanza la superficie terrestre no es la misma que llega a la atmosfera terrestre, debido a que esta disminuye al pasar por la atmosfera debido a sus diferentes componentes como las moléculas de aire, aerosoles, gases, gotas de nube y cristales de hielo. Las moléculas de aire dispersan la radiación (dispersión de Rayleigh)*, mientras los aerosoles dispersan y además absorben la radiación solar que atraviesa la atmosfera. La cantidad de radiación dispersada y absorbida depende de la composición química de las partículas y de la humedad del entorno. El vapor de agua, el ozono, el dióxido de carbono y el oxígeno son los principales gases absorbentes del espectro de radiación solar.

Con el fin de comprender estos procesos se procede a presentar la definición de algunos términos importantes:

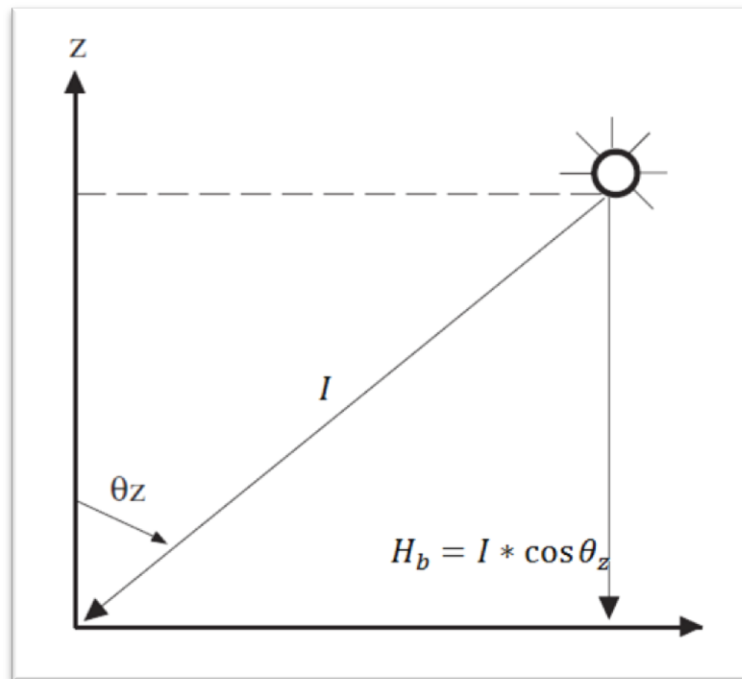
- **Masa atmosférica:** Relación entre la masa del aire a través de la cual la radiación directa pasa para llegar a la superficie terrestre y la masa que pasaría si el sol estuviera ubicado en el cenit.
- **Albedo:** Es el porcentaje de radiación que se refleja en cualquier superficie respecto a la incidente. El albedo medio de la Tierra es del 37-39% de la radiación que proviene del Sol. En general, las superficies oscuras y quebradas reflejan menos que las claras y lisas.
- **Radiación directa (H_b):** Es la radiación solar que llega a la superficie terrestre desde el ángulo solido subtendido por el disco solar, sin haber pasado por difusión o reflexión a su paso por la atmosfera. El flujo de radiación directa depende de la constante solar, ángulo de incidencia de la radiación solar, y la transparencia atmosférica (Ver figura 25).

* La **dispersión de Rayleigh** (en honor a Lord Rayleigh) es la dispersión de la luz visible o cualquier otra radiación electromagnética por partículas cuyo tamaño es mucho menor que la longitud de ondate los fotones dispersados. Ocurre cuando la luz viaja por sólidos y líquidos transparentes, pero se ve con mayor frecuencia en los gases.

$$H_b = I * \cos \theta_z \text{ [12]}$$

Donde I representa la intensidad de radiación solar incidente sobre la superficie terrestre.

Figura 25. Radiación directa



Fuente: Modificada por autores.

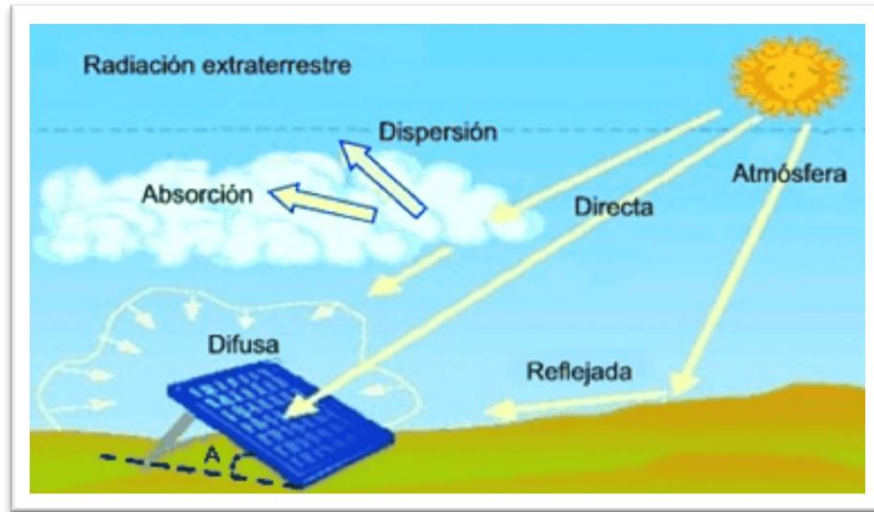
- **Radiación difusa (H_d):** Es la radiación solar que sufrió difusión debido a partículas presentes en la atmosfera, dicha radiación difusa incide en todas las direcciones. El flujo de radiación difusa depende de la altura del sol sobre el horizonte, la cantidad de partículas componentes de la atmosfera, la presencia de capas de nubes, y la altura de la superficie sobre el nivel del mar.
- **Radiación reflejada:** Es la radiación recibida, ya sea de tipo directa o difusa, que ha sido reflejada por alguna superficie.

- **Radiación global (H):** Es el resultado de la componente vertical de la radiación directa más la radiación difusa. La evaluación de la radiación global se efectúa por el flujo de la energía por unidad de área y tiempo sobre una superficie horizontal expuesta al sol y sin ningún tipo de sombra.

$$H = H_b + H_d \quad [13]$$

$$H = I * \cos \theta_z + H_d \quad [14]$$

Figura 26. Atenuación de la radiación solar



Fuente: <http://www.adrformacion.com/cursos/solarfoto/leccion1/tutorial3.html>

Dentro del estudio de los factores de atenuación de la radiación se debe tener en cuenta el índice de claridad o constante de claridad (K_T) que indica la transparencia de la atmósfera. Dicha constante se define como la relación entre la radiación medida en la superficie terrestre y la radiación extraterrestre.

$$K_T = \frac{h}{h_0} \quad [15]$$

2.3.3 Métodos para la determinación de la irradiancia a nivel terrestre.

Debido a la dificultad para medir la constante de claridad de forma directa, se han desarrollado procedimientos e instrumentos que nos permiten determinar un valor para la radiación directa y difusa, ya que estas componentes son necesarias en el estudio del calor incidente sobre una determinada superficie. Estas dos componentes pueden obtenerse de dos formas, midiéndolas o estimándolas.

2.3.3.1 Instrumentos para la medición de la radiación solar. Son equipos que nos permiten medir la radiación solar global (directa más difusa), la radiación directa, la radiación difusa, el brillo solar y las horas en las que se da. A continuación se presentan algunos instrumentos de medición de la radiación solar:

- **Piranómetro:** Instrumento para medir de manera muy precisa la irradiancia incidente sobre una superficie horizontal en la tierra. Funciona por medio de un sensor diseñado para medir la densidad de flujo de radiación solar en un campo de 180°. Dicho instrumento permite determinar la radiación total (H). (Ver figura 27). Por medio del piranómetro también se puede medir la radiación difusa, solo basta con colocar una cinta de tal forma que haga sombra sobre el sensor, de esta manera no deja pasar la radiación solar directa (Ver Figura 28).
- **Pirheliómetro:** Es un instrumento utilizado para la medición de la radiación directa, se diferencia al piranómetro en que este instrumento no mide la radiación en un ángulo de 180°, sino que se encarga de medir la radiación a través de un ducto, de esta manera la radiación difusa y reflejada no influye en su medida. (Ver Figura 29).
- **Actinógrafo o piranógrafo:** Instrumento que registra la radiación solar 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, en [$watt/m^2$] (Ver Figura 30).

Figura 27. Piranómetro



Fuente: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Pyranometer_sr11_hukseflux.gif

Figura 28. Piranómetro de radiación difusa



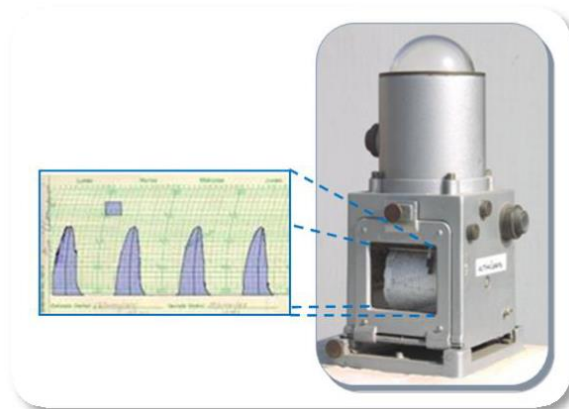
Fuente: <http://www.atmosfera.cl/HTML/antiguo/TEMAS/INSTRUMENTACION/FIG9.htm>

Figura 29. Pirheliómetro



Fuente: <http://erri4.blogspot.com/2010/10/pirheliometro-y-bolometro.html>.

Figura 30. Actinógrafo



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

- **Heliógrafo:** Es un instrumento utilizado para la medición del brillo solar, y su objetivo es medir la duración de la insolación diaria, registrando los periodos de tiempo en los que la radiación solar supero un valor mínimo. Opera focalizando la radiación solar mediante una esfera de vidrio a manera de lente convergente, en una cinta con escala de horas, que como resultado a la exposición de radiación solar se quema formando líneas cuya longitud determina el número de horas de brillo del Sol.

Figura 31. Heliógrafo



Fuente: <http://www.tiempo.com/ram/1762/el-heligrfo-de-campbell-stokes/>.

2.3.3.2 Métodos para la estimación de la radiación solar. Las mediciones directas de la radiación solar son la mejor fuente de información; sin embargo, debido a los costos de los instrumentos de medición y al mantenimiento de su operación, se procede a estimar los datos de radiación global, directa, y difusa; por medio de la medición de variables más simples y económicas de mantener. Varios investigadores han desarrollado modelos basados en datos climatológicos como la temperatura, humedad relativa, nubosidad, pluviosidad, y horas de brillo solar.

2.3.3.3 Estimación de la radiación solar global sobre superficies horizontales. Page (1964)^{*} y otros autores, propusieron la siguiente ecuación:

$$\frac{\bar{H}}{\bar{H}_0} = \left(a + b \frac{n}{N} \right) \quad [16]$$

Donde: \bar{H} = Radiación promedio diaria mensual sobre una superficie horizontal

\bar{H}_0 = Radiación solar extraterrestre promedio diaria mensual sobre una superficie horizontal

n = Numero de horas de brillo solar promedio diario mensual

N = Promedio diario mensual del máximo de horas posible de brillo solar (duración del día promedio)

a y b = Constantes empíricas

En 1966 Swartam y Ogulande introdujeron la humedad relativa (R) en tres diferentes ecuaciones:

$$H = 490 D^{0,357} R^{0,262} \quad [17]$$

$$H = 460 e^{0,607(D-R)} \quad [18]$$

$$H = 464 + 265 D - 248 R \quad [19]$$

Donde D es el número de horas de brillo solar dividido entre 12.

^{*} INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGIA Y ESTUDIO AMBIENTAL y UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA. Atlas de radiación solar de Colombia promedio multianual. Apéndice C. Bogotá: IDEAM y UPME, 2005. 148 p.

Masson (1966) encontró una relación entre la radiación solar sobre una superficie horizontal (en langleys por día) y el número de horas de brillo solar (n). El resultado fue expresado como:

$$H = 60 + (1406,2 n^2 + 7426,6 n)^{1/2} \quad [20]$$

$$1 \text{ langleys} = 1 \text{ cal/cm}^2$$

2.3.3.4 Estimación de la radiación solar difusa sobre superficies horizontales. Los estudios de los datos de radiación solar disponible han mostrado que el promedio de la fracción (H_d/H) es una función de K_t . Muchos investigadores llegaron a correlaciones con comportamientos similares. Dentro de ellos se destacan las correlaciones de Collares-Pereira y Rabl:

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

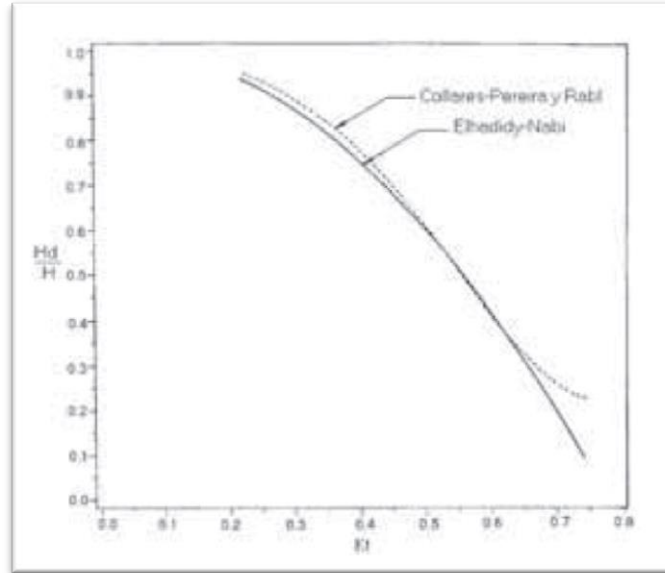
En 1991 M. A. Elhadidy y Abdel-Nabi* encontraron una relación entre la radiación difusa, la radiación global y el índice de claridad:

$$\frac{H_d}{H} = 1,039 - 1,741 k_t^2 \quad [22]$$

En la figura 32 se comparan las correlaciones de Collares-Pereira y Elhadidy; se observa buena concordancia entre los dos modelos, excepto para algunos valores de $k_t > 0,65$.

* INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGIA Y ESTUDIO AMBIENTAL y UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA. Atlas de radiación solar de Colombia promedio multianual. Apéndice C. Bogotá: IDEAM y UPME, 2005. 149 p.

Figura 32. Curva de radiación difusa en función de K_k



Fuente: Modificada por autores.

2.3.4 Irradiancia sobre una superficie plana inclinada ubicada sobre la superficie terrestre ($q_{S\beta}$): Para el cálculo de esta variable es necesario determinar las componentes de radiación directa, la radiación difusa y la radiación reflejada. De esta forma $q_{S\beta}$ se determina a partir de:

$$q_{S\beta} = H_b * \frac{\cos(\theta)}{\cos(\theta_z)} + H_d * \cos^2\left(\frac{\beta}{2}\right) + H * \rho * \sin^2\left(\frac{\beta}{2}\right) \quad [23]$$

Una vez determinada la irradiancia sobre la superficie inclinada ($q_{S\beta}$) es posible determinar el calor útil sobre la superficie. Se tienen varias opciones a partir de las cuales se pueden calcular el valor de $q_{S\beta}$, ya sea por medio de la medición con instrumentos, o por estimación con correlaciones; se pueden implementar las siguientes opciones:

- Medir la radiación total con un piranómetro y medir la radiación directa con un pirheliómetro.
- Medir la radiación total con un piranómetro y medir la radiación difusa con un piranómetro bloqueando la radiación directa.
- Medir la radiación total, determinar la constante de claridad y estimar la radiación directa.
- Medir la radiación total, determinar la constante de claridad y estimar la radiación difusa.
- Estimar la constante de claridad, determinar la radiación total y determinar la radiación directa mediante ecuaciones.
- Estimar la radiación directa en función de la ubicación del lugar, calcular la constante de claridad y calcular la radiación total.

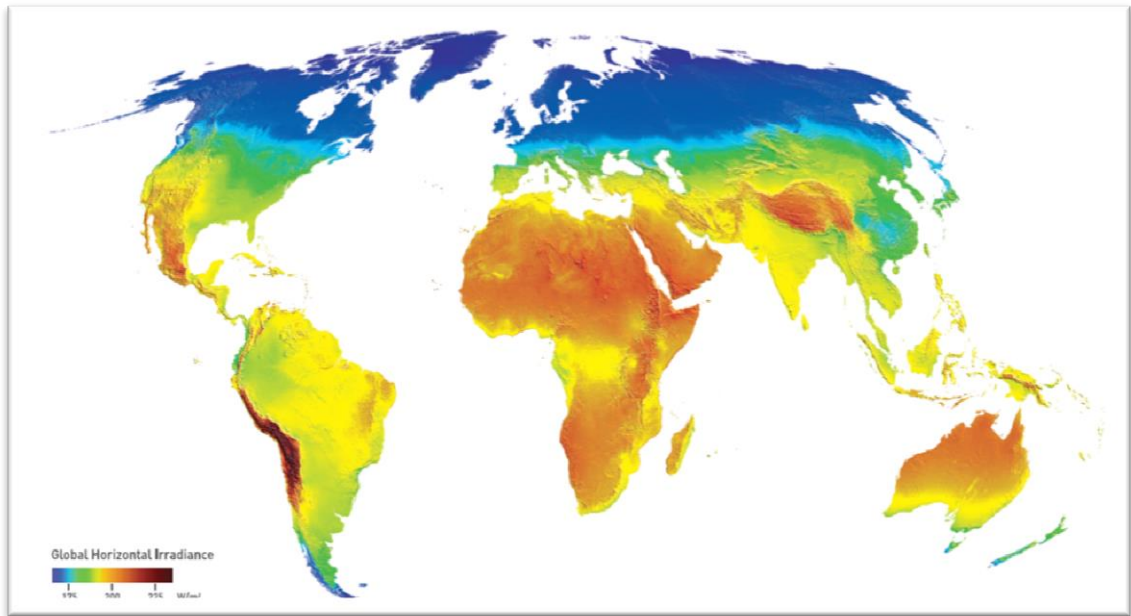
2.4 MAPAS DE RADIACION SOLAR

Los mapas de radiación solar son documentos de referencia que contribuyen al conocimiento de la disponibilidad de la energía solar, dicho conocimiento es indispensable porque facilita el aprovechamiento adecuado de la energía solar mediante el uso de diferentes sistemas y tecnologías que lo transforman en diversas formas de energía útil; además que los mapas de radiación solar son una herramienta en el dimensionamiento de sistemas o aplicaciones que trabajan con la energía solar. No obstante, los mapas de radiación solar representan solo una tendencia de la irradiancia, por lo tanto es necesario contar con la medición de la irradiancia en el lugar con el objetivo de realizar análisis complejos.

2.4.1 Radiación solar mundial. La energía solar es un recurso disponible en casi todo el planeta tierra, aunque se debe tener en cuenta que la irradiancia no es una constante en nuestro planeta, ya que varía a lo largo de la tierra. Esto permite tener zonas con algunas ventajas para la implementación y aprovechamiento de la radiación solar como un recurso energético alternativo.

Por medio del estudio global de la energía solar se establecen las zonas con mayor irradiancia promedio en el año. En la figura 33 se puede observar como las zonas ubicadas en los trópicos tienen mayor potencial, además que se cuentan con rangos de radiación solar entre 175 W/m^2 y los 250 W/m^2 .

Figura 33. Irradiancia solar promedio mundial



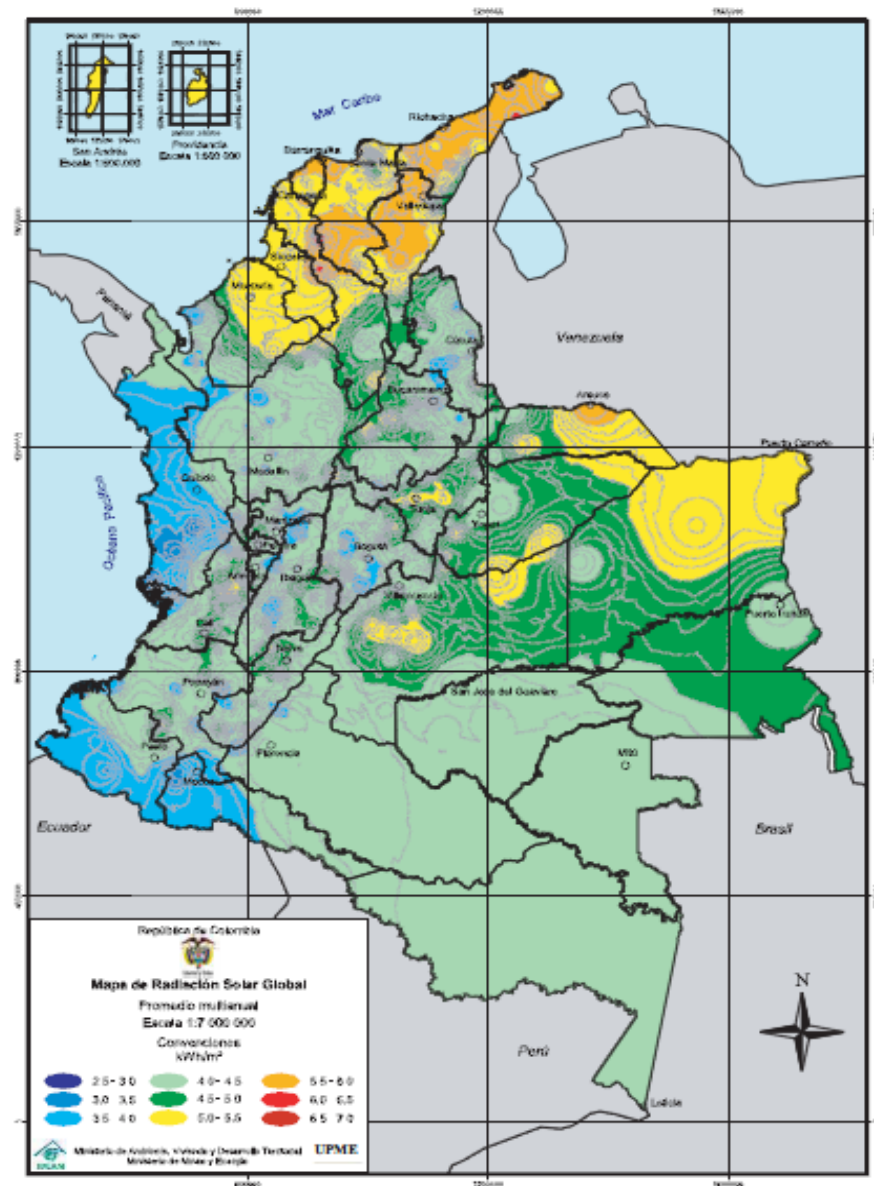
Fuente: <http://www.3tier.com/en/>.

2.4.2 Radiación Solar en Colombia. En Colombia por su posición geográfica en el planeta (cerca de la línea del ecuador), presenta cierta ventaja en su potencial solar, aunque puede verse afectado por ciertas condiciones climáticas variadas. El hecho de tener un buen potencial solar, impulsa proyectos para la obtención de energía por medios no convencionales como colectores solares y celdas fotovoltaicas lo cual nos genera un avance en investigación y tecnología.

El atlas de radiación solar en Colombia es un documento de gran ayuda en el estudio de la radiación solar en nuestro país, ya que cuenta con mapas de radiación solar, brillo solar, radiación ultravioleta y columna de ozono.

Según dichos mapas la radiación solar anual promedio se encuentra en 4,5 kWh/m²/día, destacándose la península de La Guajira, con un valor promedio de 6,0 kWh/m²/día y la Orinoquia con un valor poco menor (Ver figura 24).

Figura 1. Promedio multianual de radiación solar en Colombia



Fuente: INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIO AMBIENTAL y UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA. Atlas de radiación solar de Colombia promedio multianual. Escala 1:7.000.000. Bogotá: IDEAM y UPME, 2005.

3. COLECTORES SOLARES

Los colectores solares son un tipo especial de intercambiador de calor que es capaz de absorber la radiación solar, convirtiéndola en calor (energía térmica) y siendo transferida a un fluido de trabajo para su aprovechamiento. Los colectores solares difieren unos de otros en la forma como absorben la radiación e intercambian calor, por tanto se puede hacer una clasificación de los mismos.

3.1 CLASIFICACION DE LOS COLECTORES SOLARES

Los colectores solares se clasifican principalmente según el método de transformación de la energía solar en energía térmica, según esto los colectores solares se clasifican en:

- Colectores solares de placa plana.
- Colectores solares concentradores de enfoque.
- Colectores solares de tubos al vacío.

3.1.1 Colector solar de placa plana. Pueden ser diseñados para aplicaciones que requieren la entrega de energía a temperaturas moderadas. Usan la radiación solar directa y la radiación solar difusa, no requieren de seguimiento solar, y requieren poco mantenimiento ya que son mecánicamente más simples en comparación con otros tipos de colectores que se construyen en la actualidad.

Estos colectores constan de una cubierta transparente y una superficie absorbente, entre las cuales se produce un efecto invernadero, en donde la cubierta transparente actúa como filtro para ciertas longitudes de ondas de la luz solar, dejando pasar principalmente la luz visible, y se comporta como opaco con ondas infrarrojas. El sol incide sobre la cubierta transparente la cual es transparente a sus rayos y deja pasar la mayor parte de la energía, calentando la

placa absorbedora que a su vez se convierte en emisora de radiación, dicha radiación es atrapada entre la placa y la cubierta transparente que se comporta como opaca para este tipo de radiación. Sobre la superficie absorbente se encuentran unidos o soldados una serie de ductos que transportan el fluido de trabajo o calo-portador, el cual capta el calor o la energía.

Estos tipos de colectores aplican para usos domésticos o comerciales, en calefacción, calentamiento de agua y climatización de piscinas, entre otros

Figura 34. Colector solar de placa plana para uso residencial



Fuente: <http://www.sinersol.com/index.aspx?Portal=5&Listado=113>

Los principales componentes de los colectores de placa plana son:

- La cubierta transparente
- La placa captadora
- El aislante
- La carcasa

3.1.1.1 Cubierta transparente. Es la encargada de producir el efecto invernadero, reducir las pérdidas por convección y asegurar la estanqueidad del colector al agua y al aire. Entre sus principales características se debe tener en cuenta que la cubierta posea un alto coeficiente de transmisión de la radiación solar en el rango de $0.3 - 3\mu m$, un bajo coeficiente de transmisión para las longitudes de ondas superiores a $3\mu m$ (longitud de onda larga), y un alto coeficiente de reflexión para la longitud de onda larga de la radiación emitida por la placa absorbidora con el fin de que dicha radiación emitida retorne a la placa.

Los principales materiales usados para la cubierta son los vidrios los cuales son transparente para la radiación de onda inferior a $3\mu m$ y opacos para radiaciones de onda larga. También se utilizan materiales plásticos en forma de películas flexibles y delgadas, o en forma de placas rígidas. Se pueden aplicar ciertos tratamientos especiales sobre las cubiertas para mejorar las características ya mencionadas, pero en muchos casos no son económicamente viables.

3.1.1.2 Placa captadora. Se encarga de absorber de forma eficiente la radiación solar y transformarla en energía térmica la cual es transferida al fluido calo portador. Existen diferentes modelos para la transferencia de calor, de los cuales los más usuales son:

- Una placa metálica de cobre sobre la cual están soldados o embutidos los tubos por los que circula el fluido calo portador. La placa metálica puede ser reemplazada por aletas de cobre unidas a los tubos de cobre.
- Dos placas metálicas de cobre paralelas con una separación de pocos milímetros, entre las cuales circula el fluido calo portador.
- Dos láminas metálicas de cobre unidas a gran presión que en ciertas zonas no están unidas sino abombadas por medio de insuflación de aire para formar el circuito de circulación del fluido calo portador.

La principal característica de las placas captadoras o absorbedoras es tener un coeficiente de absorción de radiación solar alto y un bajo coeficiente de emisión. Actualmente no se ha encontrado materiales simples con dichas propiedades, por lo cual se aplican tratamientos especiales a las superficies de los captadores como lo son las superficies selectivas.

3.1.1.3 Aislamiento térmico. Se encarga de evitar y disminuir las pérdidas de calor hacia el exterior, protegiendo la placa absorbedora en la parte posterior y en sus partes laterales. Los aislantes térmicos deben tener una baja conductividad térmica, deben ser resistentes para altas temperaturas sin que se deformen o se degraden, y soportar la posible humedad que se forme dentro del colector. En ocasiones se suele colocar entre la placa absorbedora y el aislante térmico una capa reflectante que impida que el aislante reciba directamente la radiación.

Los materiales más usados como aislantes térmicos son la fibra de vidrio, la espuma rígida de poliuretano y el poliestireno expandido.

3.1.1.4 Carcasa: Se encarga de proteger y soportar los elementos que componen el colector solar, además de permitir el acoplamiento de la estructura y soportes para el montaje del colector en una determinada ubicación, ya sea un techo, un muro, una placa, entre otros.

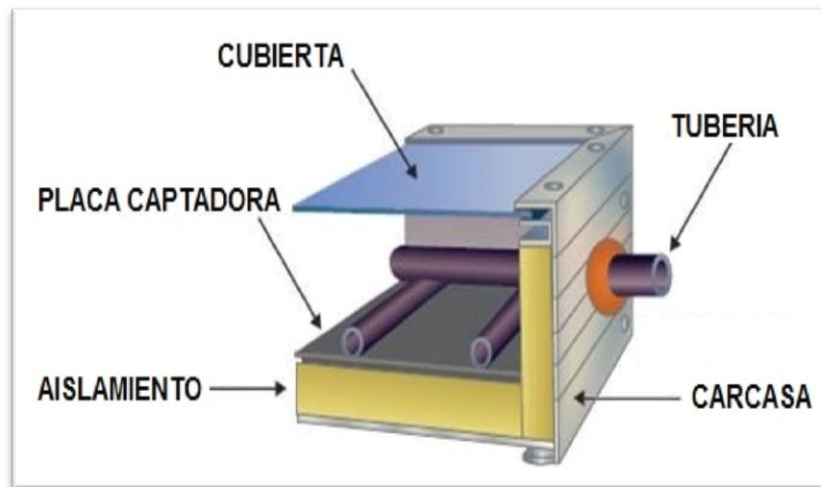
Las principales características de la carcasa son:

- Rigidez y resistencia estructural que garantice estabilidad.
- Resistencia mecánica y química de los elementos de fijación para soportar los esfuerzos transmitidos y para soportar la corrosión.
- Resistencia a la intemperie para reducir o neutralizar los efectos corrosivos de la atmosfera.
- Aireación interna del colector para evitar la condensación del agua.

- Evitar la acumulación de agua, hielo, nieve o suciedad en el exterior del colector.
- Montaje fácil de la cubierta para el acceso a la placa captadora

En la figura 35 se pueden observar los principales componentes de un colector de placa plana.

Figura 35. Componentes de un colector solar de placa plana

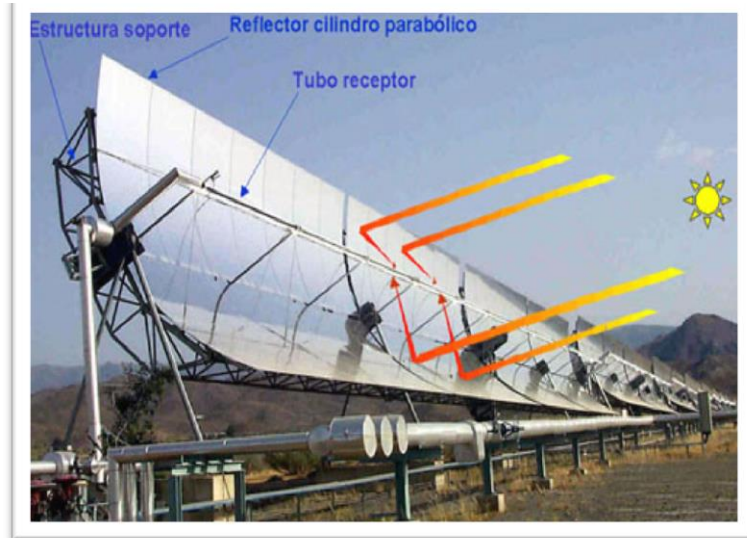


Fuente: Modificada por autores.

3.1.2 Colector solar concentrador de enfoque. Este tipo de colectores se caracteriza por que aumentan la intensidad solar sobre una superficie captadora o absorbente concentrando la energía por medio del enfoque de los rayos solares en dicha superficie. Pueden alcanzar altas temperaturas por lo que son usados para generadores solares o para hornos de alta temperatura (temperaturas mayores a 4000° C), pero tienen ciertas desventajas como el hecho de solo utilizar la radiación directa, además de que se debe implementar un sistema de seguimiento solar. Los principales componentes de estos tipos de colectores son (Ver Figura 36):

- Recibidor: Es el elemento encargado de absorber la radiación y convertirla en otro tipo de energía, como en energía térmica.
- Concentrador o sistema óptico: Es el elemento encargado de direccionar la radiación hacia el receptor.

Figura 36. Colector solar de concentración



Fuente: <http://www.psa.es/>.

Los colectores pueden tener relaciones de concentración menores que la unidad hasta valores del orden de 10^5 , esto se debe a la apertura del concentrador.

Los principales tipos de colectores solares de concentración son:

3.1.2.1 Colectores cilíndricos parabólicos. Este tipo de colectores pueden alcanzar temperaturas de 400°C , son utilizados en la generación de energía eléctrica, y en el calentamiento de agua. Su construcción no es más que doblar una lámina de algún material reflectante con forma de parábola y a lo largo de la línea focal se ubica el receptor que normalmente es un tubo metálico negro recubierto con un tubo de vidrio para disminuir las pérdidas.

Cuando la parábola es orientada hacia el sol, basta con hacer seguimiento solar en un solo eje de rotación.

Actualmente este tipo de colectores de concentración son los más estudiados e industrialmente los más fabricados.

Figura 37. Colector solar cilíndrico parabólico



Fuente: Modificada por autores.

3.1.2.2 Colectores de disco parabólico. Es un colector parabólico el cual tiene el foco en un punto específico y no una línea focal como los colectores cilíndricos parabólicos. Debido a que el foco de la parábola es un punto específico el colector debe tener seguimiento solar en dos grados de libertad. Al igual que los colectores cilíndricos estos colectores poseen la parábola reflectante, el receptor y su respectivo mecanismo de seguimiento solar en 2 ejes (Ver figura 38).

El receptor ubicado en el foco, absorbe la radiación reflejada y se convierte en energía térmica, esta energía térmica puede ser convertida a electricidad mediante

un motor-generator dispuesto en el foco. La temperatura en el receptor o recibidor puede superar los 1500°C, con concentraciones entre 600-2000.

Figura 38. Colector de disco parabólico

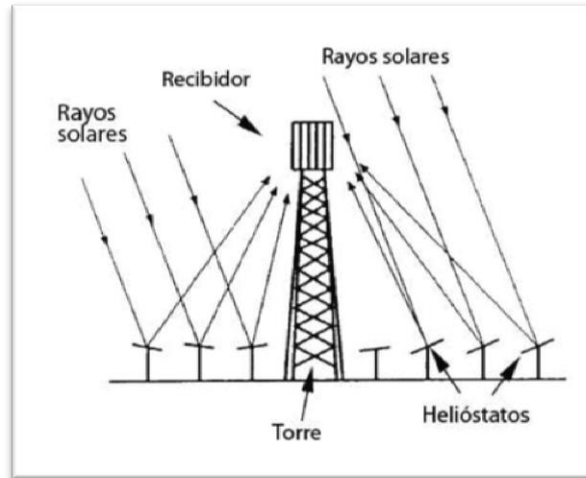


Fuente: Modificada por los autores.

3.1.2.3 Tecnología de torre con helióstatos. Presentan el mismo principio que los colectores de disco parabólicos, a diferencia que la parábola es reemplazada por varios espejos dispuestos en un campo con seguimiento solar de altitud-azimut y reflejando la radiación incidente de cada espejo en un **foco receptor común (Ver figura 39)**. Normalmente en el receptor se genera vapor de agua a alta presión y temperatura, el cual puede ser almacenado y ocupado para generar energía eléctrica.

3.1.3 Colectores solares de tubos de vacío. La tecnología de tubos de vacío es la más eficaz actualmente en los colectores solares. Aunque se tenía la percepción de que dichos colectores eran caros y de difícil acceso, en los últimos años han comenzado a hacerse más accesibles para algunas aplicaciones así como la proliferación de sistemas compactos de agua caliente por termosifón con tubos de vacío.

Figura 39. Tecnología de torre con helióstatos



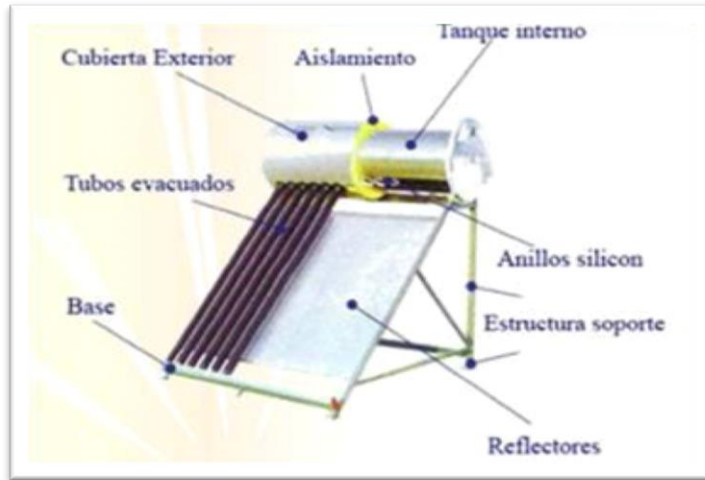
Fuente: <http://www.luxxol.com/2011/06/9-colectores-de-concentracion.html>

Existen dos formas principales de aumentar la eficiencia de los colectores, mejorando el mecanismo de absorción de la radiación solar y disminuyendo las pérdidas de calor. Una de las ventajas que ofrecen los colectores con tubos de vacío, es que reducen las pérdidas de calor por conducción y convección debido a que en el espacio entre la superficie absorbente y la superficie transparente existe vacío. Además estos colectores por su forma cilíndrica aprovechan mejor la radiación solar a lo largo del día y absorben más cantidad de radiación difusa.

En la figura 40, se pueden ver los principales componentes de un colector solar de tubos de vacío.

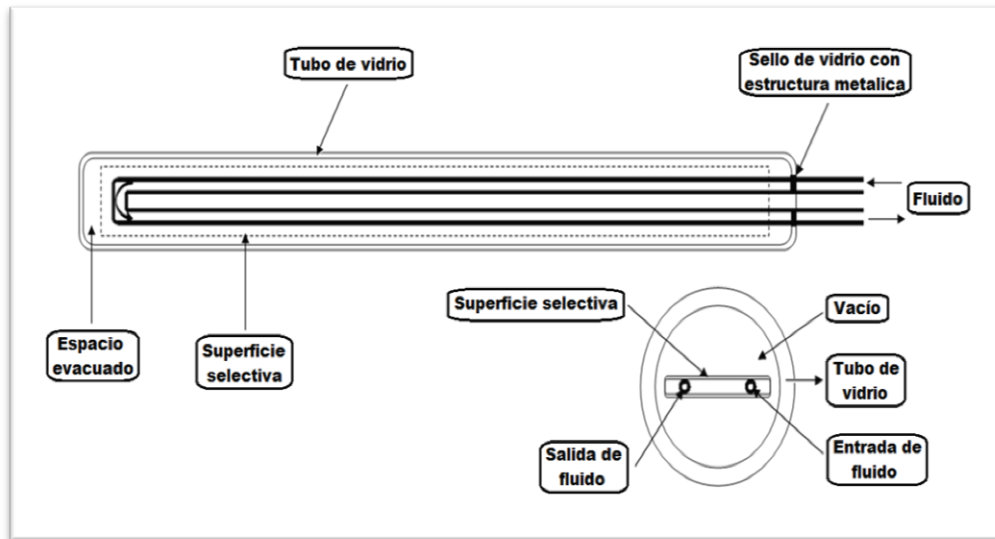
3.1.3.1 Tubos de vacío de cubierta simple. Son tubos de vacío en los cuales se usa un tubo de vidrio simple en cuyo interior se ubica un tubo en forma de U soldado o unido a una aleta longitudinal la cual es tratada con una película absorbente. En el extremo libre del tubo de vidrio se hace el sellado y el vacío con el tubo en U (Ver figura 41).

Figura 40. Colector solar de tubos de vacío



Fuente: <http://www.luxxol.com/2011/06/7-colectores-de-vacio.html>

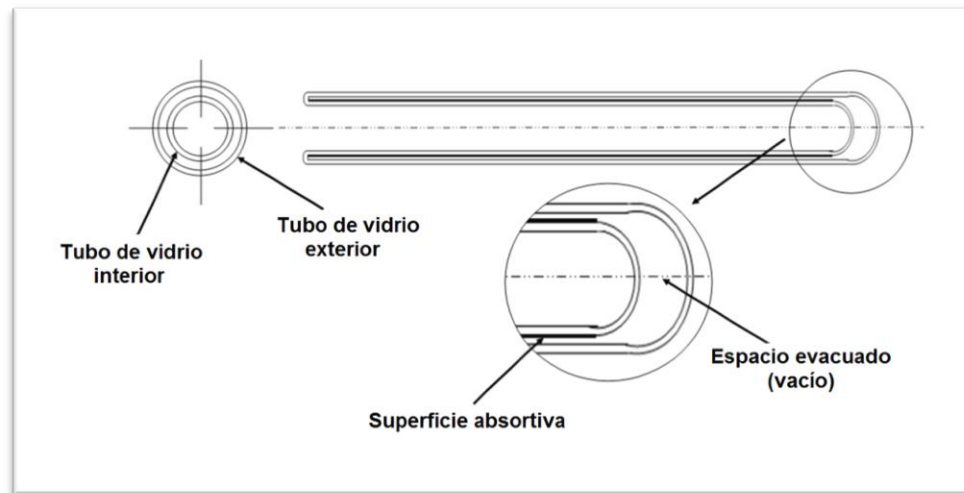
Figura 41. Colector solar de tubos de vacío de cubierta simple



Fuente: Editada por los autores.

3.1.3.2 Tubos de vacío de cubierta doble: Consiste en dos tubos concéntricos de vidrio sellados entre los cuales se ha evacuado el aire formando vacío. En la superficie exterior del tubo interno de vidrio se aplica una película absorbente encargada de captar la radiación solar (Ver figura 42).

Figura 42. Colector solar de tubos de vacío de cubierta doble



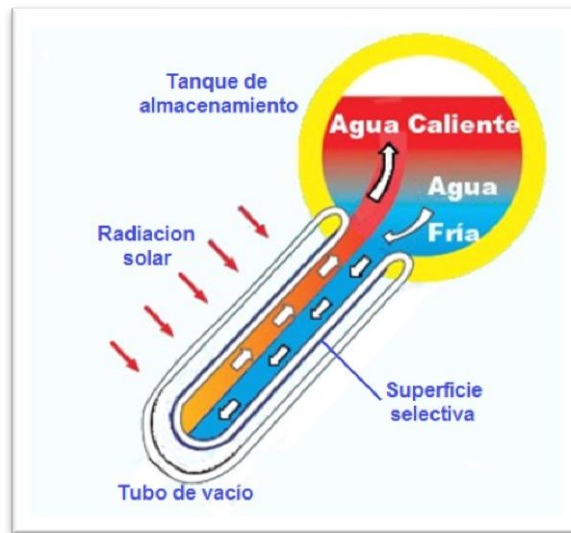
Fuente: JAIMES, Nelson Eduardo y RIVERO, Sergio Armando. Diseño y construcción de un colector solar de tubos de vacío. Trabajo de grado de Ingeniería Mecánica. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander 2012. 66 p.

Dentro de los tubos de vidrio se sitúan los diferentes mecanismos para la transferencia de energía al fluido calo portador, por lo tanto se puede implementar contacto directo entre el tubo de vacío y el fluido calo portador el cual sería el mismo fluido de trabajo o mediante la inclusión de un elemento que transfiera el calor desde el tubo de vacío hacia el fluido de trabajo.

- **Colector solar de tubos de vacío de contacto directo:** En este tipo de colectores el fluido de trabajo es el mismo fluido calo portador ya que los tubos están ensamblados directamente en el depósito de almacenamiento por lo tanto se llenan del fluido y este fluido entra en contacto directo con la superficie absorbente de los tubos, normalmente en estos colectores el fluido de trabajo es el agua. La principal ventaja de estos colectores radica en sus mínimas pérdidas de calor debido al vacío de los tubos y debido a que las resistencias térmicas por conducción también disminuyen al estar en contacto directo el fluido de trabajo

con la superficie absorbente del tubo de vidrio interno. Esta clase de colectores tienen la desventaja de no ser presurizados por lo que trabajan por gravedad, además otra desventaja es que si se ubican en lugares con fuertes inviernos donde la temperatura ambiente puede ser muy baja los tubos pueden llegar a romperse debido al congelamiento del agua, lo que hace necesario la inclusión de un sistema de calentamiento de agua como por ejemplo un calentador eléctrico. El fluido de trabajo se mueve a través de los tubos en donde se eleva debido a que su densidad disminuye a medida que se calienta, por lo que el espacio es reemplazado por otro volumen de fluido más frío y se repite el proceso, este proceso es conocido como termosifón o flujo natural.

Figura 43. Colector solar de tubos de vacío de cubierta doble de contacto directo

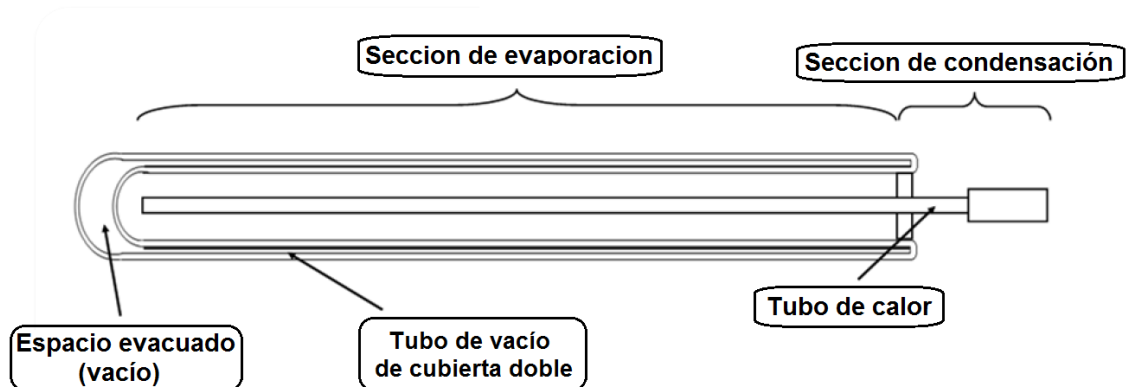


Fuente: <http://www.luxxol.com/2011/06/7-colectores-de-vacio.html>

- **Colector solar de tubos de vacío de contacto indirecto:** Este tipo de colectores solares de tubos de vacío tienen un elemento intermedio por el cual se da la transferencia de calor entre la superficie absorbente y el fluido de trabajo ya que este no está en contacto directo con la superficie absorbente. Teniendo en cuenta esto, se cuenta con dos métodos de transferencia de calor, con tubos de calor o con tubos conductores de fluido.

- **Colector solar de tubos de vacío con tubos de calor (Heat pipe):** Este mecanismo consiste en un tubo cerrado en el cual se introduce un fluido con propiedades específicas (fluido calo portador). A medida que el sol incide sobre el absorbedor adosado al tubo de vidrio, el fluido se evapora absorbiendo calor (calor latente). Dicho vapor asciende sobre el líquido hasta lo alto del tubo situándose en el foco frío, allí cede el calor latente (condensa) al fluido de trabajo y vuelve a caer al fondo del tubo por gravedad. Este proceso se repite mientras se pueda absorber la radiación solar o hasta que el colector ha alcanzado una temperatura muy alta. Estos colectores son usados en sistemas presurizados, no presentan problemas en inviernos por heladas, y cada tubo es independiente del sistema lo que si falla un tubo el sistema seguirá funcionando sin ningún problema.

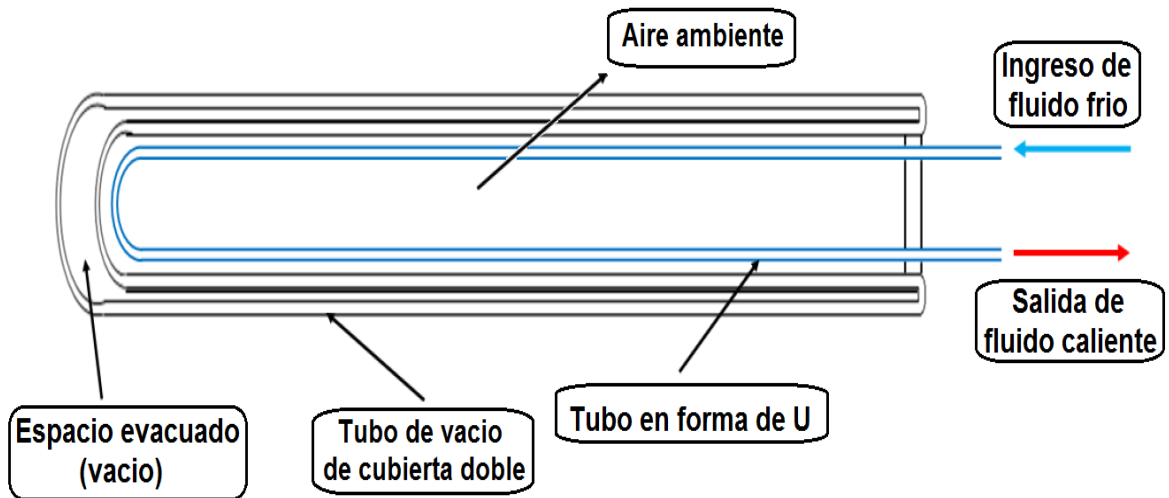
Figura 44. Colector solar de tubos de vacío de cubierta doble de contacto indirecto con tubo de calor o heat pipe



Fuente: JAIMES, Nelson Eduardo y RIVERO, Sergio Armando. Diseño y construcción de un colector solar de tubos de vacío. Trabajo de grado de Ingeniería Mecánica. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander 2012. 68 p.

- **Colector solar de tubos de vacío con tubo conductor de fluido:** En este tipo de colectores la transferencia de calor se da en el interior del tubo de vidrio mediante la introducción de tubos en forma de U o tubos coaxiales por los cuales circula el fluido calo portador.

Figura 45. Colector solar de tubos de vacío de cubierta doble de contacto con tubo conductor



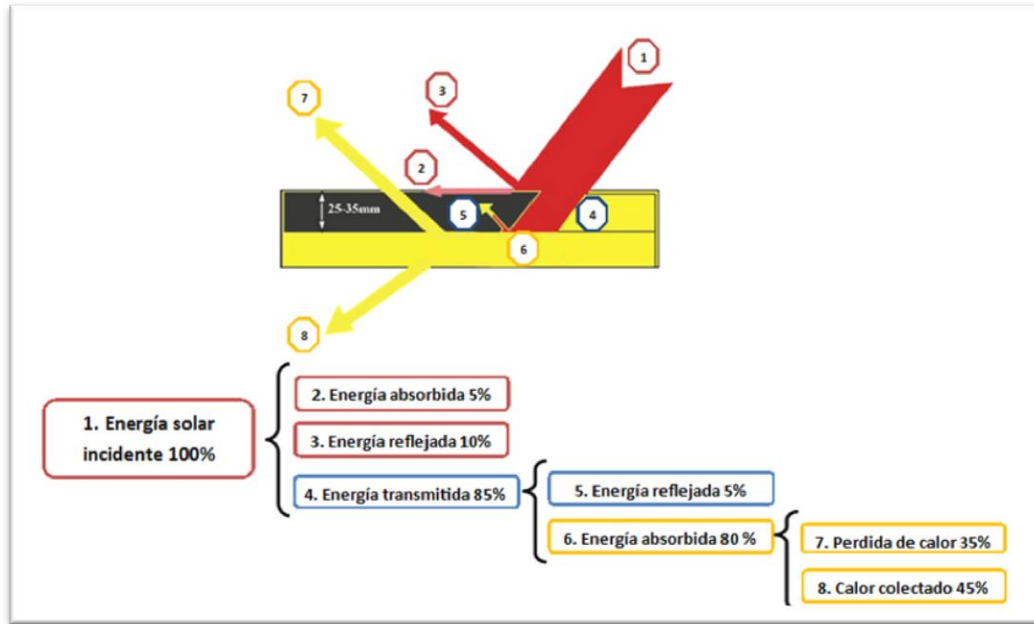
Fuente: JAIMES, Nelson Eduardo y RIVERO, Sergio Armando. Diseño y construcción de un colector solar de tubos de vacío. Trabajo de grado de Ingeniería Mecánica. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander 2012. 69 p.

3.2 EFICIENCIA DE LOS COLECTORES SOLARES

La eficiencia de un colector solar se define como la relación entre la **energía útil ganada (Q_u)** y la **energía solar incidente (Q_i)** sobre el colector, ya sea en un instante o en un determinado tiempo. Por lo tanto es importante definir cómo se pueden definir estos dos términos para un determinado sistema de colectores solares.

En la figura 46 se puede ver un esquema general del comportamiento de un colector solar, respecto a la energía solar incidente.

Figura 46. .Análisis de radiación incidente sobre un colector solar



Fuente: 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 p.

Como se puede ver en la figura anterior, cierta cantidad de calor incide sobre la superficie externa del colector, cuya cubierta está formada por un vidrio o superficie protectora que refleja, absorbe y transmite la energía incidente hacia la placa absorbente. La superficie absorbente absorbe cierta parte de la energía incidente y otra parte (pérdidas de energía) es emitida por dicha superficie. De esta forma se determina el calor incidente sobre el colector como:

$$Q_i = q_{s\beta} * A \quad [1]$$

Donde $q_{s\beta}$ representa la irradiancia ($\frac{W}{m^2}$)...Ver numeral 4.1... y A representa el área de la superficie captadora o absorbente (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 irradiación que es transmitida por la placa transparente y el porcentaje de irradiación 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:

$$Q_{ia} = q_{s\beta} * \tau\alpha * A \quad [2]$$

Se debe tener en cuenta que a medida que el colector absorbe calor, la temperatura de la superficie absorbente aumenta más que en los alrededores, por lo tanto se genera un calor de pérdidas que es transmitido a la atmosfera por efectos de radiación y convección, para lo cual se define una tasa de calor perdido como:

$$Q_0 = U_L * A * (T_c - T_a) \quad [3]$$

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 haciendo el balance de energía, 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.

$$Q_u = m * C_p * (T_o - T_i) \quad [4]$$

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. Dicha ecuación también aplica para sistemas en donde no fluye de manera forzada el fluido caloportador sino por convección natural (convección natural).

En casos donde se presenta dificultad de establecer la temperatura media del colector, se puede recurrir 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**.

$$F_r = \frac{(m * C_p * (T_o - T_i))}{A * (\tau\alpha - U_L * (T_i - T_a))} \quad [5]$$

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:

$$Q_u = A_c * F_r * (q_{s\beta} * \tau\alpha - U_L(T_i - T_a)) \quad [6]$$

De esta forma es posible definir la eficiencia del colector.

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{Q_u}{A * I} = A_c * F_r * \frac{q_{s\beta} * \tau\alpha - U_L(T_i - T_a)}{A * q_{s\beta}} \\ \eta &= F_r * (\tau\alpha) - F_r * U_L * \frac{T_i - T_a}{q_{s\beta}} \\ \eta &= F_r * (\tau\alpha) - F_r * U_L * I \quad [7] \end{aligned}$$

I – Factor potencial de pérdida por unidad de calor incidente

4. DISEÑO DEL CALENTADOR DE AGUA SOLAR BASADO EN UN MODELO MATEMATICO

El diseño del calentador de agua solar con tubos de vacío de contacto directo (Ver figura 43), agrupa varios parámetros de diseño, dichos parámetros de diseño son la base para la construcción del calentador. Por lo tanto en el presente capítulo se va a realizar un modelamiento con el fin de tener una base de diseño del calentador. También mediante el modelo matemático se comprueban ciertas recomendaciones de diseño dadas por los fabricantes, manuales de diseño para colectores solares y recomendaciones de normas técnicas.

Antes de comenzar con el modelo matemático se debe tener entendido de forma clara la irradiación sobre los tubos de vacío, ya que los tubos de vacío conforman el subsistema de captación de la energía solar.

4.1 DETERMINACION DEL CALOR INCIDENTE SOBRE EL COLECTOR SOLAR DE TUBOS EVACUADOS SIMPLES

Para determinar el calor incidente sobre el colector solar de tubos evacuados simples, es de suma importancia evaluar la irradiación presente sobre el colector.

4.1.1 Determinación de la irradiación instantánea para colectores de placa plana. Por medio de la medición de la radiación solar directa y difusa (H y H_d) y teniendo definida la ubicación del colector se puede definir la irradiación como:

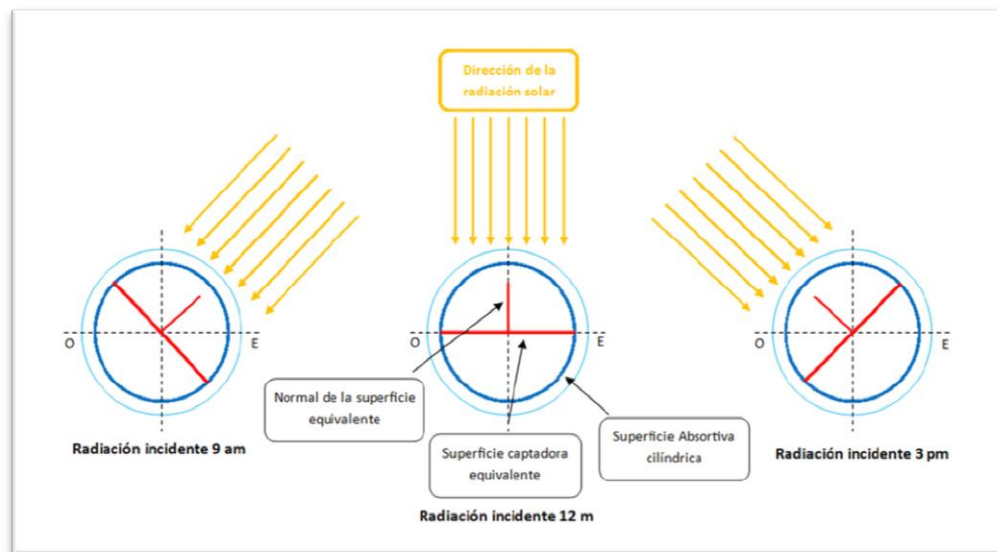
$$q_{s\beta} = (H * H_d) * \frac{\cos(\theta)}{\cos(\theta_z)} + H_d * \cos^2\left(\frac{\beta}{2}\right) + H * \rho * \sin^2\left(\frac{\beta}{2}\right) \quad [1]$$

Cada uno de sus términos se relaciona con la radiación directa (primer término), radiación difusa (segundo término) y la radiación reflejada de los alrededores (último término). Aunque la ecuación es usada para colectores de placa plana, también aplica para colectores de tubos de vacío si se tiene en cuenta las diferencias geométricas de los dos tipos de colectores.

4.1.2 Determinación de la irradiancia instantánea sobre colectores de tubos de vacío. Por medio de la determinación de la radiación solar directa, difusa y reflejada, y teniendo en cuenta las diferencias geométricas con respecto a los colectores de placa plana, se procede a obtener la irradiancia sobre colectores de tubos de vacío en función de los siguientes términos.

4.1.2.1 Radiación directa sobre los tubos de vacío. Teniendo en cuenta que los tubos de vacío son cilíndricos al igual que la superficie captadora, se puede observar en la figura 47, que a lo largo del día los rayos solares inciden perpendicularmente sobre la superficie proyectada de los tubos, de esta manera la radiación directa incide en todo momento sobre una superficie equivalente. Por lo tanto para calcular la componente normal respecto a la superficie cilíndrica basta con determinar el ángulo que se forma entre los rayos solares y la normal a la superficie (θ_z).

Figura 47. Radiación directa sobre una superficie cilíndrica



Fuente: JAIMES, Nelson Eduardo y RIVERO, Sergio Armando. Diseño y construcción de un colector solar de tubos de vacío. Trabajo de grado de Ingeniería Mecánica. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander 2012. 137 p.

Para determinar el ángulo formado entre los rayos solares y la normal a la superficie equivalente se puede aplicar la siguiente ecuación:

$$\cos \theta = \cos \theta_z * \cos \beta + \sin \theta_z * \sin \beta * \cos(\gamma_s - \gamma) \quad [2]$$

Por lo tanto el calor incidente sobre una superficie cilíndrica con relación a la radiación directa es:

$$Q_{dir} = (H - H_d) * \left(\frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \right) * A_{eq} \quad [3]$$

En donde Q_{dir} es el calor incidente directo, H la radiación total medida con el piranómetro, H_d la radiación difusa y A_{eq} como el área equivalente del cilindro ($A_{eq} = D * L$).

4.1.2.2 Radiación difusa sobre los tubos de vacío. Es la radiación solar que se desvió en todas las direcciones debido a las partículas presentes en la atmosfera. Se debe tener en cuenta que porcentaje del área cilíndrica se encuentra observando el medio ambiente, para el caso de un arreglo de tubos paralelos en el plano horizontal la distancia entre tubos afecta el factor de visión, (Ver figura 48).

Estableciendo el **factor de visión*** entre el tubo de vacío y el ambiente, y evaluando la radiación difusa, se puede determinar el calor incidente relacionado con la radiación difusa como:

$$Q_{dif} = H_d * \left(\cos \frac{\beta}{2} \right)^2 * F_{TA} * A \quad [4]$$

Donde Q_{dif} representa el calor incidente relacionado con la radiación difusa, H_d representa la radiación difusa, β es el ángulo de inclinación del tubo respecto a la

* El factor de visión F_{TA} es la fracción de la radiación de sale de una superficie e incide directamente contra otra superficie

Donde Q_{ref_amb} representa el calor incidente debido a la radiación reflejada por los alrededores, y A como el área superficial del cilindro ($A = \pi * D * L$).

Finalmente la irradiancia sobre colectores de tubos de vacío se define como:

$$q_{s\beta} = \frac{H - H_d}{\pi} * \frac{\cos(\theta)}{\cos(\theta_z)} + H_d * \left(\cos\frac{\beta}{2}\right)^2 * F_{TA} + H * \left(\sin\frac{\beta}{2}\right)^2 * \rho_{amb} * F_{TA} \quad [6]$$

Obtenida la irradiancia, se puede determinar el **calor incidente sobre la cubierta exterior transparente que protege y cubre la superficie absorbente de la cubierta interior del tubo de vacío (Q_{total})**:

$$Q_{total} = Q_{dir} + Q_{dif} + Q_{ref_amb}$$

$$Q_{total} = q_{s\beta} * A \quad [7]$$

De tal manera, para determinar el **calor incidente ($Q_{incidente}$)** sobre la superficie absorbente se debe tener en cuenta el efecto de la transmisividad de la cubierta transparente y la absorbente de la superficie absorbente. Por lo tanto el calor incidente sobre el colector se determina multiplicando el área del colector por la irradiancia $q_{s\beta}$.

$$Q_{incidente} = q_{s\beta} * \tau\alpha * A \quad [8]$$

Donde τ y α son los factores que representan la transmisividad de la superficie protectora y la absorbente de la superficie absorbente.

4.2 PARAMETROS DEL DISEÑO TÉRMICO PARA EL MODELAMIENTO

A partir de recomendaciones, manuales y normas, se generan los parámetros de diseño térmico para la construcción del calentador de agua solar. El modelamiento matemático se desarrolla con el fin de corroborar dichos parámetros de diseño.

A continuación se presentan los principales parámetros a tener en cuenta dentro del diseño térmico del calentador de agua y dentro del modelo matemático:

4.2.1 Volumen de agua para el tanque de almacenamiento. El volumen de agua que puede albergar el tanque de almacenamiento se puede obtener a partir del consumo de agua caliente para un promedio de 6 personas. En la figura 49 se muestra una tabla para tomar como criterio de diseño del consumo de agua caliente sanitaria.

Figura 49. Criterio de consumo de agua caliente

Criterio de Consumo	Lts./día	
Viviendas Unifamiliares	40	por persona
Viviendas Multifamiliares	30	por persona
Hospitales y Clínicas	80	por cama
Hoteles (4 Estrellas)	100	por cama
Hoteles (3 Estrellas)	80	por cama
Hoteles/Hostales (2 Estrellas)	60	por cama
Campings	60	por emplazamiento
Hostales/Pensiones (1 Estrella)	50	por cama
Residencias (ancianos, estudiantes, etc.)	80	por cama
Vestuarios/Duchas Colectivas	20	por servicio
Escuelas	5	por alumno
Cuarteles	30	por persona
Fábricas y Talleres	20	por persona
Oficinas	5	por persona
Gimnasios	30 a 40	por usuario
Lavanderías	5 a 7	por kilo de ropa
Restaurantes	8 a 15	por comida
Cafeterías	2	por almuerzo

Fuente: CORPORACIÓN DE DESARROLLO TECNOLÓGICO. Sistemas solares térmicos, manual de diseño para el calentamiento de agua. Santiago de Chile; Cámara chilena de construcción. 2007. 36 p.

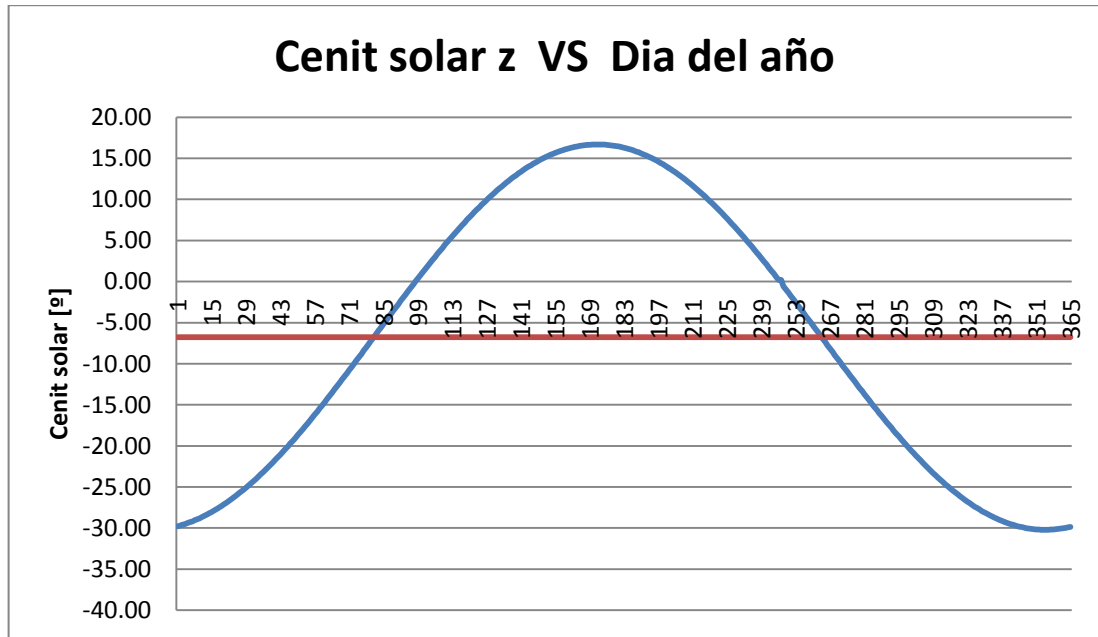
Como se aprecia en la figura anterior, se puede trabajar con el criterio de viviendas multifamiliares que tienen un consumo promedio de 30 litros de agua caliente por persona. Por lo que el tanque de almacenamiento tiene un volumen interno para albergar 180 litros de agua, este volumen no tiene en cuenta en volumen interno de los tubos de vacío que aproximadamente albergan 18 litros de agua.

4.2.2 Numero de tubos de vacío. Por recomendaciones de los comercializadores de tubos de vacío (en nuestro caso Ajover S.A.), cada tubo de vacío tiene la capacidad de calentar 10 litros de agua a una temperatura de confort para baño ($\pm 40^{\circ}\text{C}$). Por lo tanto para el calentador de agua solar que se va a fabricar se necesitan en total 18 tubos de vacío. Este parámetro de diseño será corroborado en la siguiente sección por medio del estudio del modelo matemático desarrollado.

4.2.3 Inclinación de los tubos de vacío. La inclinación de los tubos de vacío depende de la latitud de la zona (Mesa de los santos: 6.76°) y del funcionamiento del calentador de agua, se entiende por funcionamiento si el calentador va estar operando todos los días del año u operar intermitentemente por estaciones. Para este proyecto el calentador de agua solar operar todos los días del año. Una recomendación dada por el vendedor de los tubos de vacío es que la inclinación mínima de los tubos será de 15° . Por lo tanto la inclinación de los tubos de vacío para diseño es tal que para todos los días del año a las 12 del medio día los tubos estén lo más perpendicularmente posibles a los rayos solares. De esta forma se realiza un programa en MATLAB para calcular el cenit solar de una superficie horizontal para todos los días del año a las 12 del mediodía.

Como se puede ver en la figura, el valor promedio del cenit solar para una superficie horizontal es el valor de la latitud, por lo tanto los tubos de vacío deberían estar inclinados este valor de 6.76° , pero como anteriormente se explicó, el valor de la inclinación de los tubos debe ser de 15° como mínimo para que el efecto termosifón se lleve a cabo. Por lo tanto los tubos de vacío son inclinados un valor de 15° con respecto a la horizontal.

Figura 50. Cenit solar en la mesa de los santos

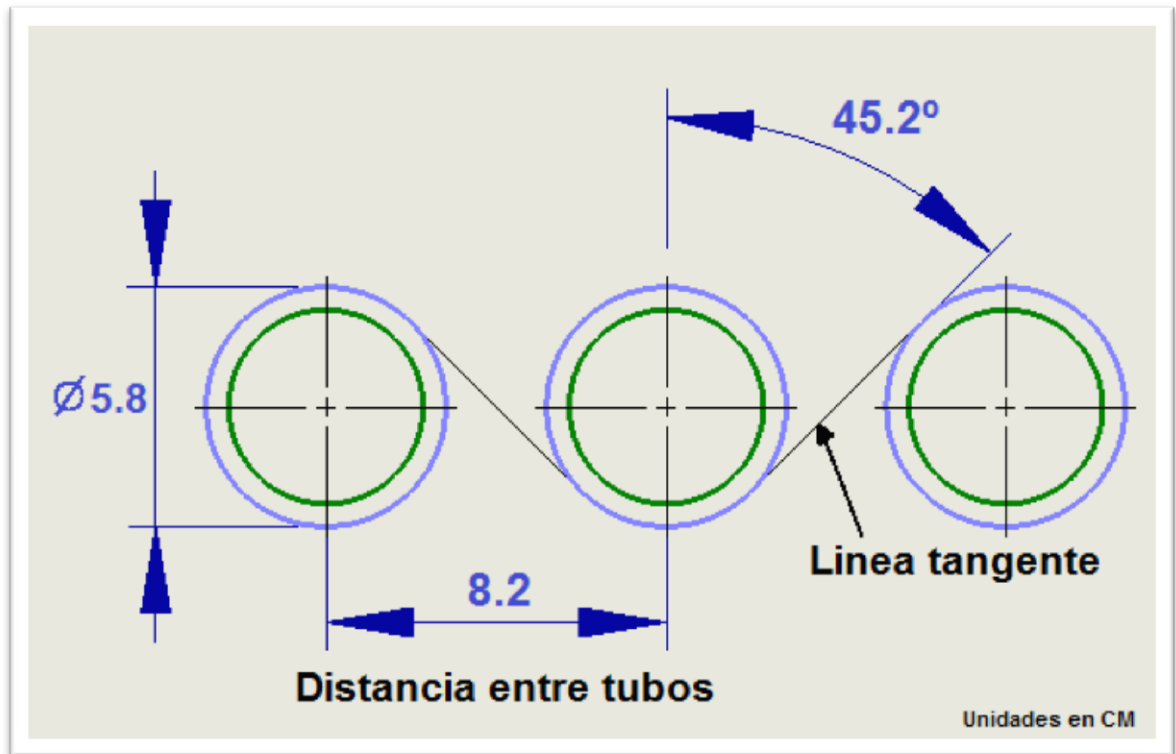


Fuente: Autores

4.2.4 Distancia entre tubos. Este parámetro se debe tener en cuenta para que los tubos no se hagan sobre unos a otros cuando los tubos reciben la mayor intensidad de radiación solar. Para el presente proyecto esta distancia entre tubos estuvo limitada a la longitud de la lámina de acero, ya que se tuvieron que distribuir las distancias entre los 18 tubos para que cupieran en la longitud de la lámina, esto con el fin de reducir los cordones de soldadura del tanque interno. En la figura 51 se puede apreciar que el ángulo formado entre una línea tangente entre dos tubos con respecto a la vertical es de aproximadamente 45° , por lo cual nos permite sin ningún problema captar la radiación solar entre las 9:00 am y las 3:00 pm, que es el rango del día en donde hay mayor potencial solar.

4.2.5 Tanque de almacenamiento de agua caliente. El tanque de almacenamiento para el agua caliente es el medio en el cual se va a almacenar la energía ganada por medio de los tubos de vacío.

Figura 51. Distancia entre tubos



Fuente: Autores

Por lo tanto dicha energía debe estar disponible en cualquier momento, para esto se debe garantizar un buen aislamiento térmico el cual nos disminuya las pérdidas de calor del tanque, su forma es cilíndrica y se ubica horizontalmente.

Para seleccionar el material del aislamiento, se remitió a la NORMA TECNICA COLOMBIANA NTC 3507, inciso 10.2.2,¹¹ la cual nos recomienda para aplicaciones exteriores el uso de materiales de espuma rígida moldeada, dicho aislante deberá estar protegido en lo posible por algún tipo de forro. Además el material aislante deberá ser resistente a la humedad, tener una baja conductividad térmica y que su funcionamiento no se vea afectado al operar a temperaturas por

¹¹ NORMA TECNICA COLOMBIANA. Instalación de sistemas domésticos de agua caliente que funcionan con energía solar. NTC 3507. Bogotá D.C.:ICONTEC 2004. 22.p

encima de los 105°C. Por lo tanto se propuso el uso de la espuma de poliuretano como material aislante, el cual es compuesto de dos elementos que al mezclarse reaccionan químicamente formando la espuma rígida que se deja moldear. Dicho aislante cumple con los requisitos anteriormente descritos. Según el espesor del aislante según LA GUIA TECNICA COLOMBIA GCT 108 inciso 4.1.3.2 numeral h¹², recomienda que la velocidad de enfriamiento de un tanque de almacenamiento aislado térmicamente debe ser de 0.75°C/hora en un rango de trabajo de 43°C a 34°C y de 1.1°C/hora en un rango de trabajo entre 50°C y 37°C, para temperaturas ambiente entre 10°C y 17°C.

El espesor mínimo de la capa de material aislante según el Manual de diseño para el calentamiento de agua debe ser de 30 mm para tanques acumuladores cuya superficie sea inferior a 2 m², y para superficies mayores será de 50 mm, según la Cámara chilena de la construcción¹³. Para el presente proyecto el área mínima será de 2.1 m², por lo tanto trabajaremos con el criterio del espesor de 30 mm y le agregamos 5 mm más de espesor, por lo tanto el espesor del aislamiento será de 35 mm. Se debe tener en cuenta que el tanque lleva un capa de 5 mm de espesor aproximadamente de fibra de vidrio la cual se usa para montar lo empaques que se utilizaran entre los tubos de vacío y el tanque de almacenamiento. Entre la capa de fibra de vidrio y el material aislante ira una lámina de acero laminado en frio calibre 20, la cual se usó como molde para la aplicación de la capa de fibra de vidrio, por ultimo como ya se mencionó anteriormente, se coloca otra lamina de acero laminado en frio calibre 20 y recubierta de anticorrosivo y laca blanca, con el fin de proteger el material aislante.

Por lo tanto los factores que determinan la geometría del tanque son:

¹² GUIA TECNICA COLOMBIANA. Especificaciones para sistemas de calentamiento de agua con energía solar, destinada al uso doméstico. GTC 108. Bogotá D.C.:ICONTEC 2004. 32.p

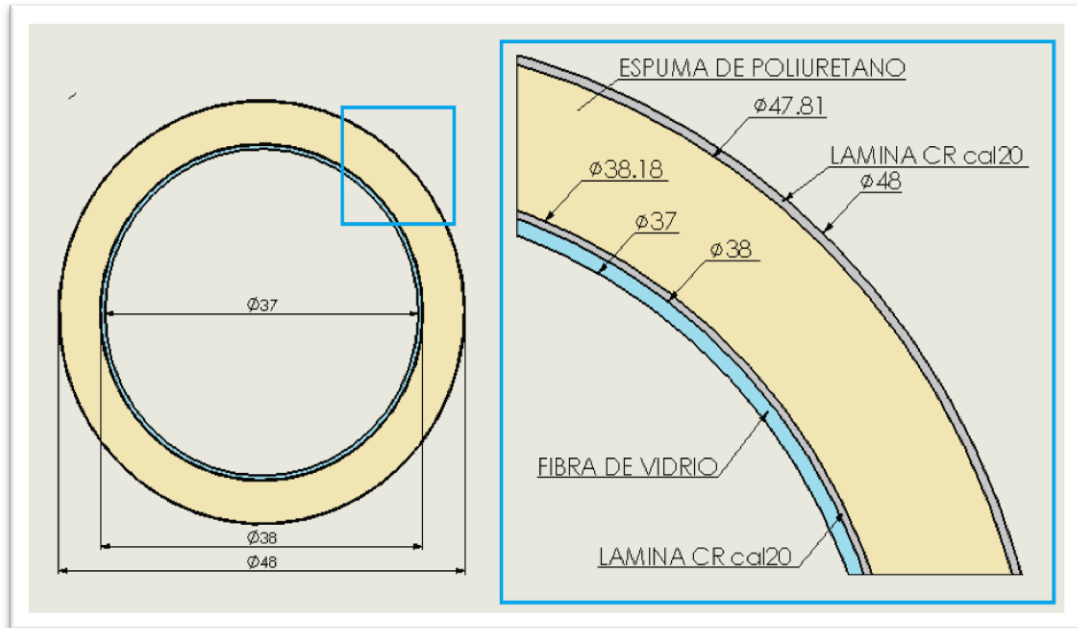
¹³ CORPORACIÓN DE DESARROLLO TECNOLÓGICO. Sistemas solares térmicos, manual de diseño para el calentamiento de agua. Santiago de Chile; Cámara chilena de construcción. 2007. 56 p.

- Tamaño de láminas de acero CR calibre 20: Su tamaño comercial más grande para esta zona es de 4x8 (122 cm x 244 cm). La lámina se usa para fabricar el tanque interno que hace las veces de molde para la fibra de vidrio. El diámetro máximo de dicho tanque se ve limitado por el ancho de la lámina (122 cm), dando un diámetro máximo de 38 cm. La lámina también se usó para fabricar el tanque externo que cubre la capa de material aislante.
- Espesor de la capa de aislante térmico: Como se mencionó anteriormente se trabajara con un espesor de 35 mm.
- Volumen de agua a almacenar: El área determinada por el diámetro del tanque interno (fabricado de lámina CR) y su longitud deben dar un volumen tal que ocupe la cantidad de agua caliente que se va a almacenar, que para nuestro tanque será de 180 litros.
- Espesor de la capa interna de fibra de vidrio: Dicho espesor depende del empaque que se utiliza entre los tubos de vacío y el tanque de almacenamiento de agua caliente.

En la figura 52 se puede apreciar la geometría básica (ver ANEXO A) con la cual se construye el tanque de almacenamiento, dicha geometría es validada por medio de los modelos matemáticos... véase numeral 4.3...

Los parámetros que se citaron anteriormente conforman el diseño térmico del calentador de agua solar, una vez validados dichos parámetros por medio del modelo matemático que a continuación se estudiara, se analizan ciertos parámetros dependientes de los parámetros del diseño térmico, y se pasa a la construcción e instalación del calentador de agua solar.

Figura 52. Medidas del tanque de almacenamiento aislado



Fuente: Autores

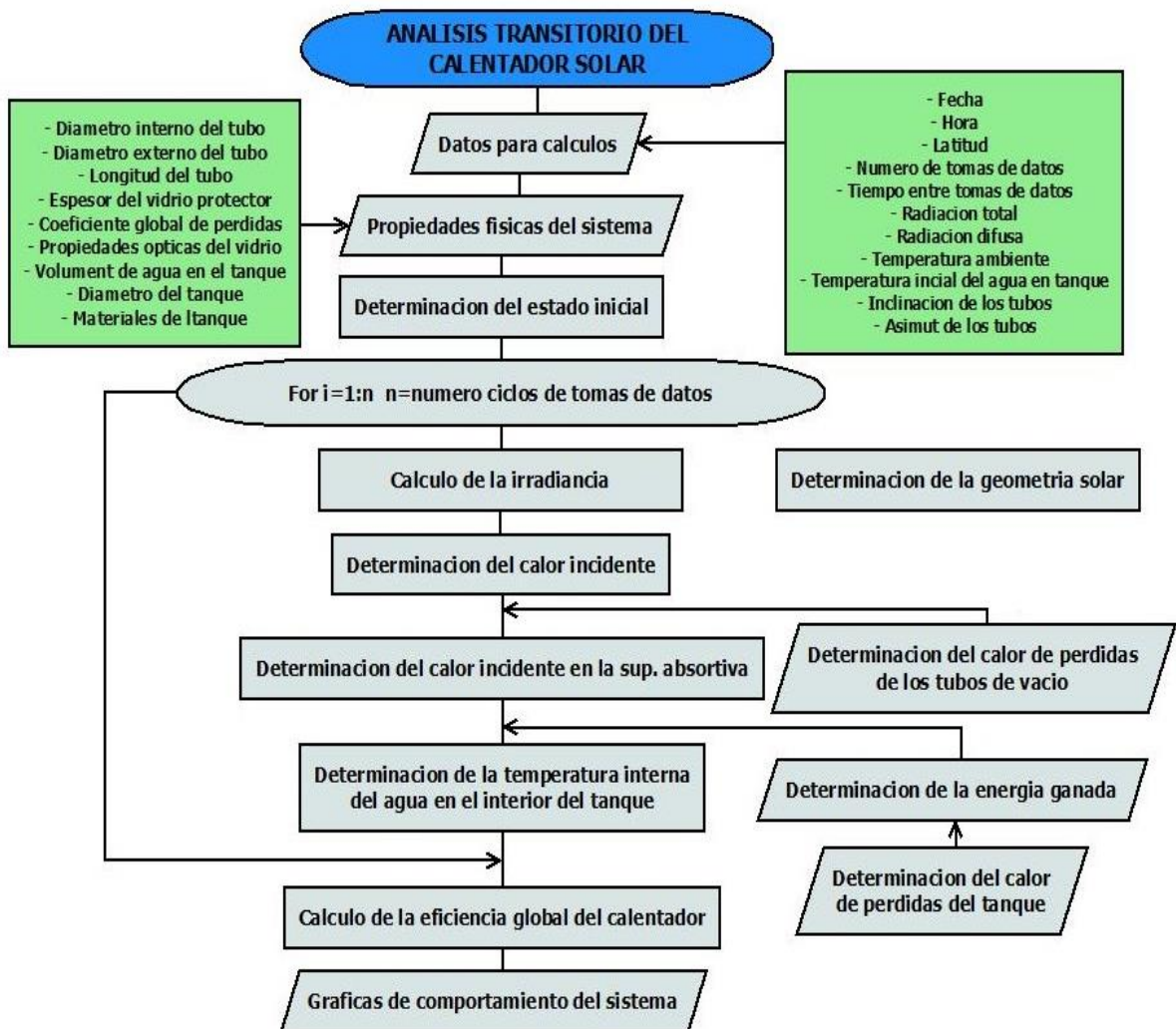
4.3 MODELO MATEMÁTICO DEL COMPORTAMIENTO TRANSITORIO DE LA TEMPERATURA DEL AGUA AL INTERIOR DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO AISLADO DEL SISTEMA SOLAR TÉRMICO

Conocer el comportamiento teórico del calentador de agua con energía solar utilizando tubos de vacío es importante para estudiar y evaluar criterios de diseño con el fin de su construcción. Se debe tener en cuenta que el modelo representa de forma adecuada el proceso de transferencia de calor que maneja el calentador, además que debe ser lo más práctico y sencillo posible con el fin de disminuir la dificultad del mismo. Por lo tanto se procede a desarrollar un programa mediante el software MATLAB para analizar la curva de comportamiento del sistema sin consumo de agua caliente.

En la figura 53 se establecen los pasos a seguir dentro del modelamiento del calentador de agua. Los datos referencia de radiación total, radiación difusa, y

temperatura ambiente fueron tomados a partir de registros de pruebas desarrolladas por estudiantes en el laboratorio de Sistema Térmicos de la escuela de ingeniería mecánica de la Universidad Industrial de Santander el día 14 de Febrero de año 2012.

Figura 53. Diagrama de flujo del modelo analítico transitorio del sistema solar térmico



Fuente: Autores

Se debe tener en cuenta ciertas simplificaciones para facilitar la elaboración del modelo:

- El modelamiento está diseñado sin consumo de agua caliente con el fin de determinar la curva de comportamiento de la temperatura del agua dentro del tanque de almacenamiento del calentador.
- Se asume que la masa de agua dentro del calentador es un volumen de control en donde le entra la energía incidente absorbida por parte de las superficies captadoras de los tubos y sale cierto porcentaje de la misma por medio de las pérdidas del tanque, como respuesta a esto el agua sufre un cambio de su energía interna y por lo tanto un cambio en su temperatura.
- Al asumir la masa de agua en tanque como un volumen de control se asume también que la temperatura de dicho volumen de control es uniforme en toda su masa.
- Se asume un coeficiente global de pérdidas promedio para los tubos colectores, dicho valor fue proporcionado por los fabricantes de los tubos de vacío.
- Se asume que las pérdidas de energía por medio del tanque de almacenamiento son un porcentaje de la energía incidente absorbida por parte de los tubos colectores, dicho porcentaje puede variar del 3% al 15%.
- Se desprecia el espesor de vidrio del tubo interno el cual se encuentra en el interior de la superficie absorbente.

4.3.1 Determinación del estado inicial. El modelamiento inicia determinando el estado inicial del sistema, para esto se debe tener en cuenta los datos para los cálculos y las propiedades físicas del sistema:

4.3.1.1 Datos para cálculo. Estos datos se componen de la fecha de la toma de datos, la hora de inicio de la toma de datos, el número de datos registrados, la latitud del sitio de ubicación del calentador, la orientación de los tubos colectores y su inclinación, los valores de radiación total, los valores de radiación difusa, los valores de la temperatura ambiente y el valor de la temperatura inicial del agua dentro del tanque.

4.3.1.2 Propiedades físicas del sistema. Aquí se establecen las propiedades de los elementos que componen el calentador solar como las propiedades ópticas de los tubos colectores junto con su geométrica y sus materiales, la geometría del tanque de almacenamiento junto a sus materiales y las propiedades del fluido calo-portador (el agua).

Una vez definido el estado inicial se debe tener en cuenta que algunos valores de los datos de cálculo y de las propiedades físicas del sistema varían en función del tiempo o en función de la temperatura interna del agua en el tanque, por lo tanto se debe asegurar la actualización de los datos que para nuestro modelo sería cada 67.9 segundos.

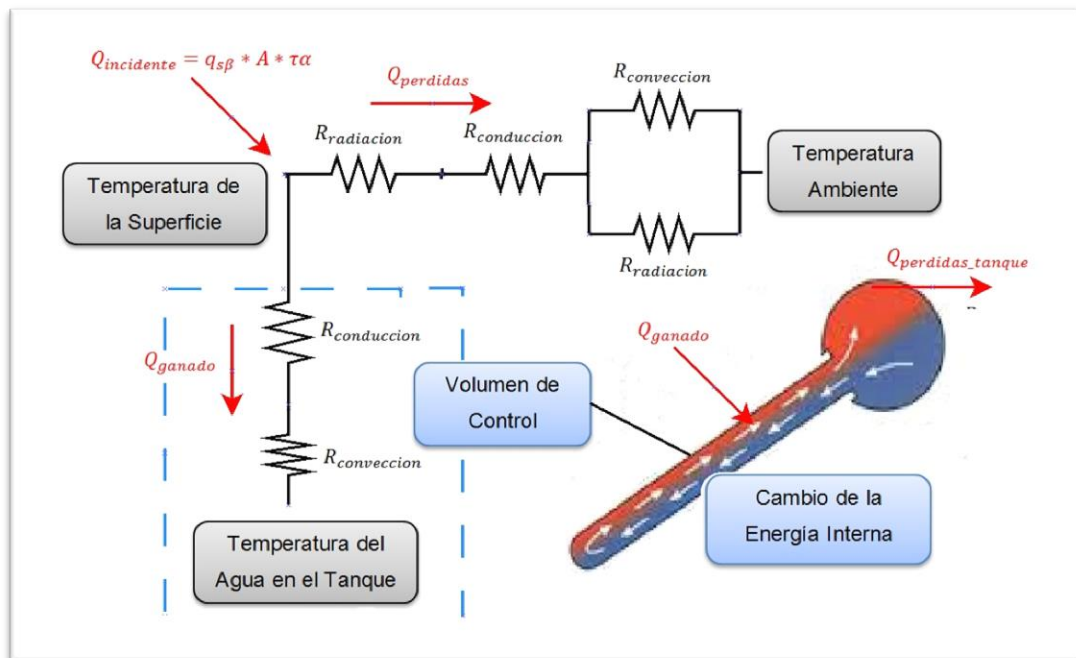
4.3.2 Determinación del calor incidente en la superficie absortiva. Después de definir los parámetros de análisis, se determina la geometría solar con el fin de determinar el calor incidente en los tubos colectores.

El calor incidente se ve afectado por la transmisividad de la cubierta protectora y la absortividad de la superficie absortiva, dicho calor reducido incide en las

superficies absorbivas. Del calor que finalmente incide en las superficies absorbivas una parte es absorbido y otra se convierte en pérdidas de calor que se generan al aumentar la temperatura de la superficie absorbiva.

4.3.2.1 Determinación del calor de pérdidas de los tubos de vacío. Para realizar el cálculo de las pérdidas de energía a través de los tubos colectores se debe tener en cuenta la temperatura del colector y la superficie absorbiva y las respectivas resistencias térmicas. Para determinar la temperatura del colector y de la superficie absorbiva se realiza un proceso de iteración doble hasta que el calor de pérdidas calculado con el coeficiente global de pérdidas promedio sea aproximadamente igual al calor de pérdidas calculado por medio de las resistencias térmicas y sus respectivas temperaturas. En la figura 54 se presenta el circuito de resistencias térmicas que intervienen en el cálculo del calor perdido a través de los tubos colectores.

Figura 54. Resistencias térmicas de los colectores solares



Fuente: Autores

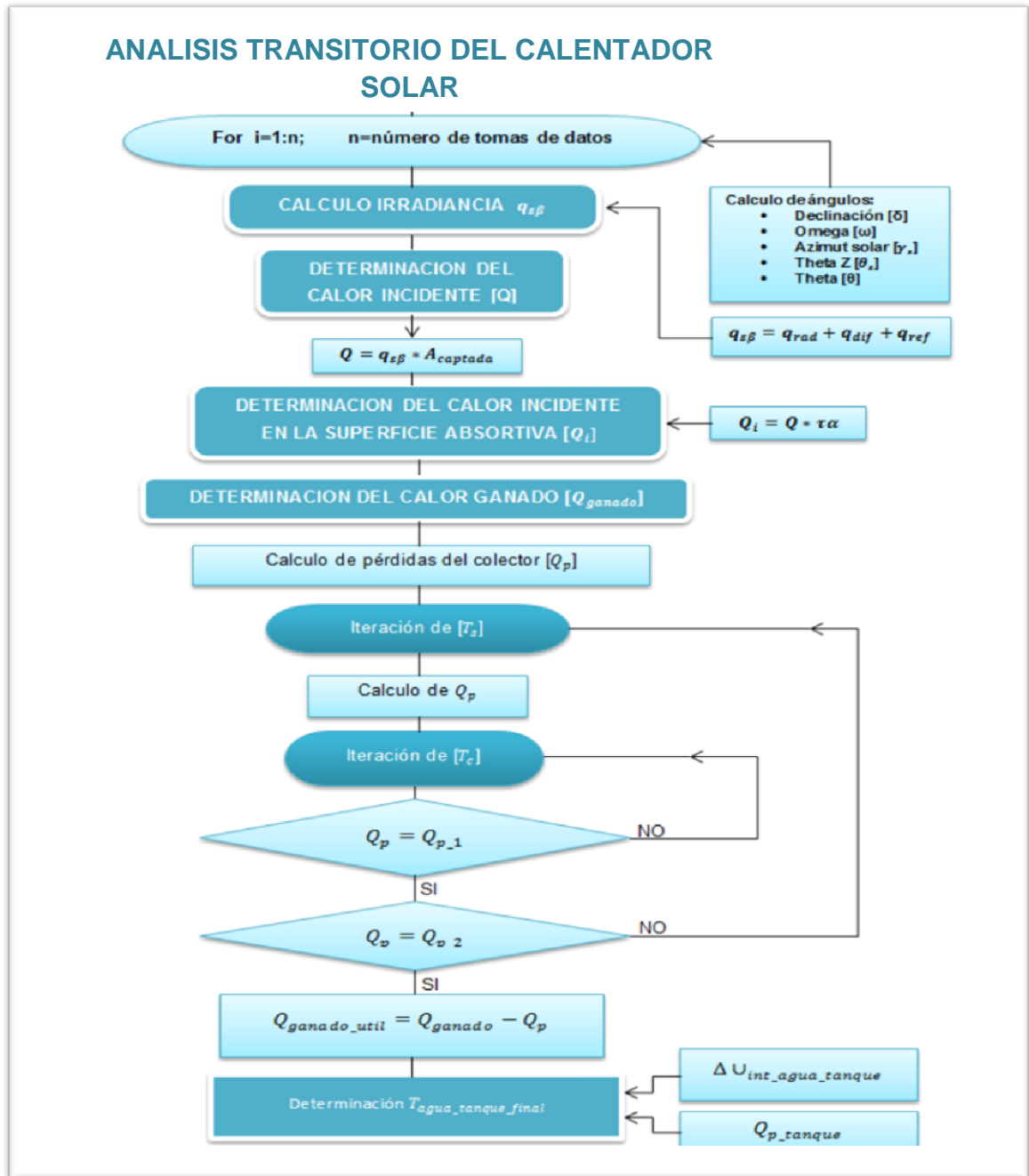
4.3.3 Determinación de la energía ganada. Una vez determinada las temperaturas del colector y de la superficie absorbente, y calculado el calor perdido en los tubos colectores, se determina el calor ganado por cada tubo, dicho calor ganado se debe multiplicar por el número de tubos para determinar la energía total ganada por todos los tubos colectores para el tiempo dado entre cada ciclo de toma de datos.

4.3.3.1 Determinación del calor de pérdidas del tanque. La energía ganada por los tubos, genera un cambio en la energía interna del agua en el tanque (siendo este nuestro volumen de control) y por lo tanto un aumento en su temperatura, dicho aumento de temperatura también genera unas pérdidas de calor a través de las superficies del tanque, estas pérdidas de energía para nuestro modelo son un porcentaje de la energía ganada por los tubos colectores.

Conociendo el cambio de la energía interna del agua en el tanque se puede determinar la temperatura final del agua en el mismo, una vez determinada dicha temperatura se dan por culminado los cálculos para la primera toma de datos, para las siguientes tomas de datos se vuelven a realizar los cálculos explicados pero teniendo en cuenta las temperaturas determinadas en los cálculos anteriores y teniendo en cuenta las variables censadas para la siguiente toma de datos (radiación total, radiación difusa y temperatura ambiente). En la figura 55 se puede apreciar los pasos (de una forma más precisa) realizados en el modelamiento matemático realizado en MATLAB.

Una vez determinadas las temperaturas y la energía ganada y perdida para cada toma de datos se almacenan los datos de energía incidente, energía captada y temperatura del agua en el tanque con el fin de analizar el comportamiento del calentador de agua.

Figura 55. Diagrama de flujo del modelo matemático del comportamiento transitorio de la temperatura de la temperatura del agua al interior del tanque aislado realizado en MATLAB.



Fuente: Autores

4.3.4 Comparación entre modelos matemáticos en función del número de tubos evacuados simples y el porcentaje de pérdidas de energía a través del tanque de almacenamiento aislado. A continuación se presentan las diferentes graficas de comportamiento teniendo en cuenta los parámetros de diseño anteriormente mencionados, y haciendo una variación del número de tubos de vacío del calentador y del porcentaje de pérdidas de energía a través del tanque de almacenamiento hacia el medio ambiente.

4.3.4.1 Modelo matemático con 18 tubos de vacío y 5% de pérdidas de energía en el tanque. En la figura 56, se aprecia el comportamiento de la temperatura del agua dentro del tanque de almacenamiento según los parámetros anteriormente mencionados y contando con 18 tubos de vacío y un 5% de pérdidas de energía en el tanque con respecto a la energía total ganada por los 18 tubos de vacío. Además para este porcentaje de pérdidas se determinó un coeficiente global de perdidas promedio de $U_{p_tanque} = 2.55 [W/m^2]$ y una eficiencia global promedio del 82.6%. Se observa que la curva tiene un buen comportamiento, aunque la temperatura final sea 7°C por encima de la temperatura de agua caliente que se requiere (36°C - 40°C).

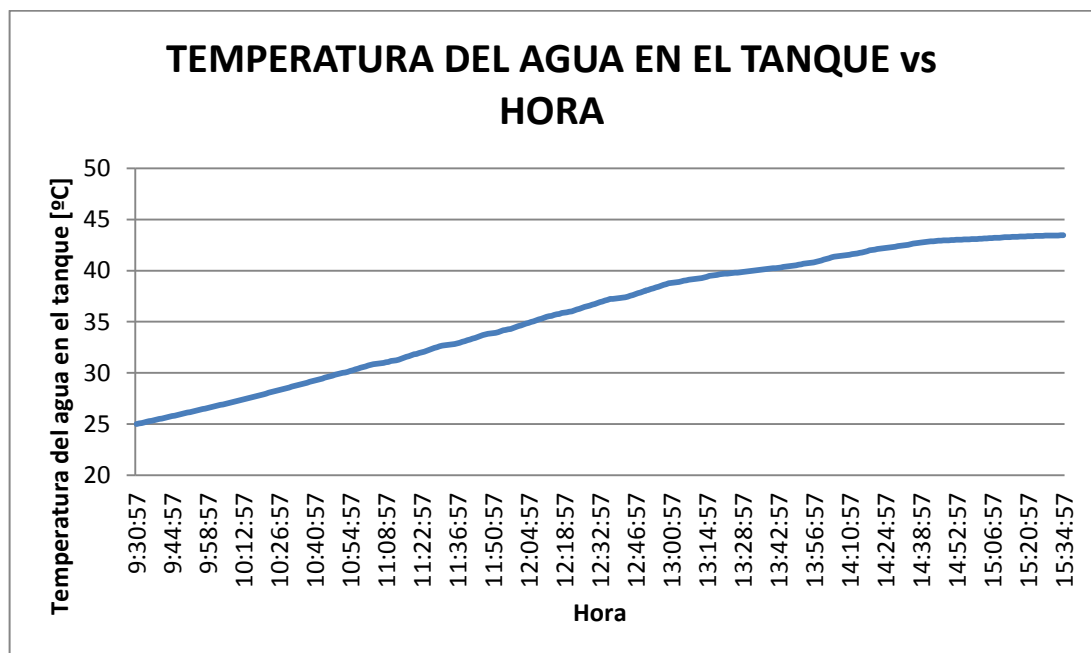
4.3.4.2 Modelo matemático con 15 tubos de vacío y 5% de pérdidas de energía en el tanque. En la figura 57, se aprecia el comportamiento de la temperatura del agua dentro del tanque de almacenamiento según los parámetros anteriormente mencionados y contando con 15 tubos de vacío y un 5% de pérdidas de energía en el tanque con respecto a la energía total ganada por los 15 tubos de vacío. Además para este porcentaje de pérdidas se determinó un coeficiente global de perdidas promedio de $U_{p_tanque} = 2.57 [\frac{W}{m^2}]$ y una eficiencia global promedio del 94.6%.

Figura 56. Curva teórica de la temperatura del agua en el tanque con 18 tubos de vacío y 5% de pérdidas de energía en el tanque.*



Fuente: Autores

Figura 57. Curva teórica de la temperatura del agua en el tanque con 15 tubos de vacío y 5% de pérdidas de energía en el tanque.



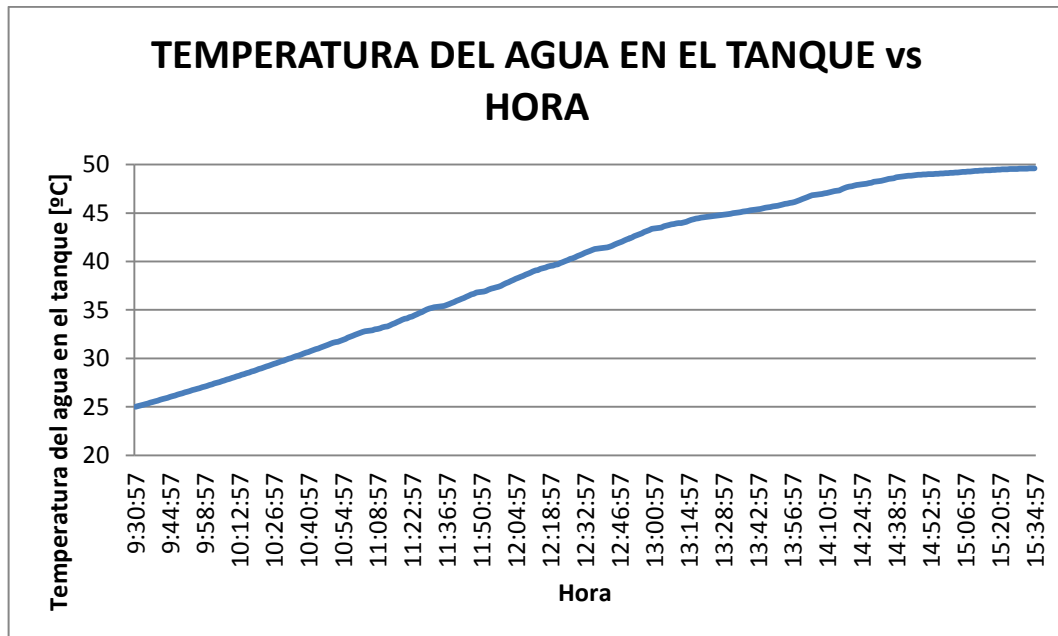
Fuente: Autores

* Graficas en Excel del modelo matemático.

Al igual que el modelo anterior la curva tiene un buen comportamiento, aunque la temperatura final sigue estando por encima en 3°C de la temperatura de agua caliente que se requiere (36°C - 40°C), por lo tanto se aprecia el efecto de haber quitado los 3 tubos de vacío con respecto al anterior modelamiento.

4.3.4.3 Modelo matemático con 20 tubos de vacío y 5% de pérdidas de energía en el tanque. En la figura 58, se aprecia el comportamiento de la temperatura del agua dentro del tanque de almacenamiento según los parámetros anteriormente mencionados y contando con 20 tubos de vacío y un 5% de pérdidas de energía en el tanque con respecto a la energía total ganada por los 20 tubos de vacío. Además para este porcentaje de pérdidas se determinó un coeficiente global de perdidas promedio de $U_{p_tanque} = 2.64 \left[\frac{W}{m^2} \right]$ y una eficiencia global promedio del 94.4%.

Figura 58. Curva teórica de la temperatura del agua en el tanque con 20 tubos de vacío y 5% de pérdidas de energía en el tanque.

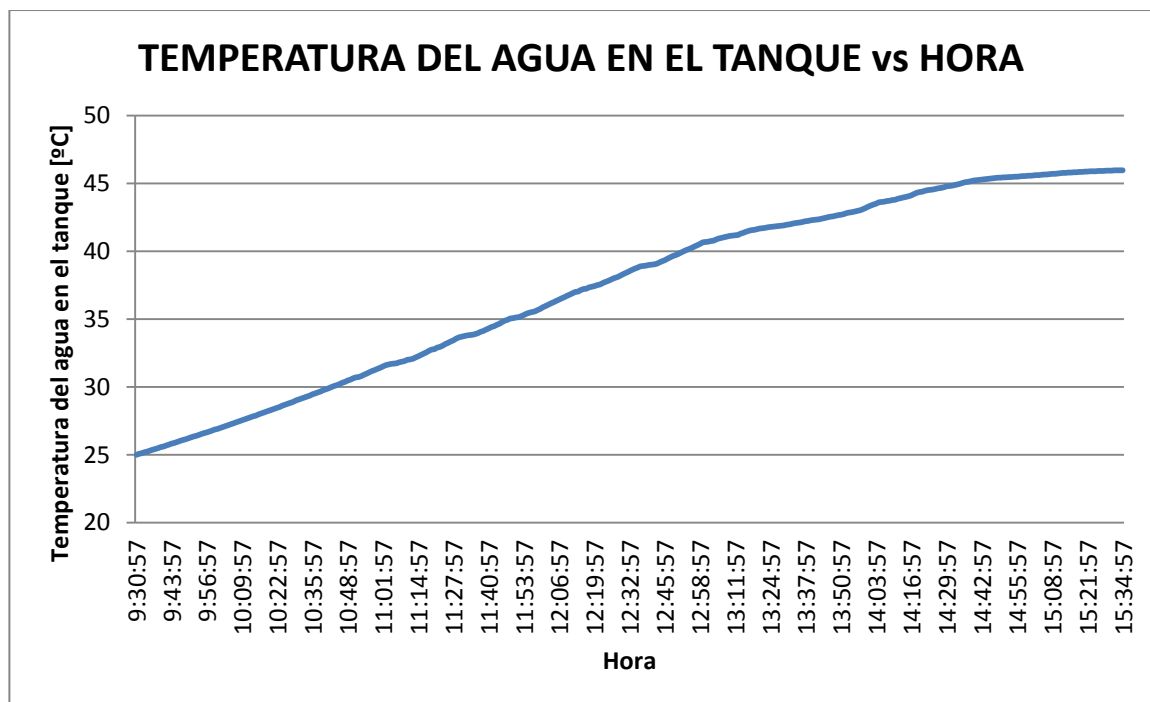


Fuente: Autores

Al igual que el modelo anterior la curva tiene un buen comportamiento, aunque la temperatura final sea de casi 10°C por encima de la temperatura de agua caliente que se requiere (36°C - 40°C), por lo tanto se aprecia el efecto de haber agregado los 2 tubos de vacío con respecto al modelamiento que contiene 18 tubos.

4.3.4.4 Modelo matemático con 18 tubos de vacío y 10% de pérdidas de energía en el tanque. En la figura 59, se aprecia el comportamiento de la temperatura del agua dentro del tanque de almacenamiento según los parámetros anteriormente mencionados y contando con 18 tubos de vacío y un 10% de pérdidas de energía en el tanque con respecto a la energía total ganada por los 18 tubos de vacío. Además para este porcentaje de pérdidas se determinó un coeficiente global de perdidas promedio de $U_{p_tanque} = 5.57 \left[\frac{W}{m^2} \right]$ y una eficiencia global promedio del 78.27%.

Figura 59. Curva teórica de la temperatura del agua en el tanque con 18 tubos de vacío y 10% de pérdidas de energía en el tanque.

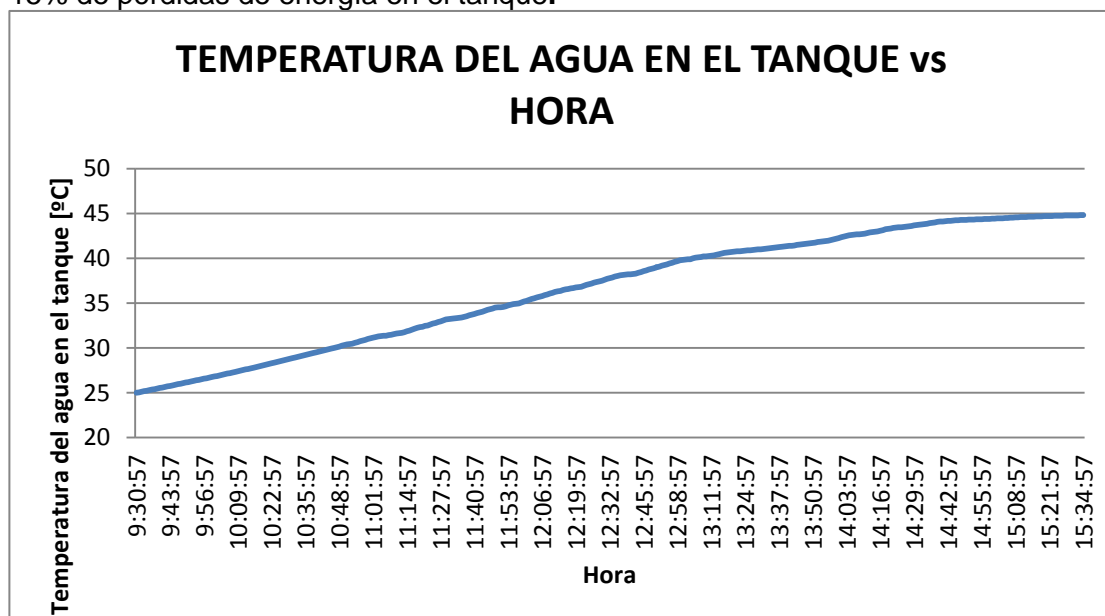


Fuente: Autores

Para este modelo en el cual variamos el porcentaje de pérdidas de energía del tanque, la curva tiene un buen comportamiento, aun cuando la temperatura final sea de casi 6°C por encima de la temperatura de agua caliente que se requiere (36°C - 40°C), por lo tanto se aprecia el efecto de aumentar las pérdidas del tanque, ya que la eficiencia global del calentador disminuye con respecto al modelo que cuenta con un porcentaje más bajo de pérdidas de energía.

4.3.4.5 Modelo matemático con 18 tubos de vacío y 15% de pérdidas de energía en el tanque. En la figura 60, se aprecia el comportamiento de la temperatura del agua dentro del tanque de almacenamiento según los parámetros anteriormente mencionados y contando con 18 tubos de vacío y un 15% de pérdidas de energía en el tanque con respecto a la energía total ganada por los 18 tubos de vacío. Además para este porcentaje de pérdidas se determinó un coeficiente global de pérdidas promedio de $U_{p_tanque} = 8.85 \left[\frac{W}{m^2} \right]$ y una eficiencia global promedio del 84.46%.

Figura 60. Curva teórica de la temperatura del agua en el tanque con 18 tubos de vacío y 15% de pérdidas de energía en el tanque.

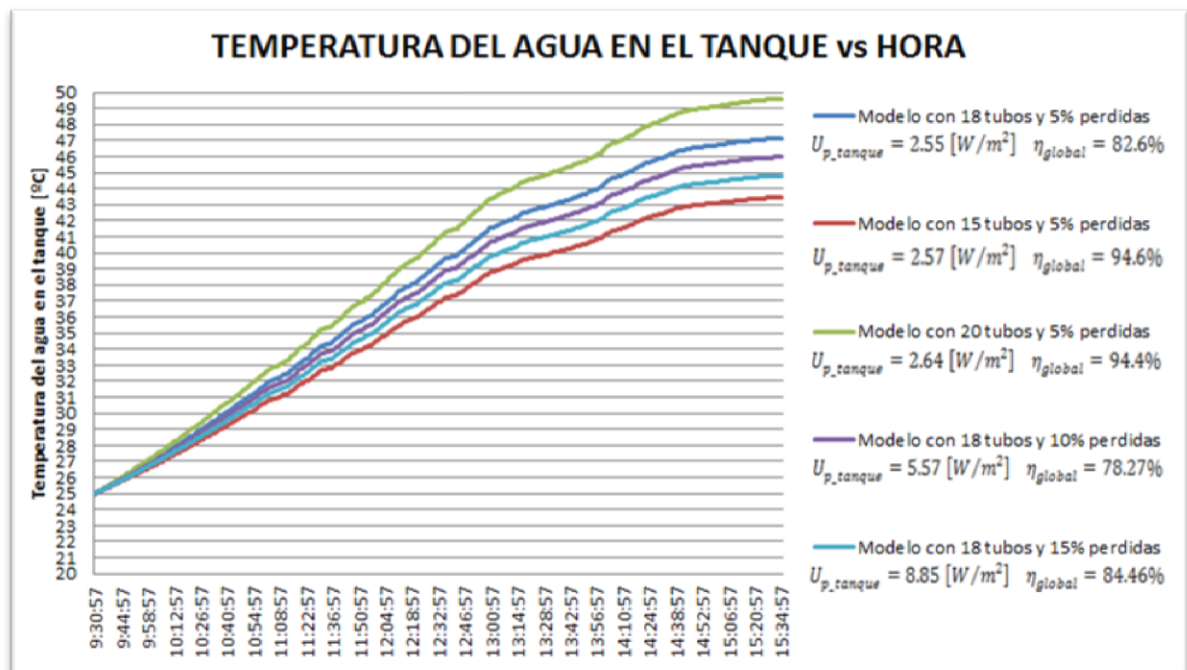


Fuente: Autores

Para este modelo en el cual variamos el porcentaje de pérdidas de energía del tanque, la curva tiene un buen comportamiento, aun cuando la temperatura final sea de casi 4°C por encima de la temperatura de agua caliente que se requiere (36°C - 40°C), por lo tanto se aprecia el efecto de aumentar las pérdidas del tanque, pero si comparamos este modelo matemático con el anterior no tiene la misma tendencia de disminuir la eficiencia debido al aumento del coeficiente global de pérdidas, por lo tanto este modelo no tendría la misma validez que los anteriores.

En la figura 61 se aprecian los diferentes modelos matemáticos desarrollados:

Figura 61. Curvas de comparación entre los modelos teóricos matemáticos



Fuente: Autores

Como se puede ver en la figura anterior la variación entre los 5 modelos matemáticos desarrollados no es mucha, por lo que se corrobora que los parámetros de diseño obtenidos a partir de las recomendaciones dadas por los

fabricantes de los tubos, los manuales y las normas, cumplen con los requisitos del calentador, mostrando un buen comportamiento teórico dado por el modelo que contiene 18 tubos de vacío y un 5% de pérdidas de la energía en el tanque de almacenamiento.

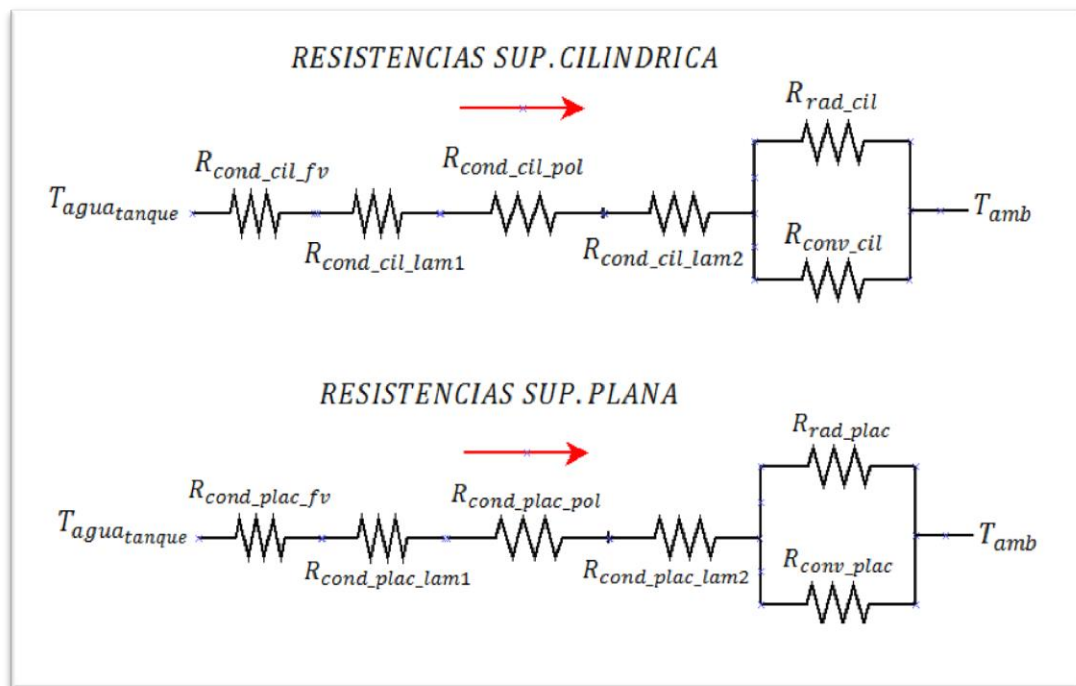
Vale la pena aclarar que se escoge dicho modelo matemático como base para la construcción del calentador de agua solar, debido a que en la actualidad no se encuentran datos precisos de diseño para la construcción de colectores solares termosifónicos, y solo se cuenta con ciertas recomendaciones dadas por fabricantes, manuales y normas (dichas normas aplican para colectores solares de placa plana). Además como se puede ver en las curvas de la figura 47, el modelo matemático que contiene 20 tubos y un 5% de pérdidas de energía no es viable debido a que a pesar del aumento de la temperatura final del agua en el tanque la eficiencia es alta y no se ve afectada por este aumento de tubos; el modelo que contiene 15 tubos y un 5% de pérdidas de energía tampoco es viable debido a que a pesar que la temperatura final del agua en el tanque disminuyo, se presentó un aumento en el coeficiente global de perdidas promedio; por último el modelo que contiene los 18 tubos y un 15% de pérdidas de energía también no es viable debido a que a pesar del aumento del coeficiente global de perdidas, la eficiencia aumenta en vez de disminuir, como si se presenta en el modelo que contiene los 18 tubos y el 10%. Por lo tanto lo más viable es trabajar con el modelo que contiene los 18 tubos y un 5% de pérdidas y el modelo que contiene los mismos 18 tubos pero con un 10% de pérdidas. Como se va a trabajar con cualquiera de los dos modelos se escoge el modelo de 10 tubos y 5% de pérdida de energía, ya que entre menos perdidas de energía mayor será la eficiencia con respecto al otro modelo. No obstante el hecho de haber desarrollado los modelos matemáticos asumiendo unos porcentajes de pérdida de energía sin tener en cuenta la geometría real con la que se va a construir el calentador merece un análisis para validar la geometría del tanque de almacenamiento aislado.

4.4 MODELO MATEMÁTICO DEL COMPORTAMIENTO NOCTURNO DE LA TEMPERATURA DEL AGUA AL INTERIOR DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO AISLADO DEL SISTEMA SOLAR TÉRMICO

Con la geometría del tanque de almacenamiento anteriormente descrita y trabajando con la temperatura máxima a la que llegó el agua en el tanque de almacenamiento para el modelo matemático de los 18 tubos y 5% de pérdidas (47°C), se puede calcular un coeficiente global de pérdidas de energía del tanque de almacenamiento si se asume que todo el volumen de agua está a dicha temperatura (ver figura 62).

4.4.1 Cálculo del coeficiente global de pérdidas de energía del tanque de almacenamiento a partir del diseño. A continuación se presenta el diagrama de resistencias térmicas del tanque de almacenamiento tanto para la sección cilíndrica como para las tapas laterales (superficie plana).

Figura 62. Circuito de resistencias térmicas del tanque



Fuente: Autores

El cálculo del coeficiente de pérdidas globales en función de la geometría y los materiales tomados en el diseño, se determina mediante las siguientes ecuaciones.

$$(UA)_1 = \frac{1}{\sum \text{Resistencias}_{cilindro}}$$

$$(UA)_1 = \frac{1}{R_{cond_cil_fv} + R_{cond_cil_lam1} + R_{cond_cil_pol} + R_{cond_cil_lam2} + R_{conv_rad_cil}}$$

$$(UA)_1 = 1.108 \left[\frac{W}{^\circ K} \right]$$

$$(UA)_2 = \frac{1}{\sum \text{Resistencias}_{tapas_laterales}}$$

$$(UA)_2 = \frac{1}{R_{cond_plac_fv} + R_{cond_plac_lam1} + R_{cond_plac_pol} + R_{cond_plac_lam2} + R_{conv_rad_plac}}$$

$$(UA)_2 = 0.068 \left[\frac{W}{^\circ K} \right]$$

$$(UA)_{TOTAL} = (UA)_1 + (UA)_2 = 0.176 \left[\frac{W}{^\circ K} \right]$$

$$U_t = \frac{(UA)_{TOTAL}}{A_{TOTAL_TANQUE}} = 0.4066 \left[\frac{W}{m^2 * ^\circ K} \right]$$

El cálculo de los dos coeficientes de pérdidas globales (superficie cilíndrica y tapas planas laterales) se realizó por medio del software MATLAB, al igual que el cálculo del coeficiente combinado de transferencia de calor por convección y radiación hacia el exterior para la temperatura del agua en el tanque de 47°C, calculado anteriormente.

Si comparamos el coeficiente global total de pérdidas para el tanque calculado por diseño ($U_t = 0.4066$), con el coeficiente global de pérdidas del tanque calculado por el modelo matemático que se trabajó ($U_{t_{modelo_{18}}} = 2.55$), se puede apreciar que el valor calculado a partir de la geometría de construcción del tanque

es menor que el calculado en el modelo matemático habiendo asumido un 5% de pérdidas de energía del calor ganado. Por lo tanto se puede trabajar con la geometría propuesta anteriormente para el tanque de almacenamiento sin afectar de manera drástica la curva de comportamiento del modelo matemático estudiado.

Por medio de la siguiente ecuación dada en la (NORMA NTC 4368)^{14*}, se puede determinar la temperatura final del agua a partir del coeficiente global de pérdidas del tanque, en el transcurso en el cual no hay captación de energía solar por parte de los tubos colectores, como ocurre en la noche.

$$U_t = \left(\frac{M * C_p}{A_t * \Delta t} \right) * \ln \left(\frac{T_i - T_{amb}}{T_f - T_{amb}} \right) \quad [10]$$

Donde M es la masa de agua, C_p es la capacidad calorífica del agua a presión constante, A_t es el área exterior del tanque, Δt es el intervalo de tiempo analizado, T_i es la temperatura inicial promedio del agua, T_f es la temperatura final promedio del agua, y finalmente T_{amb} es la temperatura ambiente promedio.

Despejando la temperatura final del tanque quedaría la ecuación de la siguiente manera:

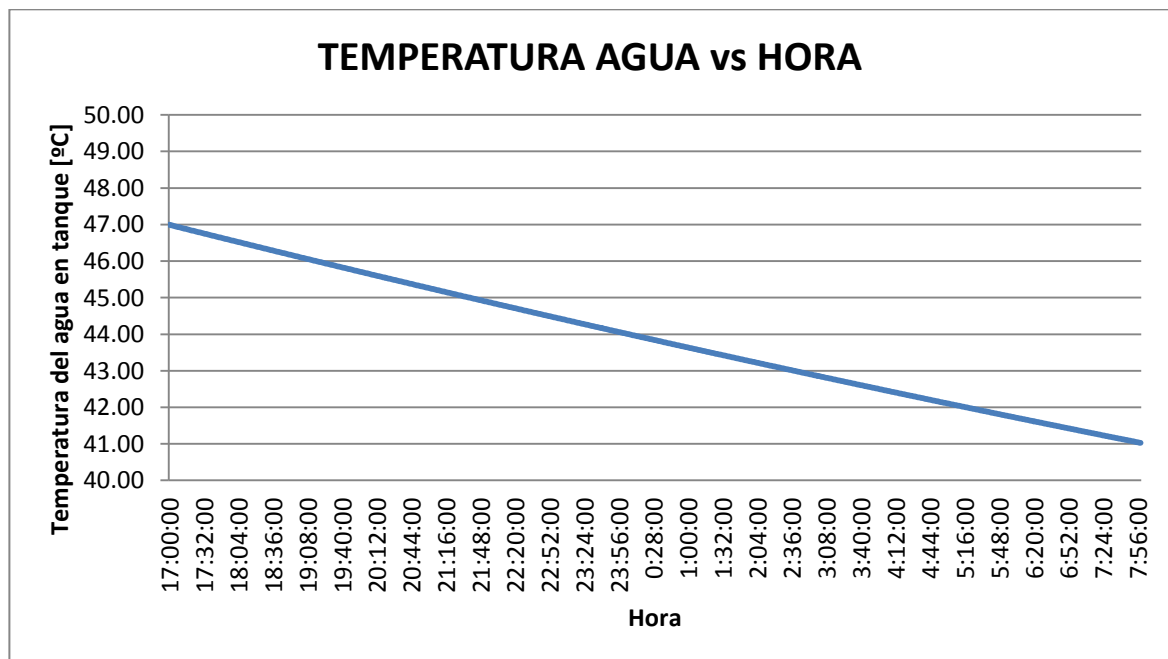
$$T_f = \frac{T_i - T_{amb}}{e^{\left[\frac{(U_t) * (A_t) * (\Delta t)}{m * C_p} \right]}} - T_{amb}$$

En la figura 63 se aprecia el comportamiento de la temperatura del agua en el tanque de almacenamiento, trabajando con el modelo de 18 tubos ya que se empezó a enfriar el agua a la temperatura que alcanzo dicho modelo (47°C), pero el coeficiente de pérdidas de calor del tanque se trabajó con el calculado a partir de la geometría con la que se va a construir el calentador.

* ¹⁴ NORMA TECNICA COLOMBIANA. Eficiencia energética, sistemas de calentamiento de agua con energía solar y componentes. NTC 4368. Bogotá D.C.: ICONTEC 1997. 32.p

Como se puede ver en la figura anterior, la temperatura del agua en el tanque de almacenamiento tan solo disminuye 6°C, para un tiempo de 15 horas, en las cuales no hubo captación de energía solar ni tampoco consumo de agua caliente. Por lo tanto el modelo de enfriamiento cumple con los requerimientos en donde la temperatura del agua en el tanque debe tener una reducción de temperatura máxima de 1.1°C/hora. Dato suministrado por la GTC 108¹⁵.

Figura 63. Curva teórica del comportamiento nocturno de la temperatura del agua al interior del tanque de almacenamiento aislado



Fuente: Autores

En la sección de pruebas y análisis de resultados... véase numeral 6... en la cual se presentan las gráficas de comportamiento del calentador de agua solar ya construido, se podrá comparar la variabilidad entre el comportamiento del modelo matemático y el comportamiento del calentador de agua construido.

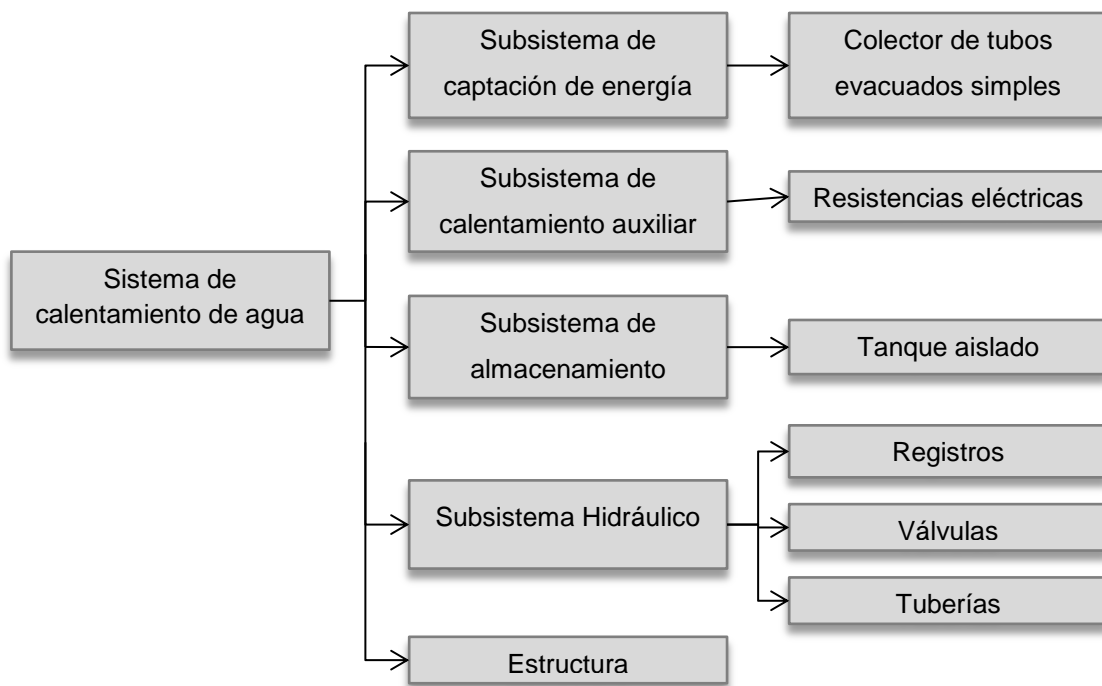
¹⁵ GUIA TECNICA COLOMBIANA. Especificaciones para sistemas de calentamiento de agua con energía solar, destinada al uso doméstico. GTC 108. Bogotá D.C.:ICONTEC 2004. 30.p

5. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA Y MONTAJE DEL CALENTADOR DE AGUA CON CAPTACIÓN DE ENERGÍA POR TUBOS EVACUADOS SIMPLES

5.1 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

El sistema de calentamiento de agua asistido por energía solar está compuesto por diversos subsistemas, y a su vez, a cada subsistema lo componen diferentes elementos, esto se puede observar en la siguiente ilustración (ver Cuadro 3).

Cuadro 3. Subsistemas y elemento que componen el sistema de calentamiento de agua



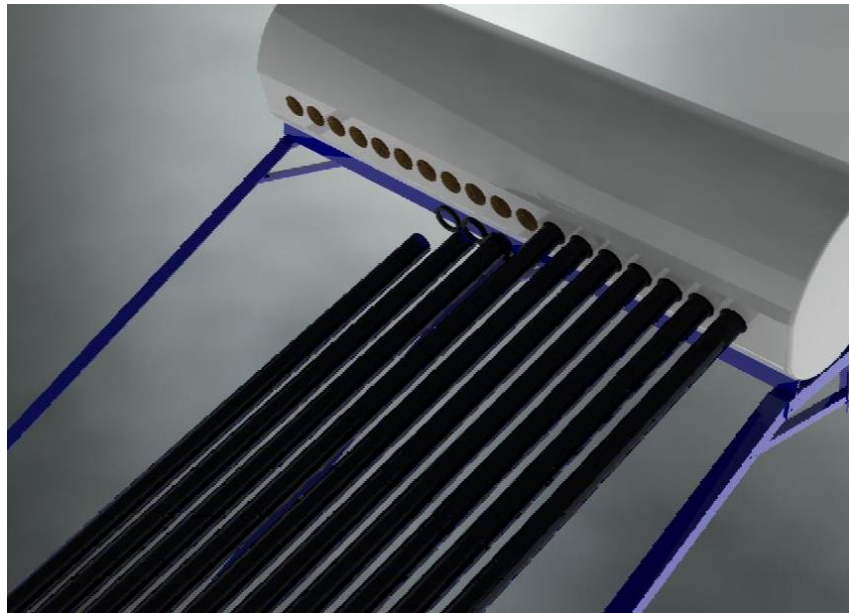
Fuente: Autores

5.1.1 Subsistema de captación de energía. Es el encargado de recibir la energía procedente del sol y permite la conversión de la radiación del sol en energía útil.

Para esta captación el colector utilizado es compuesto de tubos evacuados (de vacío) simples.

5.1.1.1 Colector Solar de Tubos de Vacío (Evacuados) simples. Este sistema está compuesto por 18 tubos de vidrio solar al vacío (Ver Figura 65), Cada tubo de vacío se compone de dos tubos de cristal de vidrio borosilicato concéntricos de alta transmisividad.

Figura 64. Colector solar de tubos de vacío simples

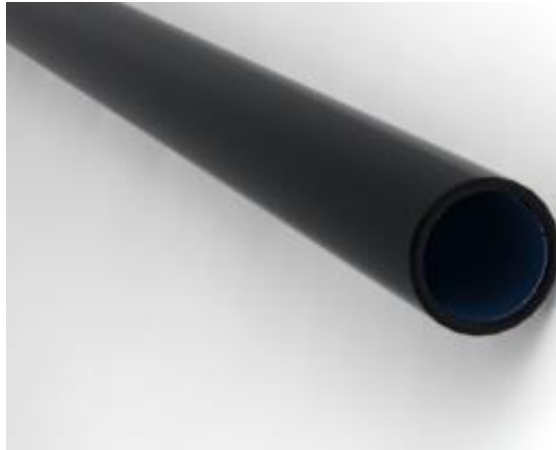


Fuente: Autores

El tubo exterior es transparente, con un índice de transmisividad extremadamente alto permitiendo que los rayos de luz casi no se reflejen en su superficie. El exterior del tubo interior es de vidrio cubierto con pulverización catódica “1 capa” o “1 target” (Al-N/Al) donde el material “pulverizado” es el Aluminio exclusivamente. Estos tubos se pueden reconocer por el color azul en el interior del tubo al vacío (Ver Figura 66). Entre el tubo interno y externo hay un vacío de aire. Los tubos resisten granizo de hasta 25 mm de diámetro, están unidos directamente con el

tanque acumulador aislado, por lo tanto contienen el agua a calentar directamente. Las propiedades de cada uno de los tubos se observan en el cuadro 4.

Figura 65. Tubo de Vacío (Evacuado) simple



Fuente: Autores

5.1.1.2 Empaque de silicón. El empaque concéntrico al tubo de vacío tiene como objetivo crear hermeticidad entre el tanque y el tubo, este se encuentra en el interior del tanque del calentador solar, el empaque es fabricado con silicona traslúcida resistente a las altas temperaturas. (Ver Figura 67).

Figura 66. Empaque de silicón para el interior del tanque



Fuente: Autores

Cuadro 4. Propiedades de los tubos de vacío simples

Especificación del ítem	Propiedad a temperatura de Operación (100°C)
Material del vidrio	Vidrio borosilicatado 3.3
Expansión térmica	3.3E-6 mm/°C
Diámetro externo del tubo de vidrio	58 mm
Diámetro interno del tubo de vidrio	47 mm
Longitud	1800 mm
Espesor de las paredes de vidrio	1.8 mm
Peso de un solo tubo	2.0 Kg
Calidad de vacío	$P \leq 3E-3$ Pa
Material de Absorción	AL-N/AL
Coefficiente de absorción	$\alpha \geq 92.5$ %
Emisividad	$\epsilon \leq 7.5$ %
Trasmisividad del vidrio	$T \leq 0.89$
Resistencia al viento	30 m/s
Pérdida de calor	ULT ≤ 0.75 W/(m ² *°C)
Resistencia máxima	0.8 MPa
Resistencia al granizo	Ø 25 mm

Fuente: Autores

5.1.2 Subsistema de calentamiento auxiliar. Para asegurar el abastecimiento de la demanda de energía térmica, se dispone de un subsistema auxiliar de energía.

Se ha seleccionado la utilización de energía eléctrica (efecto Joule). Se cuenta con dos resistencias tubulares fabricadas a base de níquel con forros de acero inoxidable (tipo 304 y 316) y cobre. (Ver Figura 68).

Las resistencias tubulares son roscadas en el manguito de la parte lateral inferior del tanque de almacenamiento (Ver Figura 69).

Figura 67. Resistencia tubular eléctrica

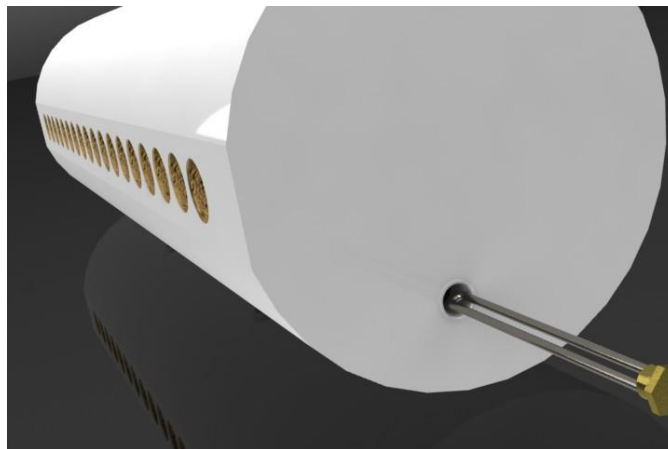


Fuente: Autores

Cada una de las resistencias tiene las siguientes características:

- Potencia de 2000 W
- Tensión eléctrica de 120 V
- Rosca de 1"

Figura 68. Ubicación de la resistencia tubular eléctrica

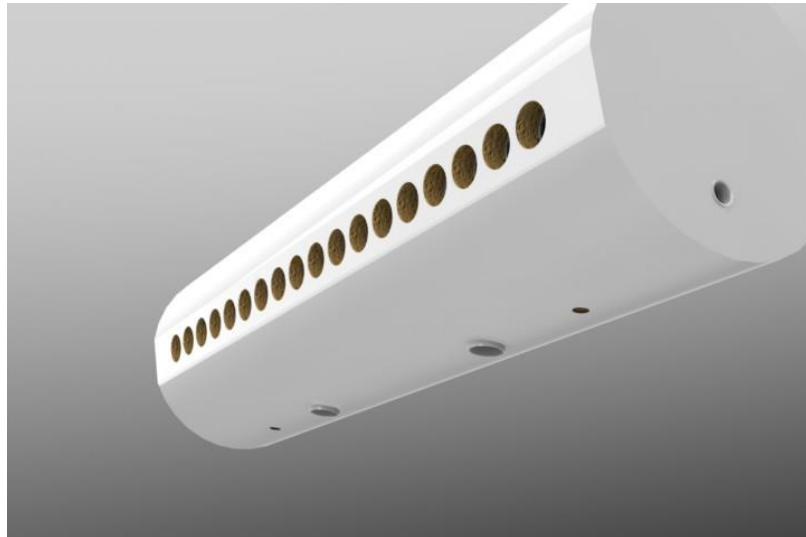


Fuente: Autores

5.1.3 Subsistema de almacenamiento. Para recibir y almacenar el agua que se ha calentado en el subsistema de captación de energía se requiere de un tanque de almacenamiento.

5.1.3.1 Tanque de almacenamiento aislado. Es un tanque metálico aislado térmicamente del ambiente exterior para garantizar que sus pérdidas térmicas sean las mínimas posibles. Del tanque de almacenamiento sale el agua caliente para el consumo doméstico, que es respuesta por una entrada directa de red de suministro. (Ver Figura 70).

Figura 69. Tanque de almacenamiento aislado



Fuente: Autores

Entre las funciones que desempeña el tanque de almacenamiento se destacan:

- Amortiguamiento de las fluctuaciones de corta duración en la energía solar que recibe el colector solar.
- Prolongación del lapso de tiempo de suministro de agua caliente por encima de los periodos de generación de calor.
- Da autonomía al sistema solar térmico en los intervalos eventuales en los que no ocurra generación de calor.

Debido a que las condiciones de operación son relativamente exigentes, el tanque está compuesto de materiales que permiten soportar las condiciones de presión, temperatura, corrosión, dureza de agua, oxidación y resistencia a la intemperie. Los principales materiales que componen el tanque de almacenamiento son: (Ver Figura 71).

a) Poliéster reforzado con fibra de vidrio. El Poliéster Reforzado con Fibra de Vidrio, PRFV, ubicado al interior del tanque y en contacto directo con el agua, es un material compuesto que ofrece excelentes propiedades químicas y mecánicas para el almacenamiento aislado térmico de agua.

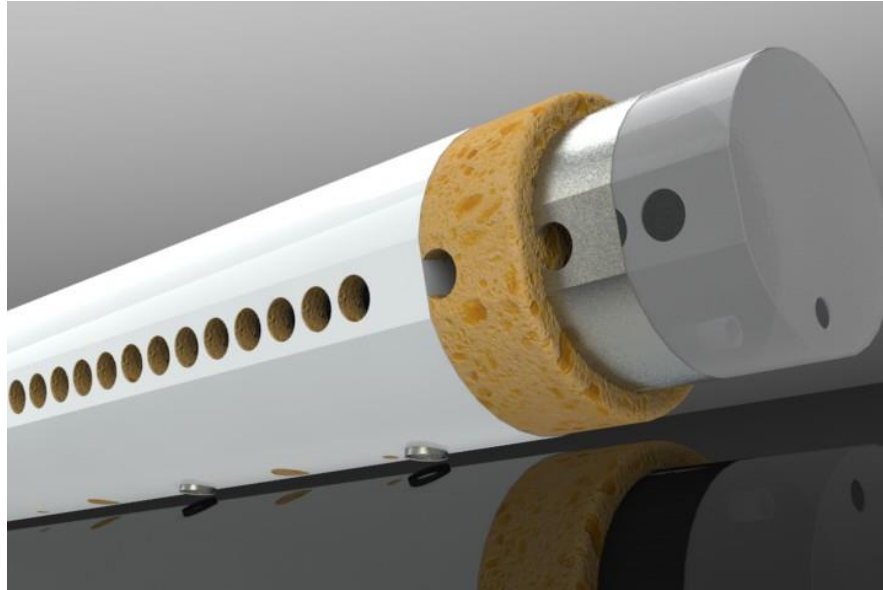
b) Lamina CR calibre 20 (Interior). Determina la estructura del poliéster reforzado con fibra de vidrio, además tiene soldadas las uniones (manguitos) para conectar la red hidráulica y taponar los orificios de mantenimiento y drenaje. (Ver figura 9)

c) Espuma de Poliuretano. Tiene una elevada capacidad aislante debido a la baja conductividad térmica que posee el gas espumante de sus células cerradas, además presenta una gran resistencia frente a los efectos del paso del tiempo y tiene una larga vida útil, manteniéndose sin deteriorarse durante más de 50 años. Se forma básicamente por la reacción química de dos compuestos, un polioliol y un isocianato, aunque su formulación necesita y admite múltiples variantes y aditivos. Dicha reacción libera dióxido de carbono, gas que va formando las burbujas.

d) Lamina CR calibre 20 (Exterior). Protege el aislamiento del ambiente exterior y la capa de anticorrosivo y esmalte blanco contribuyen a un acabado suficientemente estético y agradable.

Para contribuir con la protección del aislamiento, se le adicionan a los tubos los cubre polvos (empaques) fabricados con caucho. (Ver figura 72).

Figura 70. Composición del tanque de almacenamiento asilado*



Fuente: Autores

Figura 71. Cubre Polvo (empaquete)

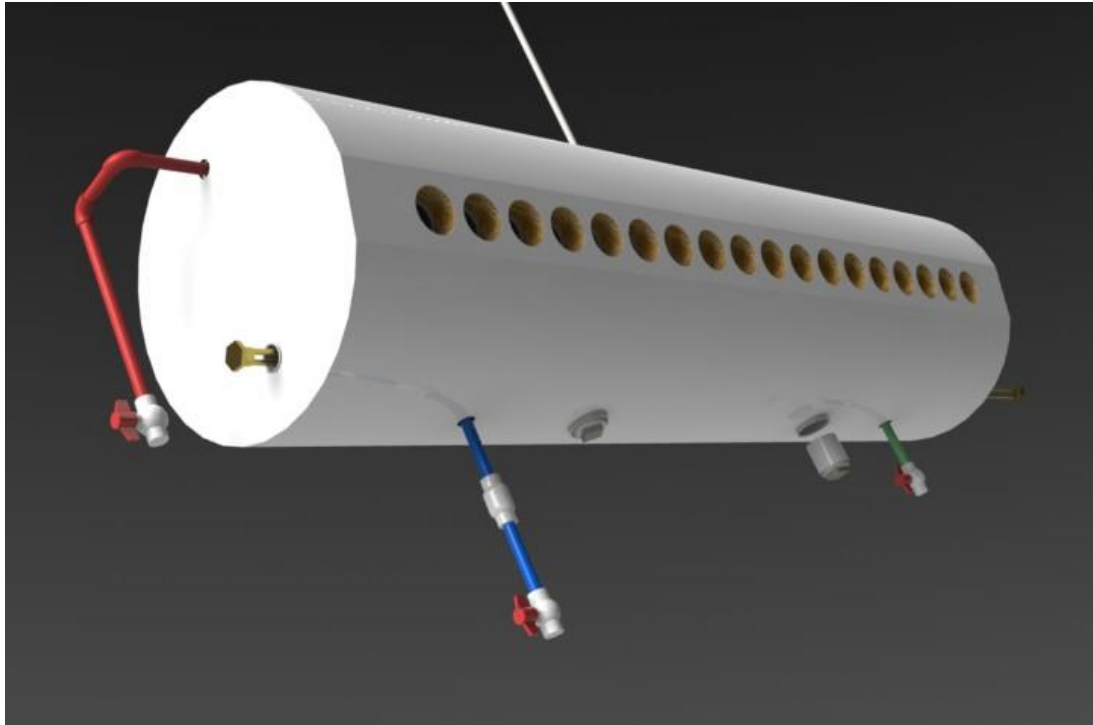


Fuente: Autores

* De derecha a izquierda: Poliéster reforzado con fibra de vidrio (gris), Lamina CR calibre 20 interior (plateada), Espuma de poliuretano (ocre claro), Lamina CR calibre 20 exterior (blanco).

Las diferentes uniones (manguitos), que quedan distribuidas alrededor del tanque de almacenamiento, se utilizan para; conectar la red hidráulica, taponar los orificios de mantenimiento, drenaje y adicionar el subsistema de calentamiento auxiliar. En la figura imagen se observa la distribución establecida. (Ver Figura 73).

Figura 72. Distribución en el tanque de almacenamiento asilado*

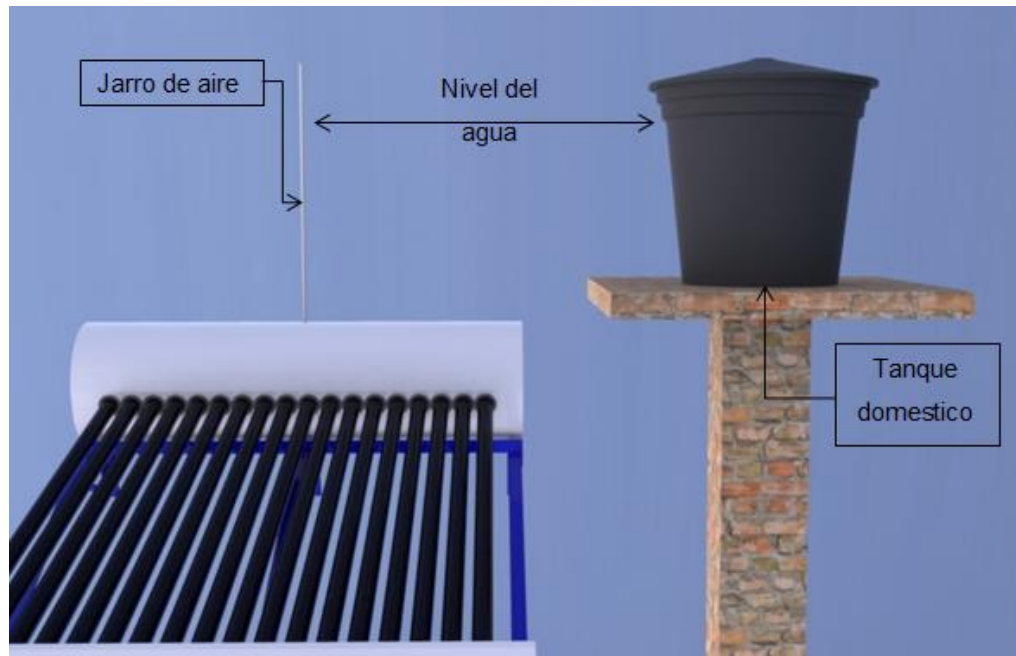


Fuente: Autores

5.1.3.2 Jarro de aire. El jarro de aire desempeña la función de compensación de presiones internas dentro del tanque de almacenamiento aislado térmicamente, incluyendo el alivio de presiones debidas al aumento de temperatura interna del agua. También libera las partículas de aire dentro del sistema. (Ver Figura 74).

* Lateral izquierdo; Tubería agua caliente (roja) y resistencia. Lateral derecho; Resistencia. Superior; jarro de aire. Inferior: (de izquierda a derecha) Tubería de agua fría (azul), Tapones roscados de 2 pulgadas para los orificios de mantenimiento y drenaje (verde).

Figura 73. Jarro de aire a nivel del agua dentro del tanque domestico



Fuente: Autores

5.1.4 Subsistema hidráulico. El circuito hidráulico de consumo de agua caliente o red de agua caliente en la vivienda es idéntico al que normalmente se incluye en toda vivienda. En el circuito hidráulico se incluyen; registros, válvulas – Cheques y tuberías.

Para la instalación del sistema solar térmico se requieren los accesorios de intercomunicación entre el tanque de almacenamiento y el circuito de consumo (duchas). Disponemos de los siguientes elementos:

- a) Una válvula cheque de $\frac{1}{2}$ pulgada, para la entrada de alimentación de agua fría (en la entrada del tanque de almacenamiento,...Véase el numeral 5.1.3.1, figura 73..., que evita que el tanque de desocupe en caso de un corte en el suministro de agua. (Ver Figura 75)
- b) Un registro de $\frac{1}{2}$ pulgada para cortar la llegada de agua fría en caso de mantenimiento al tanque. (Válvula de bola de $\frac{1}{2}$ de PVC, Ver Figura 76).

Figura 74. Válvula cheque de ½ pulgada PVC



Fuente: <http://www.distribucionesrodriguez.mx/valvulas.php>

- c) Un registro de ½ pulgada para cortar la salida de agua caliente en caso de realizar mantenimiento a la red (Válvula de bola de ½ de CPVC)
- d) Un registro de drenaje de ½ pulgada para drenar el tanque. (Válvula de bola de ½ de PVC)

Figura 75 Válvula de bola de ½ pulgada PVC

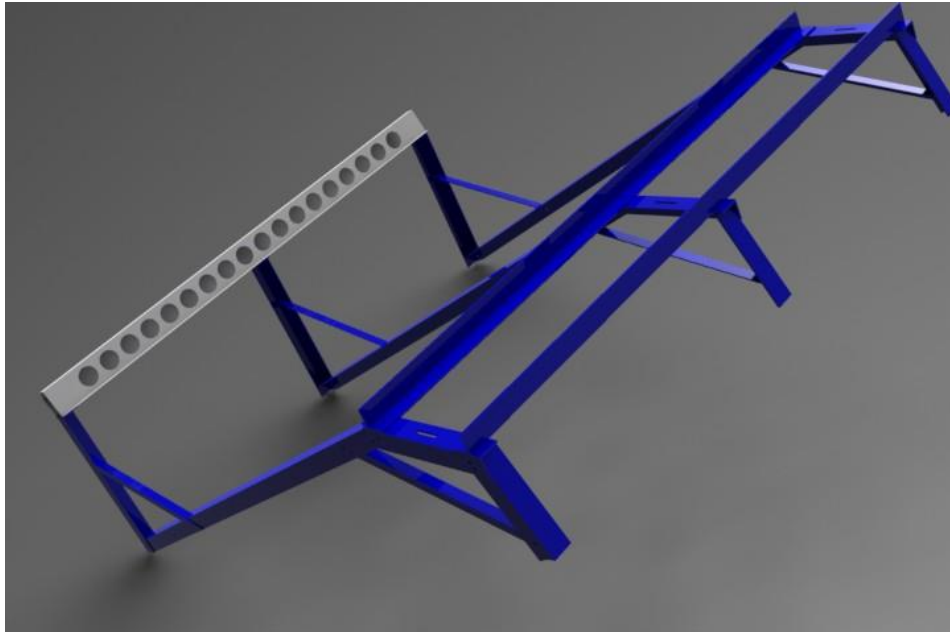


Fuente: <http://www.distribucionesrodriguez.mx/valvulas.php>

- e) Las tuberías y accesorios para agua caliente de ½ pulgada de CPVC.
- f) Las tuberías y accesorios para agua fría de ½ pulgada de PVC.

5.1.5 Estructura (Marco estructural). La estructura está compuesta por ángulos de acero de 2"×1/8 de acero laminado en caliente fabricado en grado de acero estructural ASTM-A-36, con un acabado en pintura electrostática que la protegerá de la intemperie evitando oxidación. La estructura es ensamblada con tornillo hexagonal M8 grado 2 (Ver Figura77). A la estructura se le adhiere la base de los tubos de vacío, en donde va a reposar la parte inferior de los mismos con la ayuda de un empaque de caucho que evita los deslizamientos o movimientos de los tubos.

Figura 76. Estructura



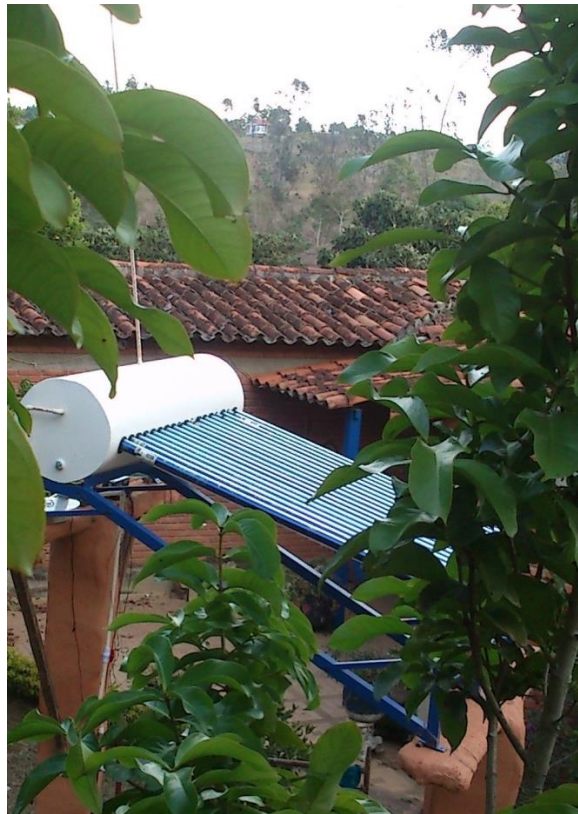
Fuente: Autores

La estructura en acero proporciona la inclinación adecuada (15° sobre la horizontal con orientación al sur), para captar en mayor proporción radiación solar directa en el transcurso del año en esta zona geográfica (Mesa de los Santos, Santander...Véase el numeral 5.2...). El diseño permite un posicionamiento adecuado sobre el techo de la residencia en el que va a ser instalada.

5.2 DESCRIPCIÓN DEL MONTAJE

El sistema Solar térmico es ubicado en La mesa de los Santos, Santander. Los puntos de consumo de agua caliente son dos duchas en el interior de la cabaña de la finca *Villa Elisa*. (Ver Figura 78).

Figura 77. Calentador en la cabaña de la Finca Villa Elisa



Fuente: Autores

El sistema solar térmico trabaja por termosifón y flujo natural, y funciona por gravedad a baja presión, por tanto se garantiza que la salida del agua del tanque domiciliario esté por encima del tanque térmico aislado, para suministrar agua por gravedad al sistema. El tanque domiciliario es en realidad dos tanques de 500 L cada uno conectados entre sí. (Ver Figura 79).

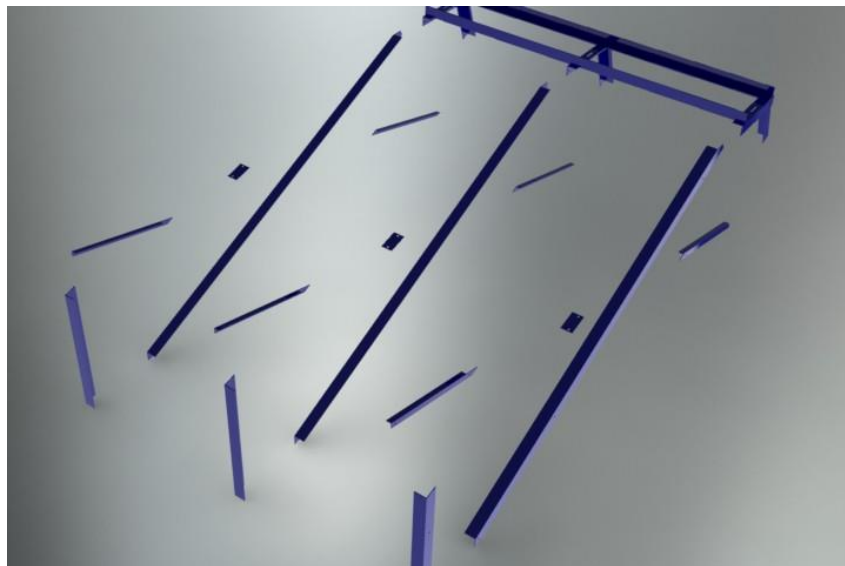
Figura 78. Tanque domiciliario



Fuente: Autores

5.2.1 Ensamble de marco estructural (estructura). Para ensamblar el marco estructural se ordenaron e identificaron las piezas que componen la estructura, (ver figura 80), y posteriormente se unieron de forma ordenada con los tornillos hexagonales de acero inoxidable.

Figura 79. Explosión marco estructural

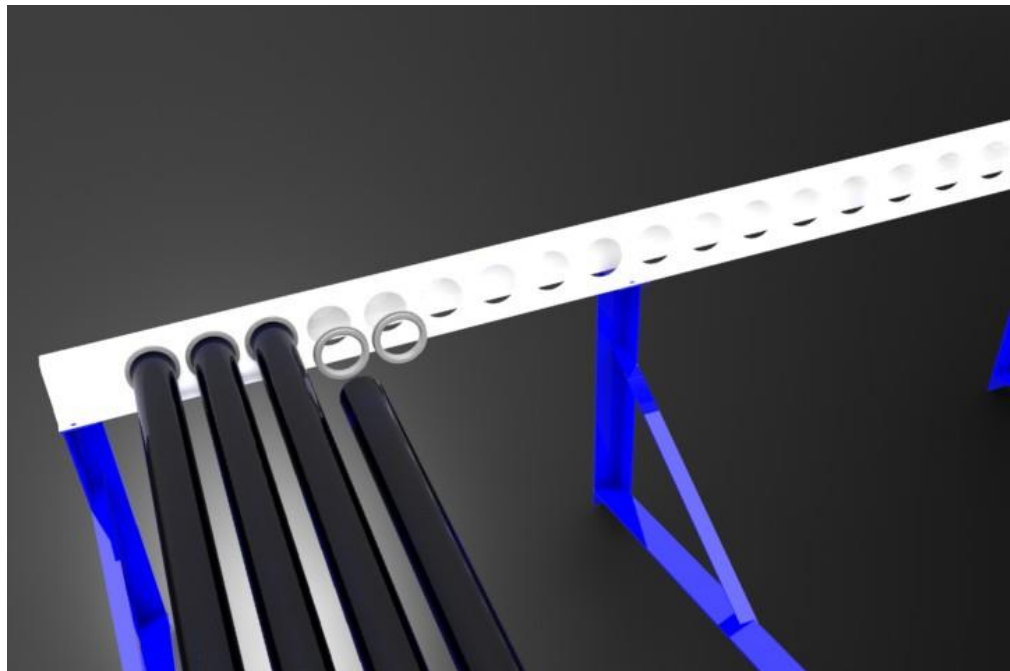


Fuente: Autores

5.2.2 Instalación de la base de los tubos. A la estructura (azul) se le ha ensamblado la base de los tubos de vacío (blanca) por medio de tornillos

hexagonales M8 grado 2, en donde va a reposar la parte inferior de los tubos. Posteriormente, se han puesto los 18 empaques de caucho negro, de forma concéntrica, que cumplen la función de fijar los tubos evacuados simples, para evitar los deslizamientos o movimientos que puedan causar algún tipo de daño al sistema. (ver figura 81).

Figura 80. Instalación de la base de los tubos y su empaque



Fuente: Autores

5.2.2 Posición del sistema. Como se ha mencionado anteriormente, del diseño se ha establecido que la posición adecuada del sistema es con orientación al sur y con 15 grados de inclinación de los tubos evacuados simples con respecto a la horizontal, con el tanque en la parte más alta).

La forma de la estructura del sistema solar térmico garantiza que sobre el tejado de la cabaña de la finca *Villa Elisa*, se cumplan los requerimientos mencionados. Sin embargo, con el objetivo de permitir la observación del sistema a terceras personas, se decidió, en conjunto con los propietarios de la finca, posicionarlo en

la parte este de la cabaña, en frente a la puerta de ingreso de la misma. Se construyeron columnas en ladrillo de tierra (ver figura 82), que garantizan los siguientes requerimientos de montaje y ubicación:

a) Inclínación adecuada para asegurar el correcto funcionamiento del sistema solar térmico, donde los tubos evacuados simples deben tener un ángulo de inclinación mínimo de 15° con la horizontal, orientados al sur. (ver figura 83).

Figura 81. Columnas en ladrillo de tierra.



Fuente: Autores

b) Para garantizar radiación directa sobre la superficie de los tubos la mayor parte posible del día, se evita la interrupción de la radiación directa con algunos objetos como árboles, entre otros, que al proyectar su sombra sobre el sistema solar térmico genera un descenso en la eficiencia.

Figura 82. Sistema solar térmico posicionado



Fuente: Autores

c) La salida de agua del tanque domiciliario está por encima del tanque de almacenamiento aislado, para que el agua sea suministrada por gravedad y se pueda realizar el procedimiento por termosifón.

5.2.3 Instalación del tanque. El tanque tiene cuatro tornillos soldados que calzan en los agujeros de la base del tanque de la estructura (ver figura 84). Los agujeros permiten la adecuada inclinación del tanque y luego son fijados con sus respectivas tuercas (hexagonal M8 grado 2).

5.2.4 Instalación de los tubos evacuados simples. Luego de verificar que los tubos no se encuentren con algún tipo de daño o fractura y que en la punta de cada tubo se observe el color plateado, se procedió a la instalación de forma sistemática y meticulosa.

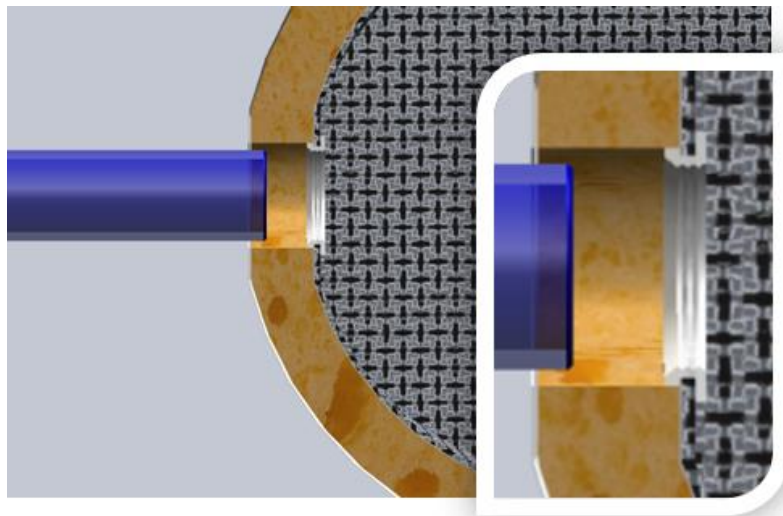
Figura 83. Instalación del tanque



Fuente: Autores

En primer lugar se adicionan los empaques de silicón dentro del tanque de almacenamiento aislado, como se observa en la figura 85, asegurando su correcta posición y ensamble.

Figura 84. Adición de los empaques de silicón



Fuente: Autores

Posteriormente, cada uno de los tubos fue instalado bajo el siguiente orden:

- Se desempaco cada tubo y se limpia su superficie con un trapo seco, o una mezcla de agua-jabón.
- Se aplicó mezcla de agua-jabón en los empaque de silicón, que se encuentra en los agujeros del tanque de almacenamiento, y en el extremo del tubo evacuado simple que va insertado en el tanque.
- Se colocó en la parte posterior del tubo de vacío el cubre polvo (empaque de caucho) para luego ser deslizado a lo largo del tubo.
- Para insertarlo en el orificio del tanque de almacenamiento aislado, se giró lentamente en dirección de las manecillas del reloj mientras se aplicaba presión uniforme hasta que el tubo entre.
- Para la instalación en la base de tubos, se deslizo y giró el tubo en sentido opuesto a las manecillas del reloj lentamente y aplicando presión hasta asentar el tubo en la base, teniendo cuidado de no hacerlo bruscamente y dañar la punta del tubo.

Para la instalación de los tubos de vacío es recomendable iniciar del centro del calentador solar hacia los lados para evitar algún accidente en el momento de la instalación.

5.2.5 Instalación del subsistema hidráulico. A partir de Distribución en el tanque de almacenamiento aislado...Véase el numeral 5.1.3.1... El circuito hidráulico de consumo de agua caliente o red de agua caliente en la vivienda es idéntico al que normalmente se incluye en toda vivienda (ver figura 86).

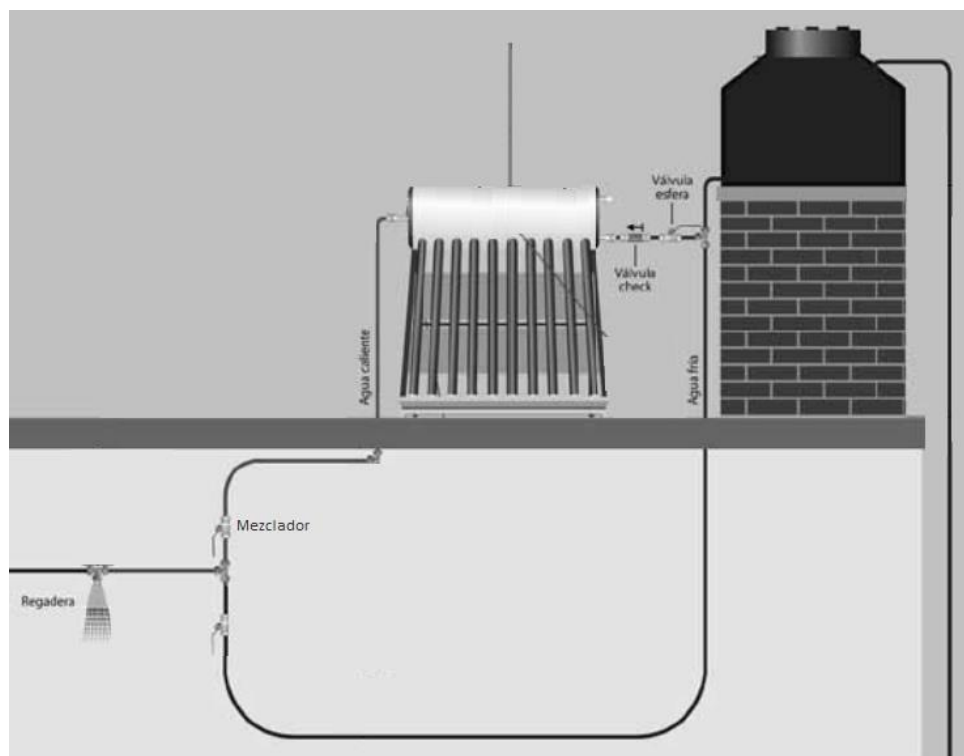
De forma simplificada, se puede observar en la siguiente figura el funcionamiento del sistema, con los elementos más básicos que componen el sistema solar térmico para entregar la demanda de agua caliente a las duchas. (Ver figura 87).

Figura 85. Instalación del subsistema hidráulico



Fuente: Autores

Figura 86. Elementos básicos de la red hidráulica del sistema solar térmico



Fuente: Modificado por autores

6. PRUEBAS Y ANALISIS DE RESULTADOS

El análisis de resultados se realiza a través del desarrollo de pruebas, con el fin de establecer el comportamiento del calentador de agua solar y validar el modelo de diseño realizado. Para realizar el análisis de resultados se debe tener en cuenta el monitoreo de ciertas variables mientras este en operación. Entre las variables a monitorear se encuentra la temperatura del agua en el interior del tanque, la temperatura de entrada del agua fría al tanque, la temperatura de salida del agua caliente del tanque hacia las duchas, la temperatura ambiente, la radiación total y la radiación difusa.

Después de haber realizado la instalación de tuberías y el montaje del calentador de agua con energía solar según la respectiva orientación (mirando hacia el Sur), se dispone a realizar las pruebas de funcionamiento. Dichas pruebas se dividen en tres tipos. Las dos primeras pruebas están relacionadas con el calentamiento del agua en el interior del tanque, una prueba sin consumo de agua caliente y la otra con consumo, y la última prueba se relaciona con el calentamiento de agua en el interior del tanque, pero a partir de la energía eléctrica (resistencias eléctricas), poniendo a prueba el sistema auxiliar de calentamiento.

El montaje del sistema de monitoreo de las variables es el mismo para todas las pruebas, a continuación se presenta un paso a paso para llevarse a cabo dicho montaje:

- Ubicación de piranómetros para el registro y monitoreo de la radiación difusa y la radiación total.
- Instalación de termocuplas en el tanque de almacenamiento de agua, en la tubería de entrada de agua fría al tanque, en la tubería de salida de agua caliente

del tanque, y en el entorno (medio ambiente), con el fin de registrar y monitorear las temperaturas.

- Conexión del respectivo cableado de alimentación, comunicación y señales tanto para el módulo de adquisición de dato, como para el computador.
- Llenado de agua en el tanque de almacenamiento del calentador, se debe tener en cuenta el nivel del tanque aéreo que alimenta el calentador de agua para que este en su nivel alto.
- Ejecución del programa de registro y monitoreo desarrollado en Labview.
-

6.1 SISTEMA DE MONITOREO Y CONTROL

El sistema diseñado se encarga de almacenar los datos registrados por los elementos de medición (Termocuplas y Piranómetros), además permite el monitoreo de las variables durante el transcurso de las pruebas a realizar.

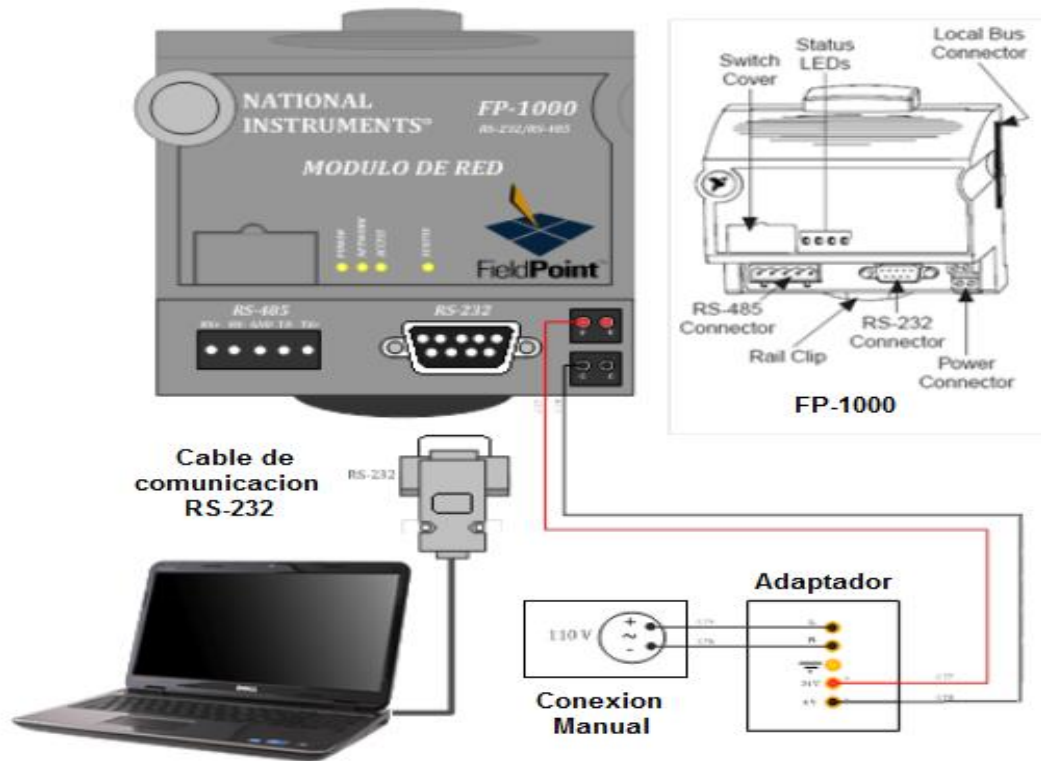
6.1.1 Adaptador. Este dispositivo es alimentado por una fuente de corriente alterna de 110 V y entrega una salida 12 V de corriente continua el cual alimenta los módulos del Field point.

6.1.2 Field point. Es el módulo de adquisición de datos Field Point el cual se encuentra integrado por un módulo de comunicación con el computador (FP-1000) y otro sub-módulo para el registro de temperaturas 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 registrados por este, para posteriormente

transmitirlos al computador por medio del puerto RS-232 (puesto de comunicación). (Ver figura 87).

Figura 87. Modulo de Field Point FP-1000

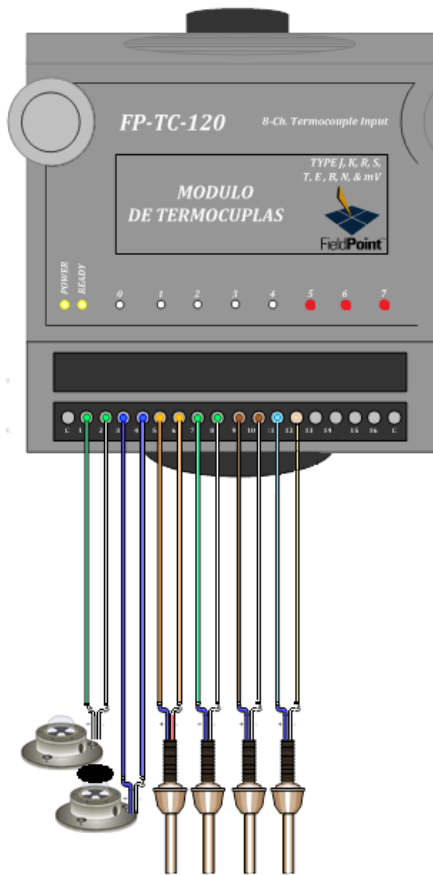


Fuente: Autores

- **Modulo FP-TC-120:** En el módulo FP-TC-120 se encuentran conectadas cuatro termocuplas y dos piranómetros, este elemento se encarga de captar las señales enviadas por las termocuplas y piranómetros para transmitir las al módulo FP-1000 quien es el encargado de hacer la comunicación con el computador. (Ver figura 88)

El modulo cuenta con ocho canales en total, la distribución de las termocuplas y los piranómetros se muestran también en la siguiente figura.

Figura 88: 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	T4
6	13	14	--
7	15	16	---

P1: Piranómetro radiación total
P2: Piranómetro radiación difusa
T1: Temperatura entrada calentador
T2: Temperatura salida calentador
T3: Temperatura interna en el tanque
T3: Temperatura ambiente

Fuente: Modificado por autores

6.1.3 Termocuplas. El calentador de agua cuenta con cuatro termocuplas tipo K* (ver figura 89, 90, 91 y 92), las cuales permiten censar la temperatura del agua a la entrada del calentador, la temperatura del agua a la salida del calentador, la temperatura del agua en el interior del tanque y la temperatura ambiente.

* La termocupla Tipo K [Cromel (aleación de Ni-Cr)/Alumel (aleación de Ni-Al)]: es usada en una amplia variedad de aplicaciones, está disponible a un bajo costo y en una variedad de sondas. Tiene un rango de temperatura de -200°C a +1372°C, además posee una buena resistencia a la oxidación.

Figura 89. Ubicación termocupla temperatura de entrada



Fuente: Autores

Figura 90. Ubicación termocupla temperatura de salida



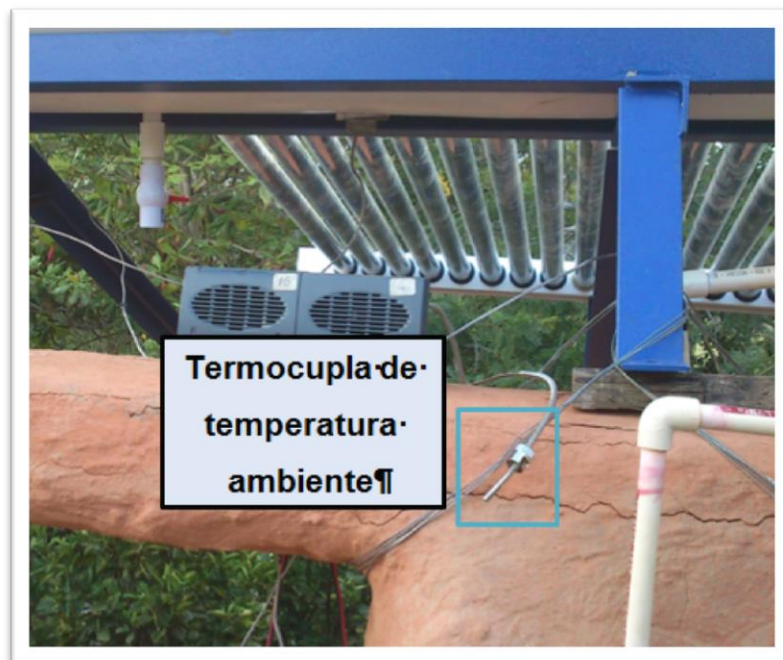
Fuente: Autores

Figura 91. Ubicación termocupla temperatura interior del tanque



Fuente: Autores

Figura 92. Ubicación termocupla temperatura ambiente



Fuente: Autores

6.1.4 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 piranómetro que registra dicha variable, permitiendo que le de sombra (Ver figura 93).

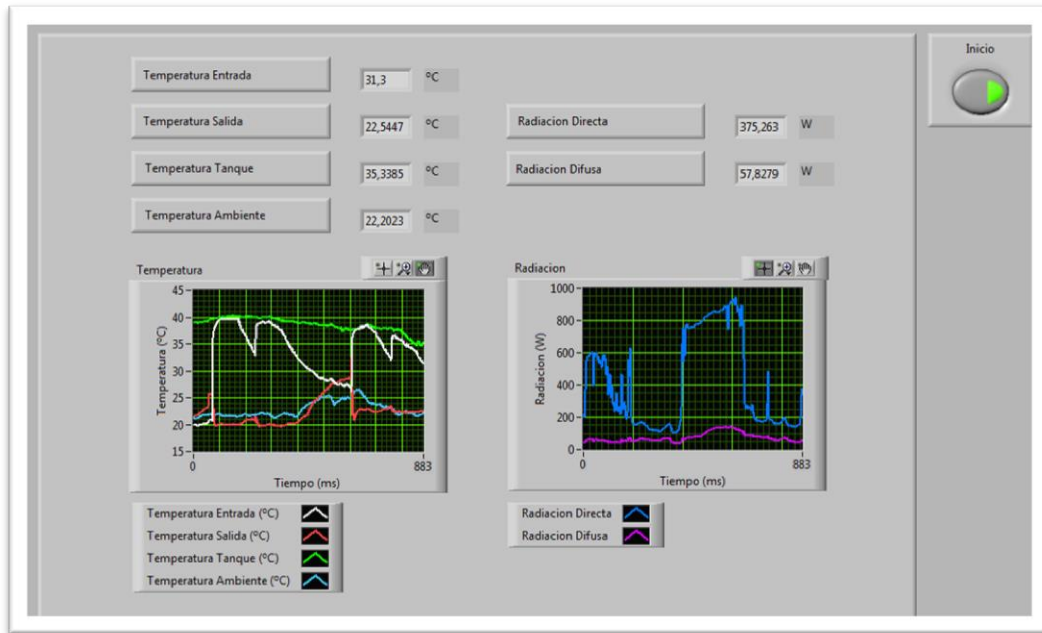
Figura 93. Ubicación de los piranómetro de medición



Fuente: Autores

6.1.5 Software de adquisición de datos. Una vez especificados los elementos que componen el sistema de monitoreo y control, se debe realizar el respectivo programa por medio del software LabView, ya que los componentes mencionados anteriormente son compatibles con este software. El programa se estructura con dos entornos de trabajo, el primer entorno de trabajo es el entorno del usuario, el cual es el que se utiliza finalmente para el monitoreo, registro y visualización de los datos censados (Ver figura 94).

Figura 94. Entorno de usuario para el programa de LabView realizado

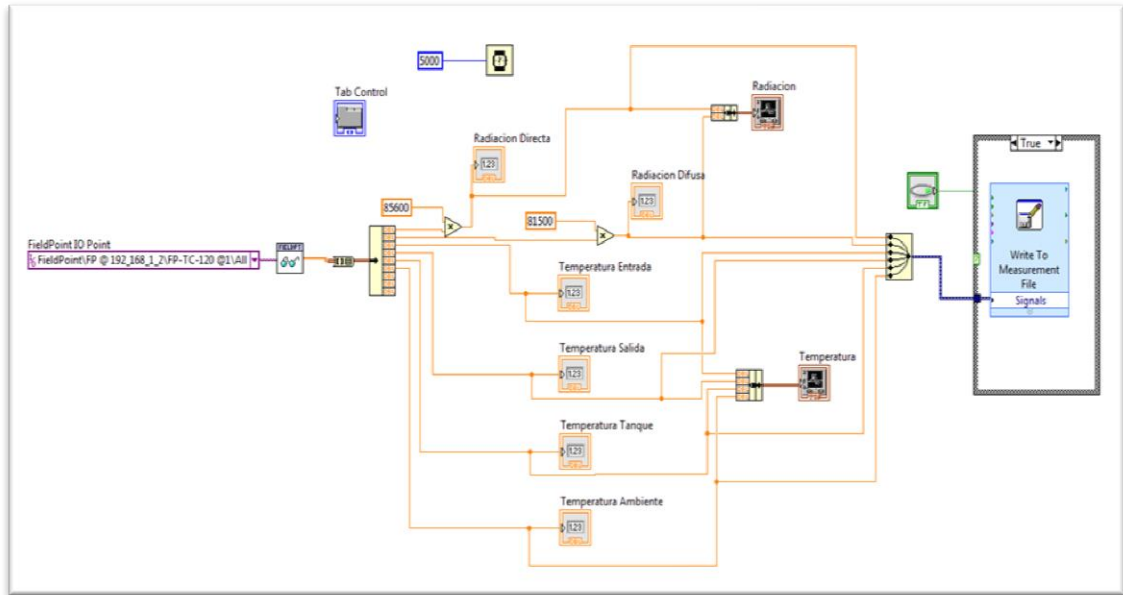


Fuente: Autores

Se puede apreciar de la figura anterior todos los valores de los datos puntuales de cada ciclo de toma de datos, en la parte inferior izquierda se grafican los valores de las cuatro temperaturas censadas en tiempo real, mientras que en la parte inferior derecha se grafican los valores de radiación solar total y radiación solar difusa en tiempo real. Por último se tiene en la parte superior derecha un botón de inicio, en el cual cuando se activa, los datos censados son registrados en un documento de Excel.

El segundo entorno de trabajo es el entorno de programación, en el cual se realiza toda la programación grafica para el tratamiento de las señales enviadas tanto por la termocuplas como por los piranómetros, además es en este entorno en donde se realiza la comunicación entre el módulo de adquisición de datos y el computador (Ver figura 95).

Figura 95. Entorno de programación grafica para el programa de LabView realizado

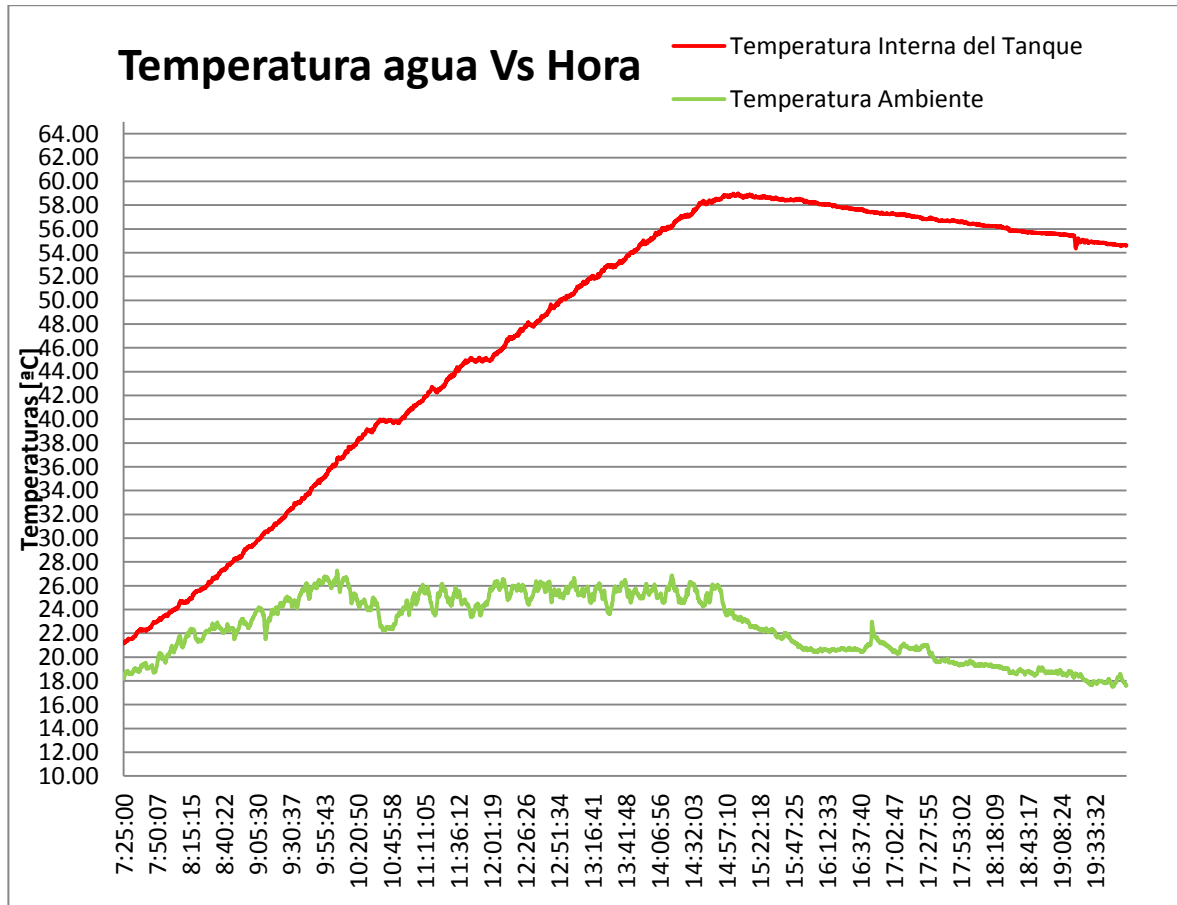


Fuente: Autores

6.2 PRUEBA DE ESTANCAMIENTO

Esta prueba consiste en monitorear el comportamiento de la temperatura interna del agua en el tanque, dicho comportamiento depende directamente de la irradiación incidente sobre los tubos colectores (tubos de vacío). A medida que los tubos colectores van captando y absorbiendo la energía solar, la temperatura del agua en el interior del tanque va aumentando, hasta un estado en el cual se mantendrá constante, dicho estado se presenta cuando la energía absorbida por los tubos colectores es igual a las pérdidas de calor tanto por los colectores como también por el tanque. Debido a que la energía solar no está disponible todas las 24 horas del día, normalmente la temperatura de estancamiento se alcanza cuando la energía solar empieza a disminuir su irradiancia con respecto a los colectores. A partir del monitoreo de la temperatura del agua en el interior del tanque de almacenamiento del calentador, la temperatura ambiente, la radiación directa y la radiación difusa, se realizó la siguiente gráfica:

Figura 96. Grafica de temperaturas de la prueba de estancamiento



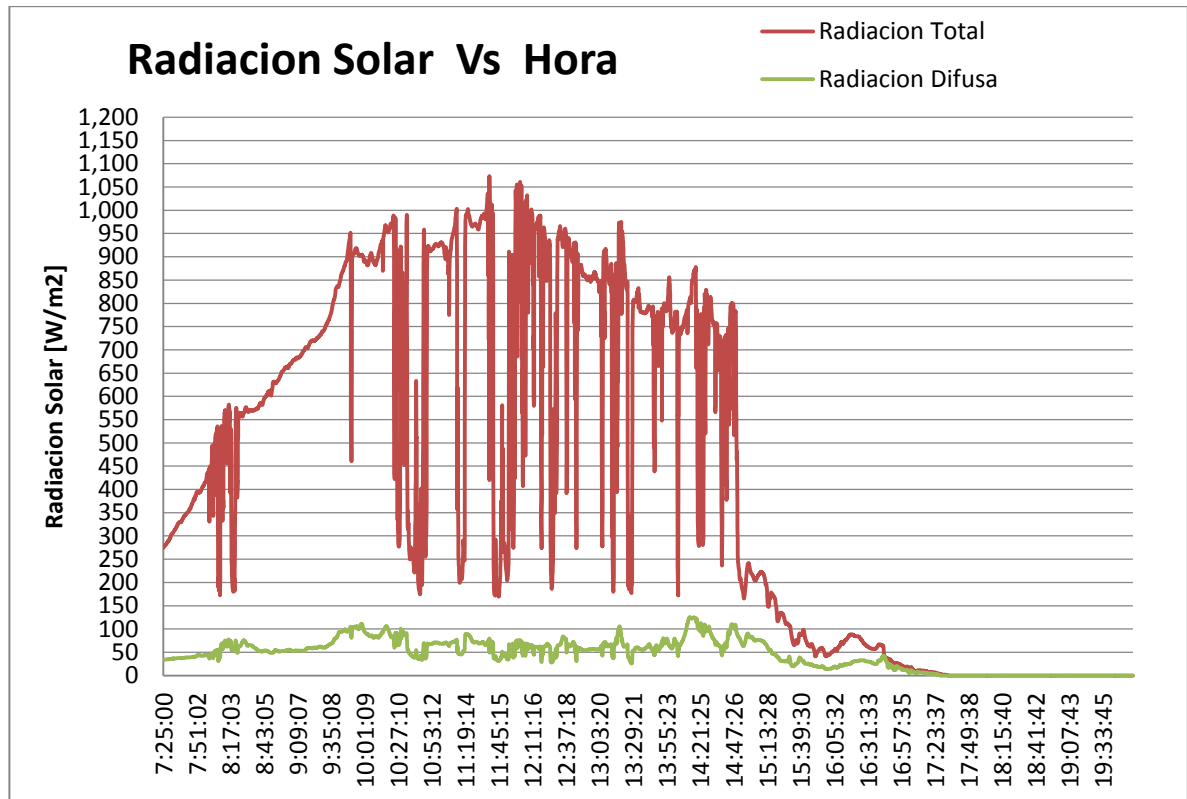
Fuente: Autores

En la gráfica se puede ver el comportamiento de la temperatura interna del agua en el interior del tanque de almacenamiento. Como se puede ver la prueba inicia aproximadamente a la 7:25 am, y llega a la temperatura máxima de 59°C a la 3:05 pm (15:05 en la gráfica). Después de las tres de la tarde aproximadamente la temperatura empieza a disminuir debido a que las pérdidas de energía en el calentador son mayores que el calor ganado útil por los tubos colectores.

En la figura 97 se grafican los datos monitoreados de radiación total y difusa con los que se llevó a cabo la prueba de estancamiento.

Se puede ver en esta figura que el mayor potencial de energía solar se dio entre las 10:00 am y las 3:00 pm. A partir de las 3:00 pm los valores de radiación total fueron relativamente bajos. La radiación difusa aunque varía dentro de un mismo rango se mantuvo constante en su comportamiento.

Figura 97. Grafica de radiación solar de la prueba de estancamiento



Fuente: Autores

Vale la pena destacar que a pesar de que la distancia entre tubos fue diseñada de tal manera que los tubos captaran la energía solar sin hacerse sobra unos a otros a partir de las 9:00 am, en la gráfica 97 vemos que el calentamiento del agua dentro del tanque ocurrió desde que empezó la prueba, por lo tanto los tubos aun haciendo sobra unos a otros (antes de las 9:00 am), captaban la energía solar.

6.3 PRUEBA CON CONSUMO DE AGUA CALIENTE

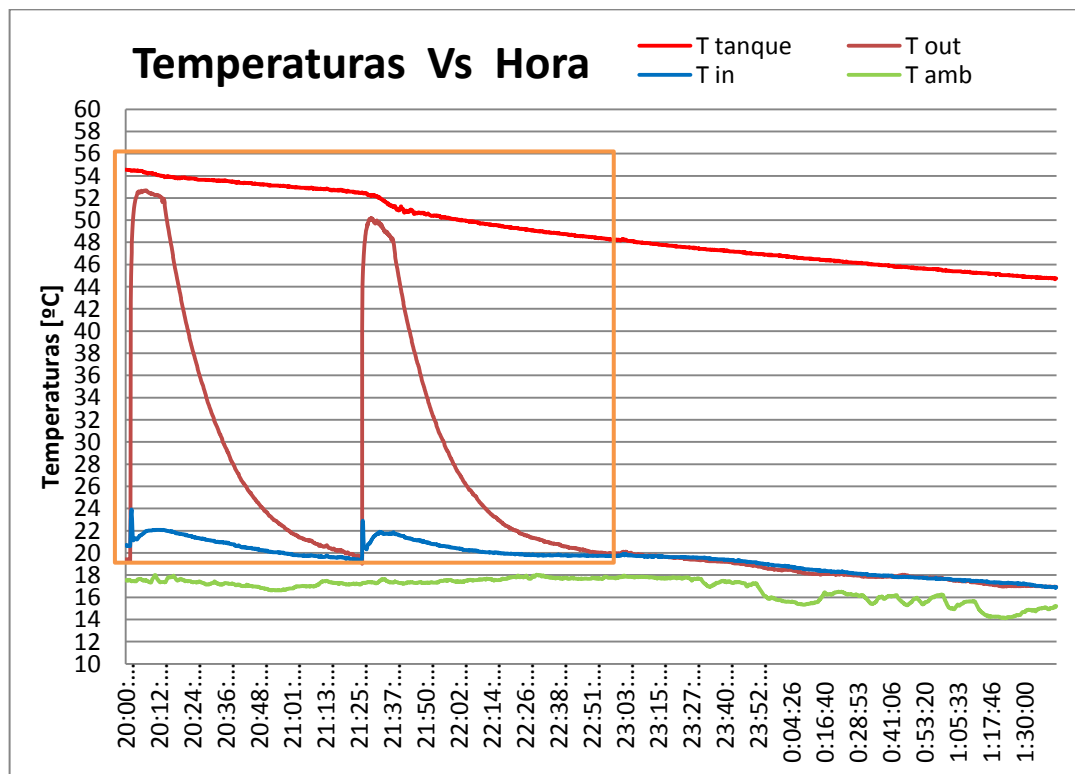
Esta prueba consiste analizar el comportamiento del agua caliente dentro del tanque de almacenamiento después de ser extraída una determinada cantidad de agua caliente y renovada la misma cantidad pero con agua fría, esta mezcla necesariamente provocara un cambio evidente de la temperatura del agua dentro del tanque. Además con esta prueba también se pretende analizar la capacidad que tiene el calentador de agua en volver a calentar el agua para ser consumida nuevamente. La prueba de consumo se dividió en dos partes, la primera parte fue la continuación de la prueba de estancamiento, y la segunda parte se realizó en la mañana siguiente.

6.3.1 Prueba con consumo de agua caliente en horas de la noche. Como ya se mencionó esta prueba es la continuación de la prueba de estancamiento, donde su temperatura máxima fue de aproximadamente 59°C a las 3:05 pm, después la temperatura del agua dentro del tanque fue disminuyendo. A las 7:57 pm, hora en la que termino la prueba de estancamiento, la temperatura registrada del agua dentro del tanque fue de aproximadamente 54.6°C. A las 8:00 pm inicia la prueba de consumo (Ver figura 56), en la cual se extrae agua caliente del tanque del calentador por medio de una de las duchas de la cabaña. Desde las 8:01 pm hasta las 8:14 pm se extrajeron 30 litros de agua caliente, y desde las 9:26 pm hasta las 9:39 pm se extrajeron otros 30 litros de agua caliente.

Como se puede ver en la gráfica se presentan dos picos de aumento de temperatura en la temperatura de salida del calentador, esto se debe a que la tubería de salida de agua caliente tenia agua fría, una vez abierta la llave de la ducha empieza a fluir el agua caliente a través de la tubería que es en donde está ubicada la termocupla que censa esta temperatura. Se puede ver que se generó un pequeño salto en la temperatura del agua en el interior del tanque al llevar a cabo los dos consumos de agua caliente con respecto al enfriamiento que se venía dando antes de la prueba de consumo. Una vez realizada esta prueba de

consumo de agua caliente con dos ciclos de extracción de agua, se estabilizo la tendencia de enfriamiento que se venía llevando a cabo antes de la prueba. A partir de este instante se realiza el monitoreo de la temperatura del agua en el interior del tanque para analizar el enfriamiento del mismo hasta el siguiente día, en el cual se continua con la segunda parte de la prueba de consumo.

Figura 98. Grafica prueba con consumo de agua caliente en la noche

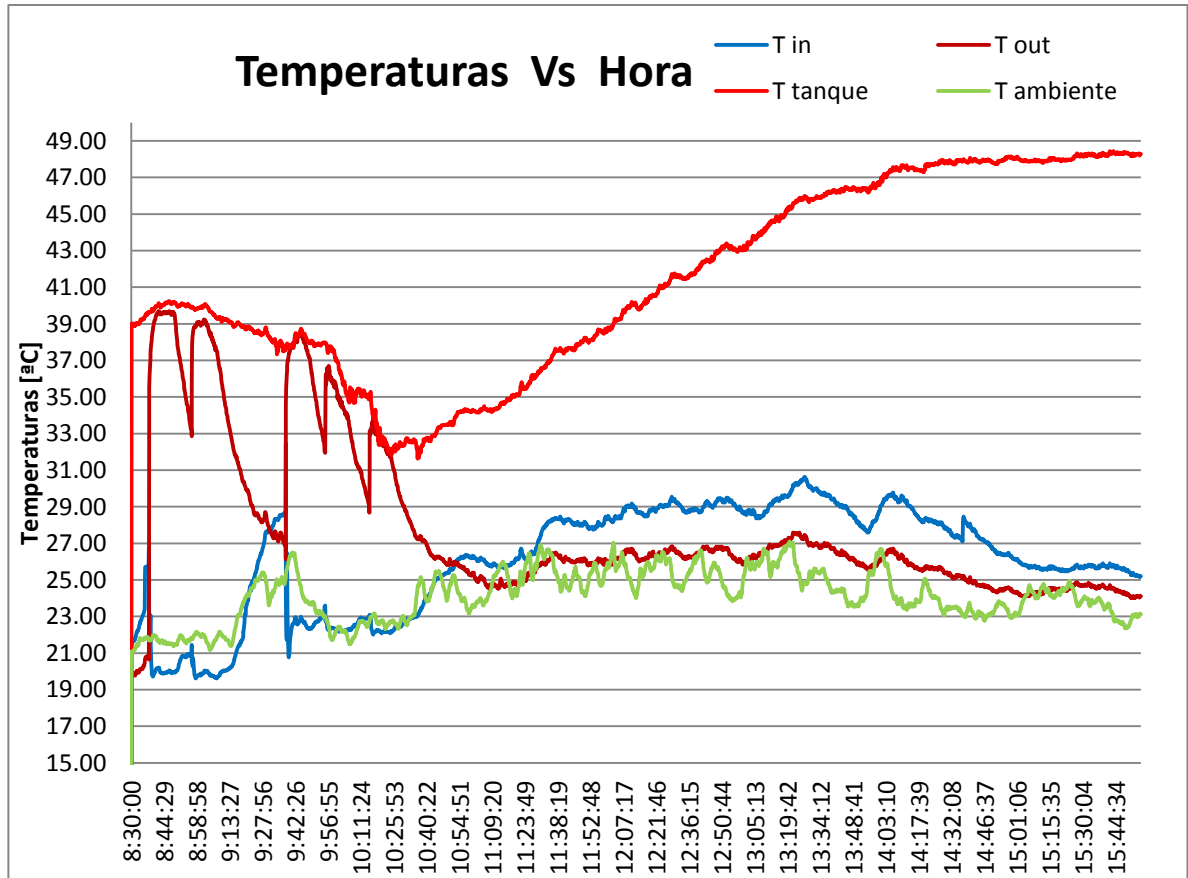


Fuente: Autores

6.3.2 Prueba con consumo de agua caliente en horas de la mañana. Esta parte de la prueba general consiste en monitorear el comportamiento de la temperatura del agua en el interior del tanque después de haber realizado 5 ciclos de extracción de agua caliente por medio de la ducha, además el consumo de agua caliente se realiza a la vez que está operando el calentador y no de noche como en la primera parte de la prueba.

En la figura 99 se puede ver el comportamiento de la prueba una vez empezó el monitoreo a las 8:30 am.

Figura 99. Grafica de temperatura segunda parte prueba consumo



Fuente: Autores

De la gráfica se puede observar los cinco de consumo de agua caliente, cada ciclo se caracterizó por una distinta temperatura de salida de agua caliente hacia la ducha de la cabaña, a continuación se presenta una tabla de resumen de los cinco ciclos de consumo de agua, en donde se extrajeron las mismas cantidades de agua caliente (30 litros).

Se puede ver de la tabla que los cuatro primeros ciclos de consumo fueron abastecidos con agua caliente para el confort de higiene personal, el quinto ciclo

entrego una temperatura promedio de 33°C, lo cual está por debajo del rango requerido. Se debe tener en cuenta el hecho que no necesariamente una persona se bañe con la temperatura que le entrega el calentador, por lo tanto aunque el calentador para el primer ciclo entrego 30 litros de agua caliente a 39.6°C, un persona puede disminuir su temperatura mezclándola con agua fría mediante el mezclador, esto hace que el consumo de agua caliente real disminuye y se pueda tener disponible agua caliente en mayor proporción.

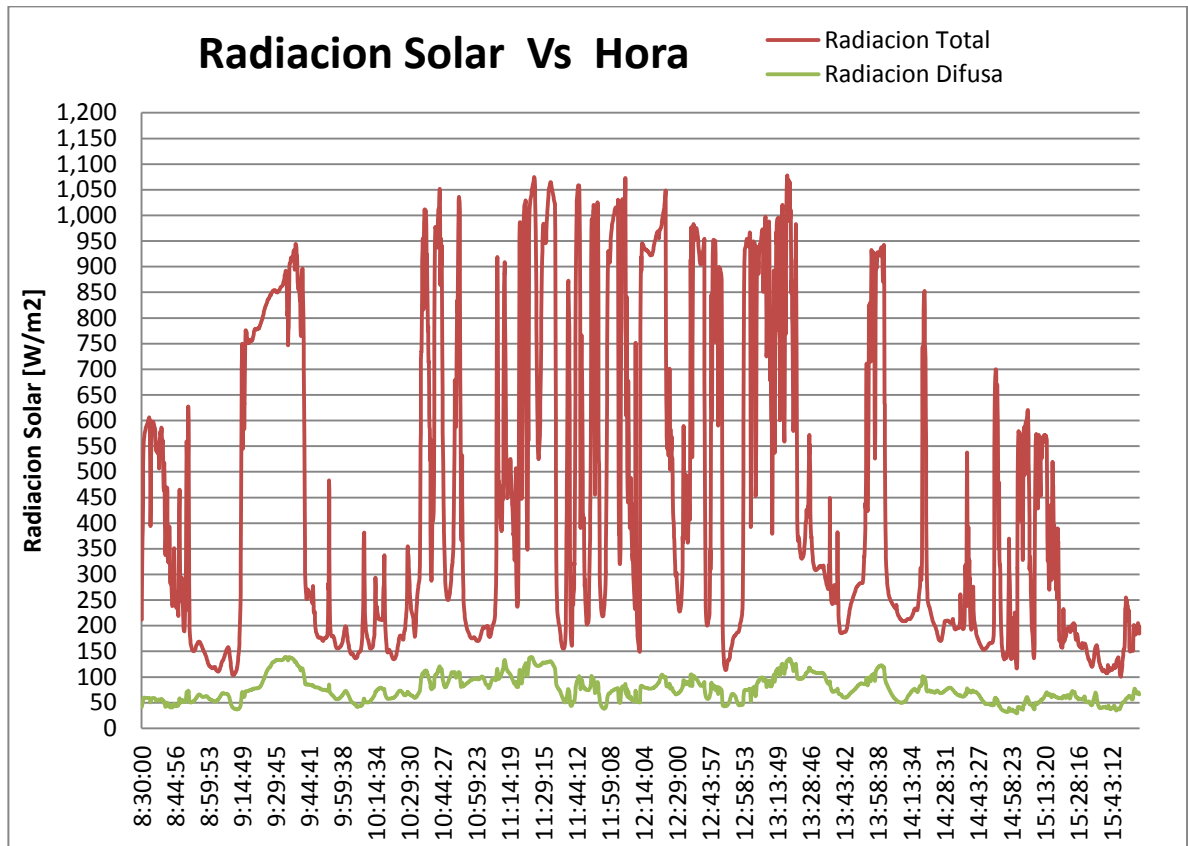
Cuadro 5. Ciclos de consumo de agua caliente

Ciclo	Hora inicial	Hora final	T de consumo
Primer ciclo	8:37 am	8:48 am	39.6°C
Segundo ciclo	8:56 am	9:07 am	39°C
Tercer ciclo	9:38 am	9:48 am	38.3°C
Cuarto ciclo	9:55 am	10:05 am	36°C
Quinto ciclo	10:15 am	10:24 am	33°C

Fuente: Autores

De la figura 99, se puede observar que al inicio de la prueba de consumo en la mañana, la temperatura con la que amaneció el agua en el interior del tanque fue de aproximadamente 39°C, por lo cual si tenemos en cuenta el valor de la temperatura del agua en el interior del tanque cuando se finalizaron los dos ciclos de consumo de agua caliente en la prueba de la noche (51°C a las 9:38 pm, ver figura 98), se puede ver que el tanque se enfrió 12°C en aproximadamente 11 horas. Una vez terminada la prueba de consumo de agua caliente a las 10:20 am con una temperatura de agua en el interior del tanque de almacenamiento de 32°C, empieza nuevamente el calentamiento del agua, debido a la captación de la radiación solar (Ver figura 100). Alrededor de las 2:30 pm se alcanzó una temperatura estable de 48°C que se siguió conservando hasta las 3:55 pm, hora de finalización del monitoreo.

Figura 100. Grafica de radiación solar de la prueba de consumo



Fuente: Autores

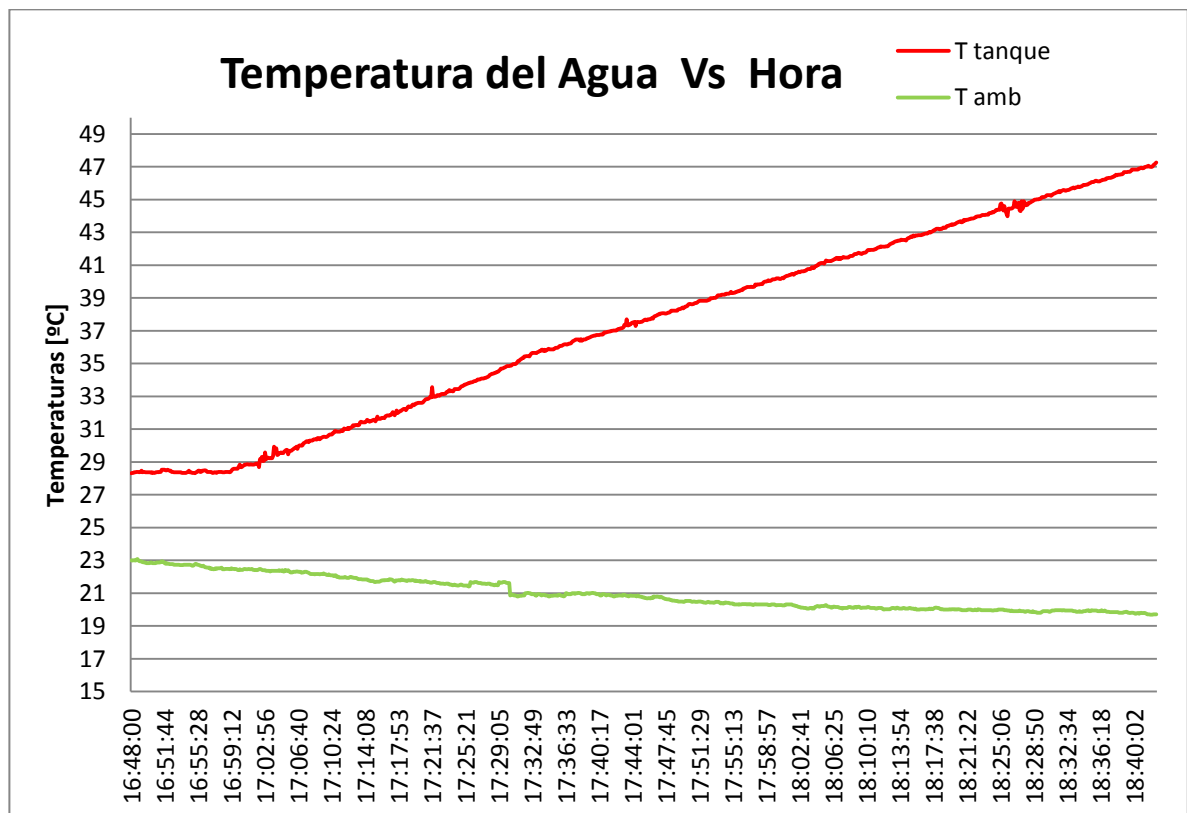
6.4 PRUEBA DE CALENTAMIENTO DE AGUA POR MEDIO DE RESISTENCIAS ELECTRICAS

Esta prueba consiste en calentar el agua por medio de las resistencias eléctricas, deshabilitando los colectores solares, estos se deshabilitan colocándoles unos cartones que los cubra totalmente para evitar captación de la radiación solar por parte de los mismos, además la prueba se realizó a las 4:48 pm donde el recurso solar es mínimo. En la figura 101 se puede ver el comportamiento de la temperatura del agua en el interior del tanque.

Se puede ver a partir de la gráfica que inicialmente se tiene agua en el interior del tanque a un temperatura de 28.3°C aproximadamente, una vez verificada la

estabilidad de dicha temperatura se encienden las resistencias eléctricas a las 5:00 pm aproximadamente, la prueba finalizo a las 6:42 pm en donde la temperatura alcanzo 47.2°C en aproximadamente 1 hora y 40 minutos, por lo que calienta el agua de manera más rápida con respecto al calentamiento de la misma cantidad de agua pero con energía solar.

Figura 101. Grafica de T de prueba de calentamiento con subsistema auxiliar



Fuente: Autores

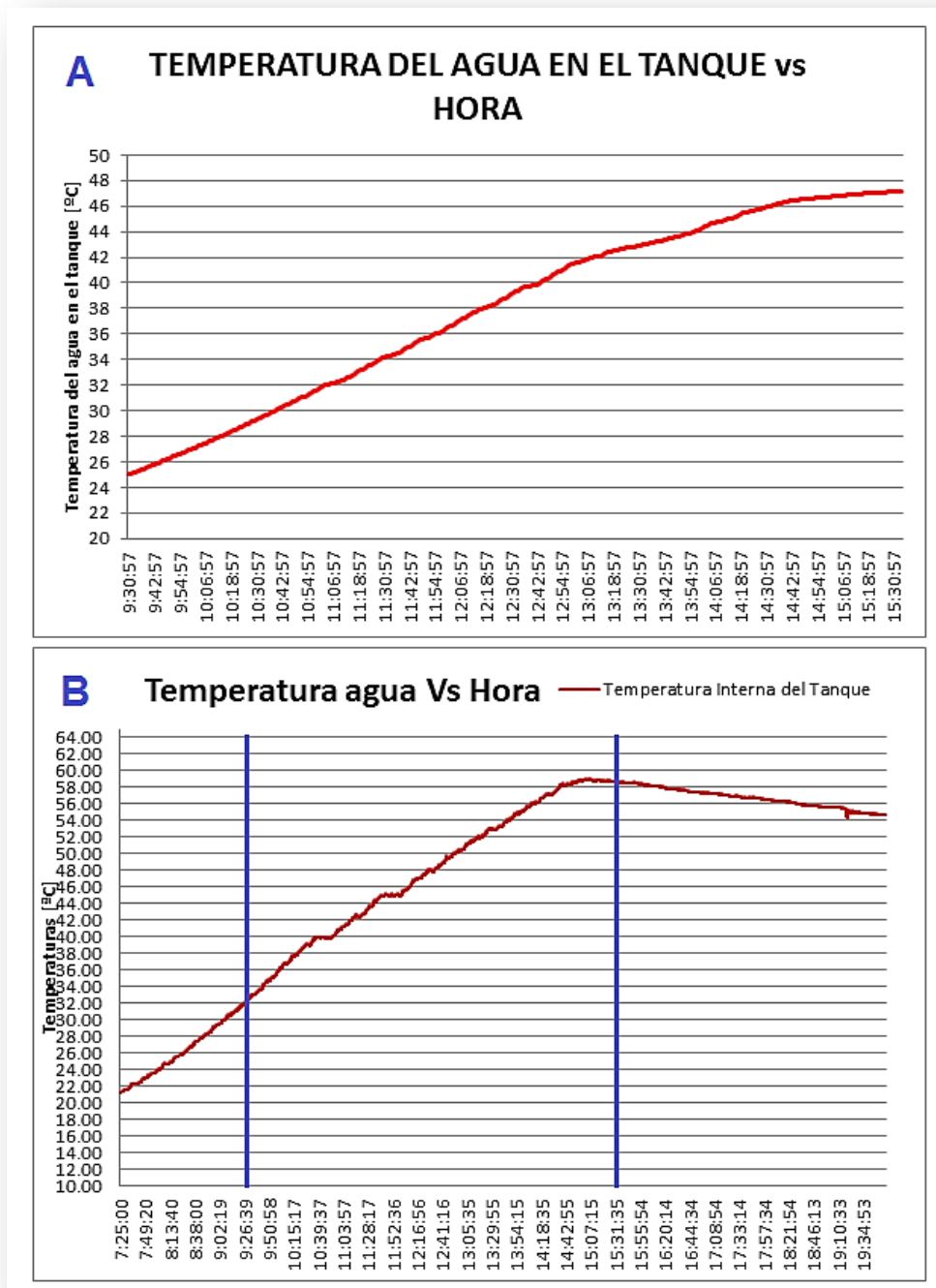
6.5 VALIDACION DEL MODELO MATEMATICO RESPECTO A LAS PRUEBAS REALIZADAS

Es importante analizar la variación del comportamiento entre el modelo matemático aplicado como base de diseño y construcción, y el comportamiento real que mostro el calentador de agua. En la figura 102 se pueden apreciar los dos comportamiento para la prueba de estancamiento bajo las mismas horas, teniendo

en cuenta que modelo matemático se desarrolló con los datos del laboratorio de sistemas térmicos de la universidad industrial de Santander del día 14 de Febrero del 2012, mientras que las pruebas con el calentador de agua se realizaron el día 15 de Diciembre del 2013.

Analizando el modelo teórico y real bajo el mismo rango de tiempo (9:30 am – 3:30 pm), el modelo matemático (figura 102, grafica A) presento un aumento de la temperatura del agua en el interior del tanque de almacenamiento de aproximadamente 22°C ($T_{inic} = 25^{\circ}\text{C} - T_{fin} = 47^{\circ}\text{C}$), mientras que en el modelo real (figura 102, grafica B) presento un aumento de aproximadamente 27°C ($T_{inic} = 32^{\circ}\text{C} - T_{fin} = 59^{\circ}\text{C}$). Por lo tanto se puede observar que el modelo real se comportó de mejor forma con respecto al modelo matemático para el mismo rango de tiempo debido a que su aumento de temperatura del agua es mayor. No obstante se debe tener en cuenta que el modelo real presenta una eficiencia global del 78.6%, mientras que el modelo matemático estimo que el calentador de agua tendría una eficiencia del 82.6%, esta diferencia entre las eficiencias se puede relacionar con el hecho de que la curva de temperatura para el modelo matemático no presento disminución de la misma en todo el rango analizado, mientras que para el modelo real se puede apreciar que alrededor de las 2:40 pm aproximadamente se alcanzó la máxima temperatura y a las 3:30 pm disminuyo ligeramente la misma.

Figura 102. Comparación entre las curvas de temperatura teórica y real



Fuente: Autores

7. EVALUACIÓN SOCIO-AMBIENTAL Y ECONÓMICA

7.1 EVALUACIÓN SOCIO-AMBIENTAL

La energía solar térmica, al igual que todas las demás fuentes de energía renovable, constituye la alternativa más respetuosa con el medio ambiente que las energías convencionales. Además, disminuye sensiblemente las emisiones gaseosas originadas por los sistemas convencionales de calentamiento de agua. Sin embargo, como se trata de un tipo de energía alternativa que todavía no ha alcanzado un alto grado de madurez, existe poca experiencia de los impactos medioambientales que tales esquemas pueden causar.

Se puede evidenciar que el medio físico no sufre impactos significativos sobre la calidad del aire, de los suelos o del agua. Tampoco se genera contaminación auditiva y el único impacto digno de mención es el visual sobre el paisaje.

Los impactos medioambientales que se producen en la fase de instalación no tienen un carácter permanente, desapareciendo en la fase de explotación o uso del sistema. Los sistemas de energía solar no producen contaminación durante la explotación, por tanto se vigilan las cuestiones de seguridad ambiental durante las fases de fabricación, instalación y disposición.

En las fases de fabricación e instalación se produce inevitablemente un consumo de energía. El uso de combustibles fósiles para satisfacer este consumo se vería reflejado en un aumento de las emisiones contaminantes. No obstante, estos impactos no tienen un carácter permanente y además, si se evalúa la cantidad de energía fósil necesaria para estas dos fases mencionadas, con el ahorro futuro de este mismo tipo de energía, la energía para el calentamiento de agua solar sigue representando una opción ambientalmente adecuada.

Es importante resaltar que; “Algunos estudios muestran que los calentadores solares de agua aumentan la cantidad de agua caliente generada por unidad de energía fósil invertida en un factor de 2 comparado con la calefacción de agua con gas natural, y en un factor de 8 comparado con la calefacción eléctrica de agua.”¹⁶

En la tabla que se observa a continuación, se resume la evaluación socio-ambiental y se puntualizan aspectos del sistema de calentamiento de agua asistido por energía solar.

Cuadro 6. Resumen de la evaluación socio-ambiental

Consumo de recursos y demanda energética	En las fases de fabricación e instalación existió un consumo considerable de energía. También se utilizó energía de origen fósil produciendo emisiones de gases Invernadero.
Impacto sobre el medio ambiente	El medio físico no sufre impactos significativos sobre la calidad del aire, de los suelos o del agua. Tampoco se genera contaminación auditiva
Impacto visual	Hay una influencia notoria visual sobre el paisaje.
Impacto sobre el medio biótico	Ocupación de terreno cultivable, sin afección notoria sobre la flora y fauna.

Fuente: Autores

¹⁶ PICÓ HERAS, S. Desarrollo e implantación de energías renovables: Evaluación técnico-económica y socio-ambiental. Trabajo de grado de la carrera de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental. Cataluña: Universidad de Cataluña, 2002. 73 p

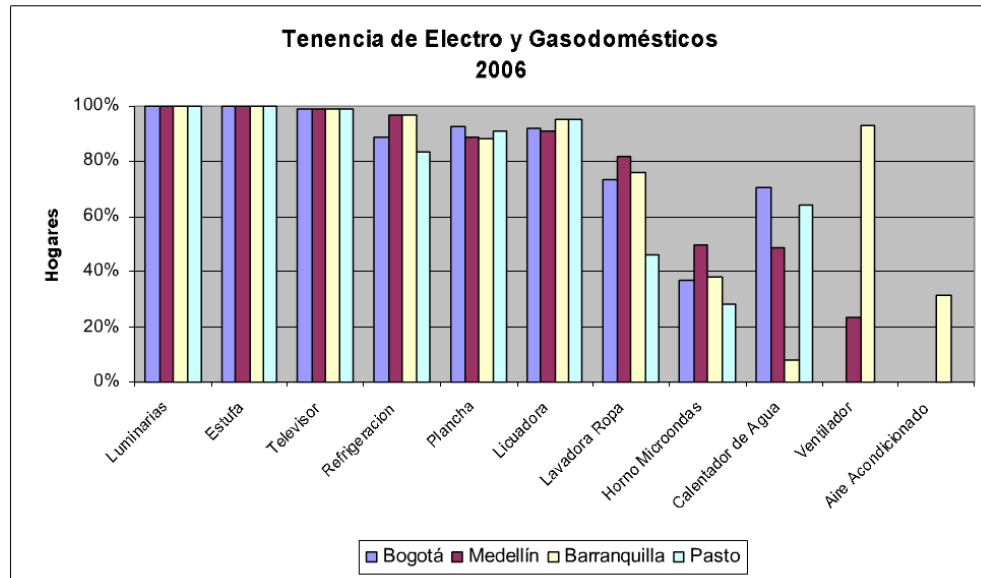
7.2 EVALUACIÓN ECONÓMICA

Los principales obstáculos para la comercialización de los sistemas solares térmicos son económicos y están asociados con el elevado coste inicial del equipo necesario para captar y almacenar la energía solar, para mejorar esta situación se deberían tomar medidas encaminadas a reducir los costes asociados a la tecnología y los asociados a la industria fomentando una fabricación de los componentes en serie. Sin embargo, se realiza la evaluación económica realizando un comparativo entre los sistemas convencionales (energía eléctrica y gas natural) y el sistema de calentamiento de agua asistido por energía solar construido, para tener una amplia idea de los beneficios que se podrán obtener. De este modo se podrá estimar de una forma más exacta el periodo de recuperación de la inversión asociada a esta aplicación y poder estimar cuál debería ser el nivel de ayudas públicas y privadas.

Para la realización de la evaluación económica, se tiene en cuenta las variables que intervienen para lograr una valoración económica general, como por ejemplo el tipo de aplicación o de tecnología que se utiliza para el calentamiento de agua, y sus respectivas condiciones del mercado, por tanto, se hace imprescindible realizar una valoración económica del sistema de calentamiento de agua asistido por energía solar en contraste con los principales métodos convencionales. Previo a esto, es importante observar la tendencia de electro o gasodomésticos para el calentamiento de agua y su respectivo valor económico, para ponerlo en comparación con la inversión realizada en el sistema solar térmico.

7.2.1 Tendencia del consumo de energía eléctrica y gas. A continuación se muestra gráficamente la tendencia de electro y gasodomésticos en cuatro de las principales ciudades del país.

Figura 103. Tendencia de electro y gasodomésticos en cuatro ciudades del país



Fuente: UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA, Departamento de física. Determinación del consumo final de energía en los sectores residencial, urbano y comercial y determinación de consumos de equipos domésticos de energía eléctrica y gas. República de Colombia, ministerio de minas y energía UPME, 2006. p. 3.

El estudio analizado muestra la tendencia de aparatos sobre el 100% de los encuestados, vale la pena resaltar los valores del calentador de agua en el siguiente cuadro.

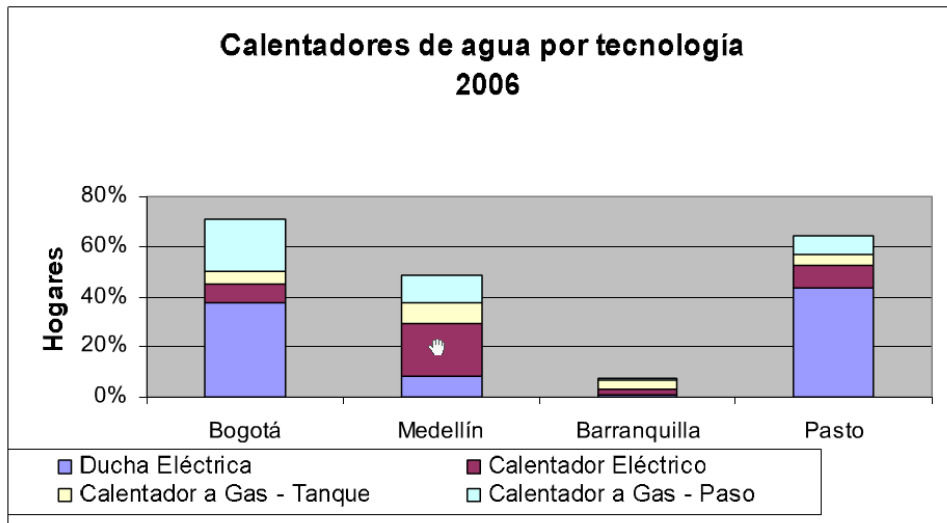
Cuadro 1. Tendencia de calentador de agua en cuatro ciudades del país

Electro o gasodoméstico	Bogotá	Medellín	Barranquilla	Pasto
Calentador de agua	70.8%	48.9%	7.8%	64.3%

Fuente: Autores

También se logra obtener una clasificación de calentador de agua por tecnología, lo que permite observar claramente la tendencia de consumo en importantes ciudades del país. Esta clasificación se identifica en la siguiente gráfica.

Figura 104. Tendencia de calentadores de agua por tecnología



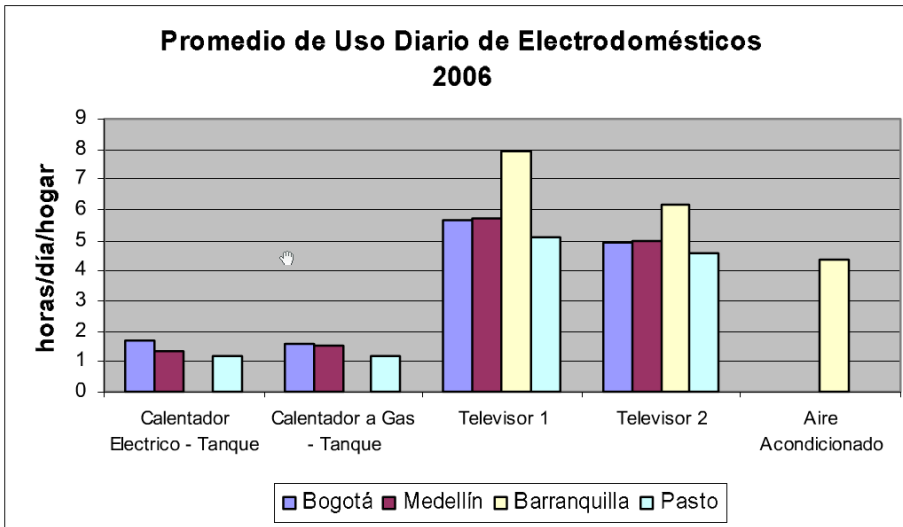
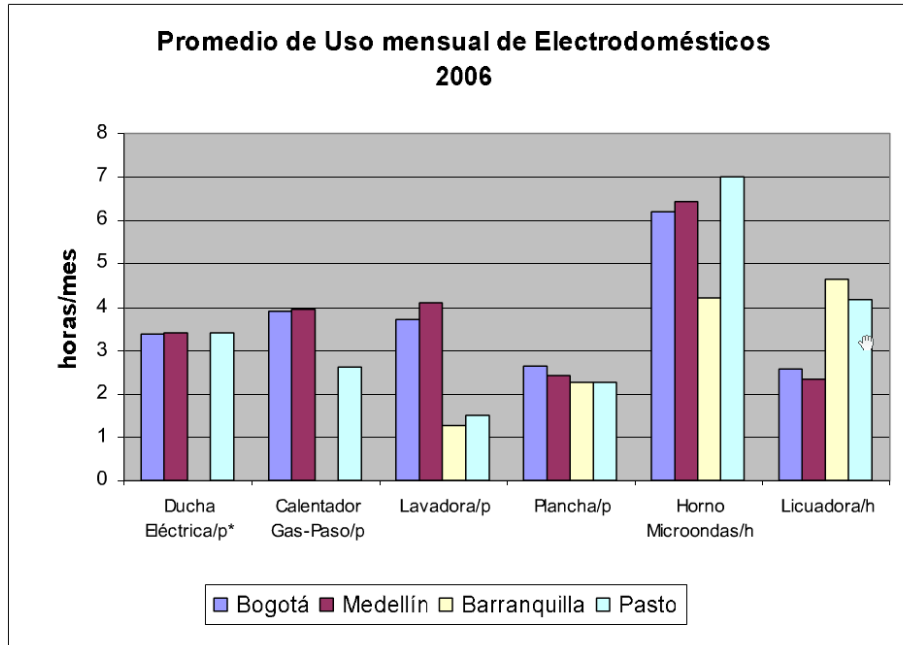
Fuente: UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA, Departamento de física. Determinación del consumo final de energía en los sectores residencial, urbano y comercial y determinación de consumos de equipos domésticos de energía eléctrica y gas. República de Colombia, ministerio de minas y energía UPME, 2006. p. 12.

Se puede destacar que en el uso de ducha eléctrica esta sobre el 35% de los encuestados en Bogotá y sobre el 40% en Pasto. El calentador a Gas – paso tiene un crecimiento importante en Bogotá y Medellín, sin embargo, vale la pena destacar que; “estos se encuentran principalmente en los estratos 4, 5 y 6, seguramente por el costo de adquisición e instalación”¹⁷

7.2.2 Tendencia del uso de electro y gasodomésticos. Se pueden observar en la siguientes graficas los resultados del uso de electro y gasodomésticos en horas/mes. Para la elaboración de la gráfica se considera el uso de los aparatos sobre el 100% de los encuestados.

¹⁷ UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA, Departamento de física. Determinación del consumo final de energía en los sectores residencial, urbano y comercial y determinación de consumos de equipos domésticos de energía eléctrica y gas. República de Colombia, ministerio de minas y energía UPME, 2006. p. 12.

Figura 105. Tendencia del uso de electro y gasodomésticos



Fuente: UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA, Departamento de física. Determinación del consumo final de energía en los sectores residencial, urbano y comercial y determinación de consumos de equipos domésticos de energía eléctrica y gas. República de Colombia, ministerio de minas y energía UPME, 2006. p. 13.

Es importante resaltar los valores de los calentadores de agua de diferentes tecnologías en el siguiente cuadro.

Cuadro 7. Tiempo promedio de uso de electro y gasodomésticos

Uso del electro o gasodoméstico/ Ciudad	Bogotá	Medellín	Barranquilla	Pasto	Unidad medida
Ducha Eléctrica/persona	3.4	3.4	0.0	3.4	(horas /
Calentador Gas - Paso/persona	3.9	3.9	0.0	3.6	mes)
Calentador Eléctrico /hogar*	1.7	1.4	0.0	1.2	(horas /
Calentador Gas - tanque/hogar	1.6	1.5	0.0	1.2	día)

Fuente: Autores

7.2.3 Medición de costo de electricidad y gas natural.

7.2.3.1 Método de estimación del consumo de energía eléctrica. La cantidad de energía eléctrica que consume un artefacto depende de la potencia del artefacto y de la cantidad de horas que se utiliza.

El consumo de energía se mide en kilowatt hora (kWh), se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\text{Energía (kWh)} = \text{Potencia(kW)} * \text{Tiempo(h)} \quad [1]$$

Como se ve en la anterior expresión, la potencia se mide en watts (W) o en kilowatts (kW)** y esta normalmente registrada en la placa de características de cada artefacto, o en el “manual del usuario” del mismo, en la parte de características o especificaciones térmicas.

* El promedio de personas por hogar en Colombia es de 3.9

** 1000 (W) = 1 (kW)

Para la ducha eléctrica, según datos del ministerio de minas y energía¹⁸, la potencia media demandada es de 3.75 (kW). Remplazando en [1], obtenemos la energía consumida por la ducha eléctrica en un mes.

$$\text{Energía (kWh)} = 3.75(\text{kW}) * 3.4(\text{h/mes})$$

$$\text{Energía (kWh)} = 12.75$$

Se puede observar que la **energía consumida por la ducha eléctrica en un mes esquivale a 12.75 (kWh) por persona del hogar.**

Bajo el mismo procedimiento se determina la energía de un calentador eléctrico de tanque, que según la misma fuente³, su potencia media demandada es de 3.01 (kW). Hay que tener en cuenta que el tiempo de uso es por hogar y no por persona... Véase el cuadro 7..., por tanto, se divide en 3.9. También se multiplica el tiempo de uso por 30, para obtener el consumo de energía en un mes, ya que en la tabla esta por día. Se resalta también, que el tiempo de uso utilizado fue el de Medellín, ya que de las ciudades estudiadas es la ciudad más similar en clima al municipio de los Santos, Santander.

$$\text{Energía (kWh)} = 3.01(\text{kW}) * \frac{1.4 \left(\frac{\text{h}}{\text{día}} \right) * 30 \left(\frac{\text{día}}{\text{mes}} \right)}{3.9}$$

$$\text{Energía (kWh)} = 32.30$$

Concluimos que la **energía consumida por el calentador eléctrico - tanque en un mes esquivale a 32.30 (kWh) por persona del hogar**, mucho mayor a una ducha eléctrica.

¹⁸ UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA, Departamento de física. Determinación del consumo final de energía en los sectores residencial, urbano y comercial y determinación de consumos de equipos domésticos de energía eléctrica y gas. República de Colombia, ministerio de minas y energía UPME, 2006. p. 21.

7.2.3.2 Método de estimación del costo de energía eléctrica. La Electrificadora de Santander S.A. E.S.P. (ESSA) presenta las tarifas a usuarios (\$/kWh)¹⁹, donde para un estrato 3 el valor del kWh es tiene un valor de \$316.3568 (pesos colombianos). Con el consumo de energía mensual determinamos el valor económico mensual (mensualidad) que debe ser pagado a la empresa para ducha eléctrica y calentador eléctrico respectivamente.

El valor mensual (Pesos) de energía consumida, se calcula mediante la siguiente expresión:

$$Mensualidad (\$) = Energía (kWh) * Tarifa \left(\frac{\$}{kWh} \right) \quad [2]$$

Reemplazando los valores de energía consumida por la ducha eléctrica y el calentador eléctrico... Véase el numeral 7.2.3.1... Se obtienen los siguientes valores en pesos colombianos:

- **Para ducha eléctrica:** *Mensualidad* (\$) = 4033.55 por persona.
- **Para calentador eléctrico:** *Mensualidad* (\$) = 10218.32 por persona

7.2.3.3 Método de estimación del consumo de gas natural. Según la U.P.M.E.²⁰ el rango de consumo de gas natural para aseo personal está entre 85 a 190 Litros/persona/día. **Es decir entre 2.55 y 5.7 m³/persona/mes.** Este dato se obtiene a partir de mediciones realizadas en las cuatro ciudades ya mencionadas.

¹⁹ ESSA Electrificadora de Santander S.A. E.S.P. Informa a sus usuarios del sistema de energía eléctrica de departamento de Santander y sur del cesar [online]. Departamento de Santander y sur del Cesar, Feb. 2014. Disponibilidad y acceso en la web: <http://www.essa.com.co/site/Portals/14/Docs/Tarifas/Tarifa_ESSA_201402.pdf>.

²⁰ U.P.M.E Ministerio de minas y energía. Determinación del consumo final de energía en los sectores residencial, urbano y comercial y determinación de consumos de equipos domésticos de energía eléctrica y gas. República de Colombia, ministerio de minas y energía UPME, 2006. p. 24.

7.2.3.4 Método de estimación del costo de gas natural. Gas Oriente S.A. ESP informa que el valor es 884.16\$/m³.

El valor mensual (Pesos colombianos) de gas natural consumido, se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\text{Mensualidad (\$)} = \text{consumo}(m^3) * \text{Tarifa (\$/m}^3) \quad [3]$$

Reemplazando un valor medio de consumo de gas natural... Véase el numeral 7.2.3.3... Se obtiene el siguiente valor:

$$\text{Mensualidad (\$)} = 4.125(m^3) * 884.16 \left(\frac{\$}{m^3} \right)$$

$$\text{Mensualidad (\$)} = 3647.16$$

Concluimos que **el consumo de gas natural en un mes esquivale a \$ 3647.16 por persona del hogar.**

Para destacar los resultados obtenidos, se ubican en la siguiente tabla el costo de electricidad y gas natural mensual por persona:

Cuadro 8. Medición de costo de electricidad y gas natural

Calentador de agua	Consumo/persona/mes	Costo//persona/mes
Ducha Eléctrica	12.75 kWh	\$ 4033.55
Calentador Eléctrico	32.3 kWh	\$ 10218.32
Calentador Gas	4.125 m ³	\$ 3647.16

Fuente: Autores

7.2.4 Análisis de valor presente neto. El valor presente neto, VPN, es el más utilizado ya que pone en pesos de hoy los egresos del futuro, lo cual facilita un criterio desde el punto de vista económico, de que tan viable es el proyecto en comparación con otros métodos de calentamiento de agua. Al usar VPN para los diferentes métodos se tomarán los egresos con el signo negativo y en la línea de tiempo estarán ubicados hacia abajo.

Ya que tenemos la necesidad de comparar diferentes sistemas para el calentamiento de agua, se debe evaluar el VPN de cada una de las alternativas por separado (Sistema solar térmico, ducha eléctrica y gas natural). Obtenido el VPN para cada uno de los sistemas, se logra determinar si el proyecto es viable económicamente o no, y de ser así, en cuanto tiempo se recuperara la inversión inicial del sistema solar térmico en comparación con el sistema eléctrico y el sistema por gas natural.

Desde el punto de vista matemático el VPN es la sumatoria de los flujos de caja puestos en el día de hoy, lo cual es representado por:

$$VPN = \sum F_n (1 + i)^{-n} = F_0 + F_1(1 + i)^{-1} + \dots + F_n(1 + i)^{-n} \quad [4]$$

Dónde: $i =$ es la tasa a la cual son descontados los flujos de caja.

$F =$ Es el flujo de caja periódico.

Los subíndices 1, 2, 3, ..., $n =$ son el número de periodos.

Al evaluar un proyecto con la metodología del VPN se recomienda que se calcule con una tasa de interés denominada **tasa de interés de oportunidad (TIO)**. La TIO es la tasa de interés más alta que un inversionista sacrifica con el objetivo de la realización del proyecto. Las tasas de colocación por modalidad de crédito efectivo anual actualmente son:

Cuadro 9. Las tasas de colocación por modalidad de crédito

Tipo de entidad	Tasa
Bancos comerciales	22,63%
Compañías de financiamiento comercial	20,38%
Cooperativas financiera	22,33%
Entidades financieras especiales	11,70%
Total establecimientos	22,48%

Fuente: http://www.banrep.gov.co/es/economia/tasas_colo4.htm

La tasa más alta que como inversionistas se sacrifica con el objeto de realizar el proyecto es 22.63%, es decir, la TIO es 22.63%.

Como tenemos tres opciones de instalación de un sistema de calentamiento de agua mutuamente excluyente, se procede a evaluar el VPN de cada uno de los sistemas de calentamiento de agua por separado. Se analiza únicamente el valor de los sistemas, sin tener en cuenta el valor de instalación de los mismos, ya que para cada uno de los tres sistemas la instalación es muy similar y no se verá un cambio significativo al realizar la comparación entre los tres.

7.2.4.1 Análisis de VPN para el sistema solar térmico. La implementación de calentamiento de agua por medio del sistema solar térmico para 6 personas está compuesta únicamente por una inversión inicial. Durante la vida útil del sistema de calentamiento, que corresponde a 20 años, no se estipulan ingresos ni egresos. Por tanto el VPN del proyecto es la inversión inicial. En la tabla que a continuación se presenta, se podrá ver el total de esta inversión. (Cuadro 10). En este cuadro se presentan los productos comprados para cada uno de los subsistemas que componen el sistema solar térmico (exceptuando el subsistema hidráulico que pertenece a los costos de instalación), la de productos, el valor del IVA total, la mano de obra, y el valor total de la inversión.

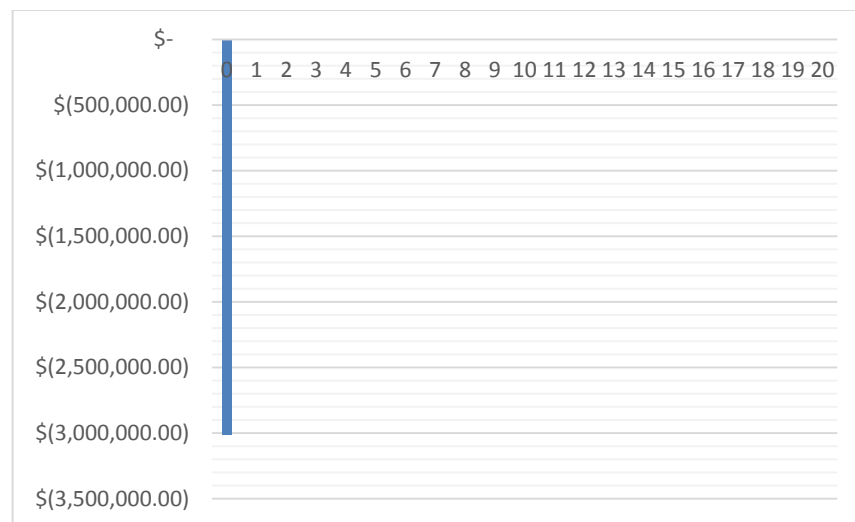
Cuadro 10. Inversión sistema solar térmico

Sistema solar térmico	Productos	Cantidad	Valor unitario + IVA	Total
<i>Subsistema de captación de energía</i>	Tubos evacuados simples.	18	23500	423000
	Empaque de Silicón	18	3500	63000
<i>Subsistema de calentamiento auxiliar</i>	Resistencia eléctrica tubular 2000 Watt	2	36000	72000
<i>Subsistema de almacenamiento</i>	Lamina CR calibre 18 (4*8)	2	60100	120200
	Corte laser	1	75000	75000
	Kilogramo de soldadura 332	4	8500	34000
	Poliéster reforzado con fibra de vidrio	1	170000	170000
	Accesorios Galvanizados (manguitos)	1	35400	35400
	Hueso Duro (1/4 de galón)	1	11500	11500
	Disco de pulidora	2	3900	7800
	Espuma de Poliuretano A (poliol)	1 ½	23000	34500
	Espuma de Poliuretano B (isocianato)	1 ½	23000	34500
	Masilla (1/4 de galón)	2	16000	32000
	Espátula	2	500	1000
	Lija No P120 pliego	5	1400	7000
	Anticorrosivo industrial gris (1/4 galón)	1	8000	8000
	Thiner Galón	2,5	10500	26250
	Anticorrosivo industrial blanco (1 galón)	1	37500	37500
	Esmalte rápido blanco (1 galón)	1	54400	54400
	Cubre polvo (empaque)	18	1500	27000
	Tubo de acero inoxidable (5,8 m)	1	4500	4500
<i>Estructura</i>	Angulo de acero (1" y 2")	1	98600	98600
	Tornillo hexagonal M8 grado 2	1	10000	10000
	Pintura electrostática	1	90000	90000
	Empaque de caucho negro	18	2000	36000
<i>Componente humano</i>	Costo del componente humano	1	1500000	1500000
			<i>IVA</i>	\$ 272.367,00
			<i>Valor total</i>	\$ 3.013.150,00

Fuente: Autores

El VPN entonces para este caso, sistema de calentamiento de agua por energía solar, es \$ 3.013.150,00 (pesos colombianos), el sistema solar térmico refleja un egreso inicial muy alto, sin embargo, para poder determinar si el sistema es rentable en comparación con los otros dos sistemas (eléctrico y gas natural), se determina a continuación también el VPN de estos. La línea de tiempo del sistema solar térmico se puede observar en la siguiente figura, hay que tener en cuenta que se ha realizado para la vida útil del sistema, es decir, 20 años.

Figura 106. Línea de tiempo en años para el sistema solar térmico



Fuente: Autores

7.2.4.2 Análisis de VPN para sistema eléctrico. Como se observó en la medición de costos de consumo de energía eléctrica... Véase numeral 7.2.3.2..., el sistema más económico de los dos sistemas eléctricos analizados fue la ducha eléctrica, siendo más económica que el calentador eléctrico, por tanto, para el análisis de VPN para sistema eléctrico se va a tomar como objeto de análisis el valor de consumo determinado para ducha eléctrica.

El consumo de energía de la ducha eléctrica se ve reflejado mensualmente en el recibo de pago que se cancela en la electrificadora, sin embargo, pese a que el

consumo de energía sea el mismo que en meses anteriores, el valor en pesos tiende a incrementar a medida del paso del tiempo. El incremento del valor del kWh está directamente relacionado con la tasa de interés de inflación. Esta tasa de interés ha sido 3.3%²¹ efectivo anual en los últimos años en Colombia.

Para poder pronosticar este incremento del valor del consumo de energía con la tasa de inflación, se hace necesario determinar una tasa equivalente pero en periodos mensuales, la tasa de inflación efectiva mensual, para poder analizar el pago mensual del consumo de energía eléctrica por parte de la ducha eléctrica.

Para poder realizar esta operación utilizamos la siguiente ecuación

$$(1 + i_1)^{m1} = (1 + i_2)^{m2} \quad [5]$$

Donde: i_1 = Tasa conocida o inicial (Inflación efectiva anual)

i_2 = Nueva tasa a la que se va calcular (Inflación efectivo mensual)

$m1$ = periodos iniciales que hay en un año (en este caso $m1=1$)

$m2$ = periodos de la nueva tasa que hay en un año (en este caso $m2=12$)

Esta ecuación nos permite de forma sencilla cambiar de efectividad, simplemente hay que reemplazar las variables por los datos conocidos y por esta razón es llamada por algunos autores como “ecuación del cambio de efectividad”²²

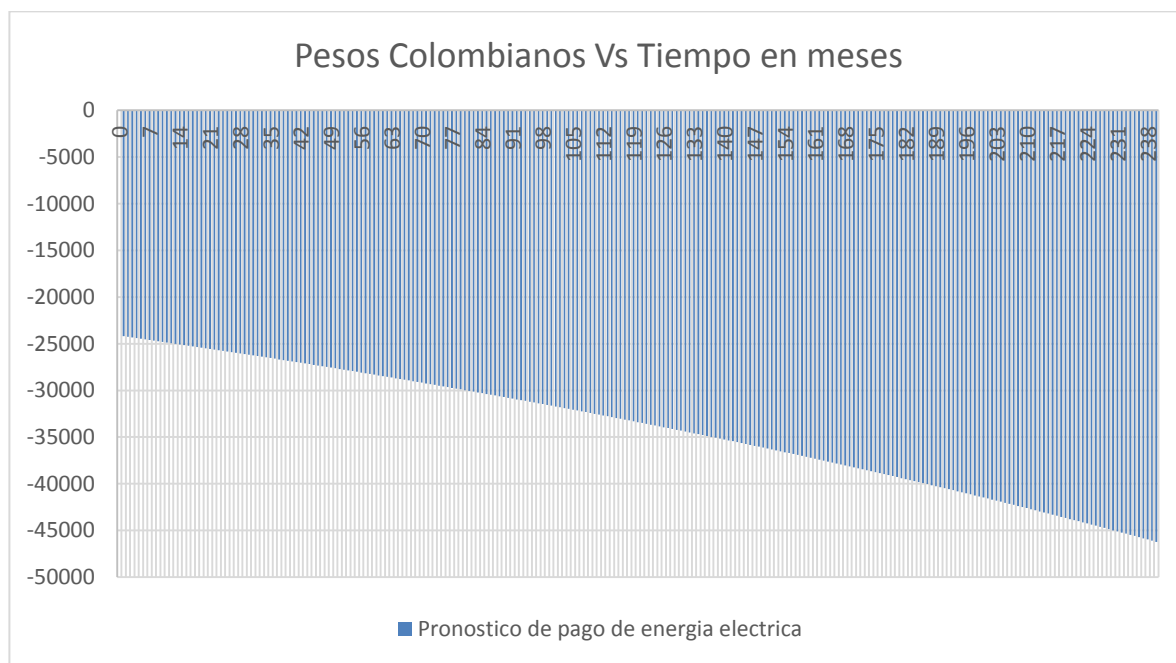
Remplazando los datos, y despejando de la formula [5], logramos determinar la tasa de inflación efectiva mensual, **obteniendo que la tasa de inflación efectiva mensual es de 0.271%**. Con este dato obtenido, se pronostica el valor mensual

²¹ TRADING ECONOMICS. Colombia – Tasa de inflación [online]. New York City – Lisboa. Ene. 2014. Disponibilidad y acceso en la web:
< <http://es.tradingeconomics.com/colombia/inflation-cpi>>.

²² BACA, Guillermo. Ingeniería económica. 8 Ed. Bogotá, D.C., Colombia, Fondo educativo Panamericano, 2001. 27 p.

del consumo de energía eléctrica de la ducha para el baño de **6 personas durante 20 años**. En la siguiente grafica se puede observar la tendencia pronosticada con el valor de la tasa de inflación promedio seleccionada. (El valor de los datos pronosticados exactos se puede encontrar en EL ANEXO C).

Figura 107. Pronostico del valor de consumo de energía eléctrica por uso de ducha eléctrica



Fuente: Autores

Al consumo, además, hay que sumarle el valor del equipo, ducha eléctrica (Ver cuadro 11). En promedio una ducha eléctrica tiene una vida útil que varía entre veinte y treinta años, por tanto a lo largo del periodo de análisis (20 años) se compra una única ducha, esta inversión ya se toma como valor presente neto.

Cuadro 11. Inversión inicial sistema eléctrico

<i>Producto</i>	Cantidad	Valor Unitario	IVA	Valor total
<i>Ducha eléctrica</i>	1	36900	8100	45000

Fuente: Autores

Utilizando la ecuación [4] y los datos de la gráfica de la figura 107, (ver ANEXO C) logramos determinar el VP (valor presente) del consumo de energía eléctrica para baño de 6 personas al día, obteniendo un valor de \$5'808.312. Para este cálculo se ha utilizado un $i=0,271\%$, equivalente a la tasa de inflación, garantizando que en valor presente la mensualidad sea la equivalente al costo de la energía consumida hallada en el numeral 7.2.3.2, pero para 6 personas, es decir, \$24201,3.

Para este sistema, la suma del valor de la ducha eléctrica y el VP del consumo de energía es el VPN del sistema de calentamiento de agua por energía eléctrica, obteniendo el siguiente resultado.

$$VPN = \$45000 + \$5808312$$

$$VPN = \$5'853.312$$

Se puede ver ya, que en comparación con el VPN del sistema térmico solar hay una diferencia considerable. Sin embargo, es muy interesante ver el desarrollo del VP de consumo a través del tiempo. Para esto, se puede observar la siguiente tabla. (Tabla completa en ANEXO C)

Cuadro 12. Desarrollo del VP a través de los meses durante 12 años

Meses	VP	Meses	VP	Meses	VPN
1	-24201,3	13	-314616,9	25	-605032,5
2	-48402,6	14	-338818,2	26	-629233,8
3	-72603,9	15	-363019,5	27	-653435,1
4	-96805,2	16	-387220,8	28	-677636,4
5	-121006,5	17	-411422,1	29	-701837,7
6	-145207,8	18	-435623,4	30	-726039
7	-169409,1	19	-459824,7	31	-750240,3
8	-193610,4	20	-484026	32	-774441,6
9	-217811,7	21	-508227,3	33	-798642,9
10	-242013	22	-532428,6	34	-822844,2
11	-266214,3	23	-556629,9	35	-847045,5
12	-290415,6	24	-580831,2	36	-871246,8

Fuente: Autores

Cuadro 12. (Continuación) Desarrollo del VP a través de los meses durante 12 años

Meses	VPN	Meses	VPN	Meses	VPN
37	-895448,1	73	-1766694,9	109	-2637941,7
38	-919649,4	74	-1790896,2	110	-2662143
39	-943850,7	75	-1815097,5	111	-2686344,3
40	-968052	76	-1839298,8	112	-2710545,6
41	-992253,3	77	-1863500,1	113	-2734746,9
42	-1016454,6	78	-1887701,4	114	-2758948,2
43	-1040655,9	79	-1911902,7	115	-2783149,5
44	-1064857,2	80	-1936104	116	-2807350,8
45	-1089058,5	81	-1960305,3	117	-2831552,1
46	-1113259,8	82	-1984506,6	118	-2855753,4
47	-1137461,1	83	-2008707,9	119	-2879954,7
48	-1161662,4	84	-2032909,2	120	-2904156
49	-1185863,7	85	-2057110,5	121	-2928357,3
50	-1210065	86	-2081311,8	122	-2952558,6
51	-1234266,3	87	-2105513,1	123	-2976759,9
52	-1258467,6	88	-2129714,4	124	-3000961,2
53	-1282668,9	89	-2153915,7	125	-3025162,5
54	-1306870,2	90	-2178117	126	-3049363,8
55	-1331071,5	91	-2202318,3	127	-3073565,1
56	-1355272,8	92	-2226519,6	128	-3097766,4
57	-1379474,1	93	-2250720,9	129	-3121967,7
58	-1403675,4	94	-2274922,2	130	-3146169
59	-1427876,7	95	-2299123,5	131	-3170370,3
60	-1452078	96	-2323324,8	132	-3194571,6
61	-1476279,3	97	-2347526,1	133	-3218772,9
62	-1500480,6	98	-2371727,4	134	-3242974,2
63	-1524681,9	99	-2395928,7	135	-3267175,5
64	-1548883,2	100	-2420130	136	-3291376,8
65	-1573084,5	101	-2444331,3	137	-3315578,1
66	-1597285,8	102	-2468532,6	138	-3339779,4
67	-1621487,1	103	-2492733,9	139	-3363980,7
68	-1645688,4	104	-2516935,2	140	-3388182
69	-1669889,7	105	-2541136,5	141	-3412383,3
70	-1694091	106	-2565337,8	142	-3436584,6
71	-1718292,3	107	-2589539,1	143	-3460785,9
72	-1742493,6	108	-2613740,4	144	-3484987,2

Fuente: Autores

Vale la pena realizar una observación de lo ocurrido con el VP en el mes 125, es decir, a mediados del décimo año. Como valor presente del consumo de energía eléctrica se alcanza el valor presente realizado en la inversión del sistema solar térmico, a partir de ahí se puede considerar que las mensualidades durante los próximos nueve años son el excedente o pérdida de este sistema con respecto al solar.

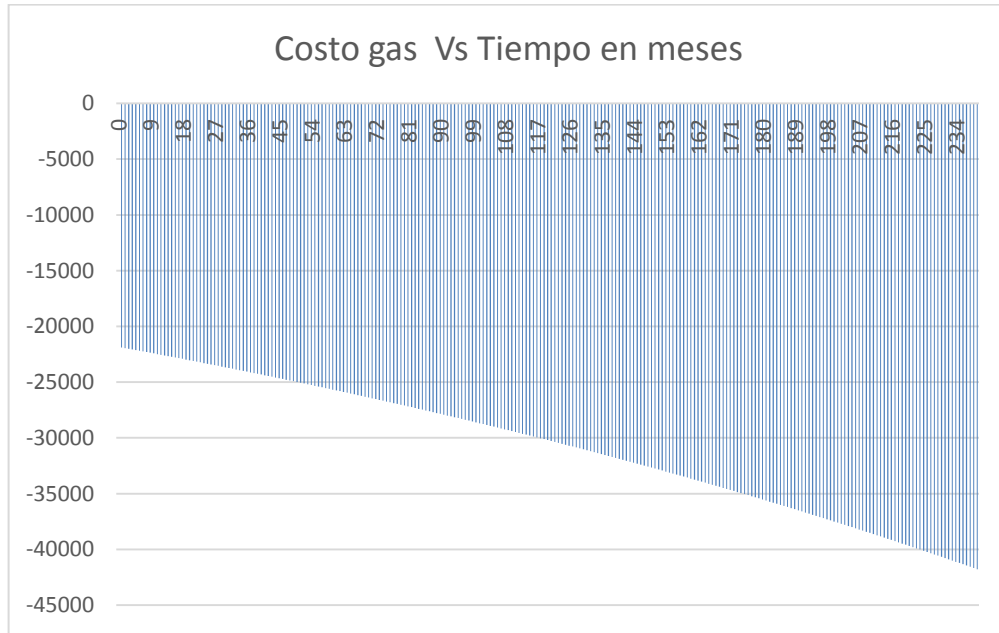
7.2.4.3 Análisis de VPN para gas natural. De los sistemas utilizados de calentamiento de agua asistidos por gas natural, el calentador de agua de gas natural de paso fijo es el más económico y común. Por tanto, esta tecnología es el objetivo de nuestro análisis. Se llevara a cabo un procedimiento similar al utilizado para el VPN de energía eléctrica, para evaluar el gas natural en comparación con los otros dos sistemas analizados.

El consumo de gas natural, al igual que el consumo de energía eléctrica, se ve reflejado mensualmente en un recibo de pago, y también es influenciado directamente por la tasa de inflación.

Para poder pronosticar este incremento del valor del consumo de gas natural con la tasa de inflación, se utiliza la tasa de inflación efectiva mensual, para poder analizar el pago mensual del consumo de gas natural cuando hablamos de higiene personal.

Obtenida anteriormente la tasa de inflación efectiva mensual de 0.271%, se pronostica el valor mensual del consumo de gas natural para higiene personal de **6 personas durante 20 años**. En la siguiente grafica se puede observar la tendencia pronosticada con el valor de la tasa de inflación promedio seleccionada. (El valor de los datos pronosticados exactos se puede encontrar en EL ANEXO C).

Figura 108. Pronostico del valor de consumo de gas natural para higiene personal



Fuente: Autores

Al consumo, además, hay que sumarle el valor del equipo, calentador de agua de gas natural (Ver cuadro 12). En promedio un calentador de este tipo tiene una vida útil que varía entre diez y quince años, por tanto a lo largo del periodo de análisis (20 años) se compran dos de estos equipos, esta inversión ya se toma como valor presente neto.

Cuadro 13. Inversión inicial sistema de calentamiento a gas natural

Producto	Cantidad	Valor Unitario	IVA	Valor total
Calentador a gas natural de paso fijo	2	491.918	107.982	1.199.800

Fuente: Autores

Utilizando la ecuación [4] y los datos de la gráfica de la figura 108, (ver ANEXO C) logramos determinar el VP (valor presente) del consumo de gas natural para baño de 6 personas al día, obteniendo un valor de \$5'251.910. Para este cálculo se ha

utilizado un $i=0,271\%$, equivalente a la tasa de inflación, garantizando que en valor presente la mensualidad sea la equivalente al costo de la energía consumida hallada en el numeral 7.2.3.4, pero para 6 personas, es decir, \$21882,96.

Para este sistema, la suma del valor del equipo de calentamiento y el VP del consumo de gas natural es el VPN del sistema de calentamiento de agua por energía eléctrica, obteniendo el siguiente resultado.

$$VPN = \$1199800 + \$5251910$$

$$VPN = \$6'451.710$$

Se puede ver ya, que en comparación con el VPN del sistema térmico solar hay una diferencia aún más considerable que considerable que con la ducha eléctrica. También, es muy interesante ver el desarrollo del VP de consumo a través del tiempo. Para esto, se puede observar la siguiente tabla. (Tabla completa en anexo C)

Cuadro 14. Desarrollo del VP a través de los meses durante 12 años

Meses	VPN	Meses	VPN	Meses	VPN
1	-21882,96	13	-284478,48	25	-547074
2	-43765,92	14	-306361,44	26	-568956,96
3	-65648,88	15	-328244,4	27	-590839,92
4	-87531,84	16	-350127,36	28	-612722,88
5	-109414,8	17	-372010,32	29	-634605,84
6	-131297,76	18	-393893,28	30	-656488,8
7	-153180,72	19	-415776,24	31	-678371,76
8	-175063,68	20	-437659,2	32	-700254,72
9	-196946,64	21	-459542,16	33	-722137,68
10	-218829,6	22	-481425,12	34	-744020,64
11	-240712,56	23	-503308,08	35	-765903,6
12	-262595,52	24	-525191,04	36	-787786,56

Fuente: Autores

Cuadro 14. (Continuación) Desarrollo del VP a través de los meses durante 12 años

Meses	VPN	Meses	VPN	Meses	VPN
37	-809669,52	73	-1597456,08	109	-2385242,64
38	-831552,48	74	-1619339,04	110	-2407125,6
39	-853435,44	75	-1641222	111	-2429008,56
40	-875318,4	76	-1663104,96	112	-2450891,52
41	-897201,36	77	-1684987,92	113	-2472774,48
42	-919084,32	78	-1706870,88	114	-2494657,44
43	-940967,28	79	-1728753,84	115	-2516540,4
44	-962850,24	80	-1750636,8	116	-2538423,36
45	-984733,2	81	-1772519,76	117	-2560306,32
46	-1006616,16	82	-1794402,72	118	-2582189,28
47	-1028499,12	83	-1816285,68	119	-2604072,24
48	-1050382,08	84	-1838168,64	120	-2625955,2
49	-1072265,04	85	-1860051,6	121	-2647838,16
50	-1094148	86	-1881934,56	122	-2669721,12
51	-1116030,96	87	-1903817,52	123	-2691604,08
52	-1137913,92	88	-1925700,48	124	-2713487,04
53	-1159796,88	89	-1947583,44	125	-2735370
54	-1181679,84	90	-1969466,4	126	-2757252,96
55	-1203562,8	91	-1991349,36	127	-2779135,92
56	-1225445,76	92	-2013232,32	128	-2801018,88
57	-1247328,72	93	-2035115,28	129	-2822901,84
58	-1269211,68	94	-2056998,24	130	-2844784,8
59	-1291094,64	95	-2078881,2	131	-2866667,76
60	-1312977,6	96	-2100764,16	132	-2888550,72
61	-1334860,56	97	-2122647,12	133	-2910433,68
62	-1356743,52	98	-2144530,08	134	-2932316,64
63	-1378626,48	99	-2166413,04	135	-2954199,6
64	-1400509,44	100	-2188296	136	-2976082,56
65	-1422392,4	101	-2210178,96	137	-2997965,52
66	-1444275,36	102	-2232061,92	138	-3019848,48
67	-1466158,32	103	-2253944,88	139	-3041731,44
68	-1488041,28	104	-2275827,84	140	-3063614,4
69	-1509924,24	105	-2297710,8	141	-3085497,36
70	-1531807,2	106	-2319593,76	142	-3107380,32
71	-1553690,16	107	-2341476,72	143	-3129263,28
72	-1575573,12	108	-2363359,68	144	-3151146,24

Fuente: Autores

Es meritorio resaltar que el VP en el mes 138, es decir, a mediados del onceavo año, alcanza el valor presente realizado en la inversión del sistema solar térmico, a partir de ahí se puede considerar que las mensualidades durante los próximos ocho años y medio son el excedente o pérdida de este sistema con respecto al solar, pero no hay que ignorar el costo de la máquina, lo que aumenta aún más la ganancia del sistema solar térmico.

Para destacar los resultados obtenidos, se ubican en la siguiente tabla el VPN de los diferentes sistemas analizados, sistema solar, eléctrico y gas natural, con un rango de análisis de 20 años, equivalente al tiempo de vida del calentador de agua asistido por energía solar.

Cuadro 15. Medición de costo de electricidad y gas natural

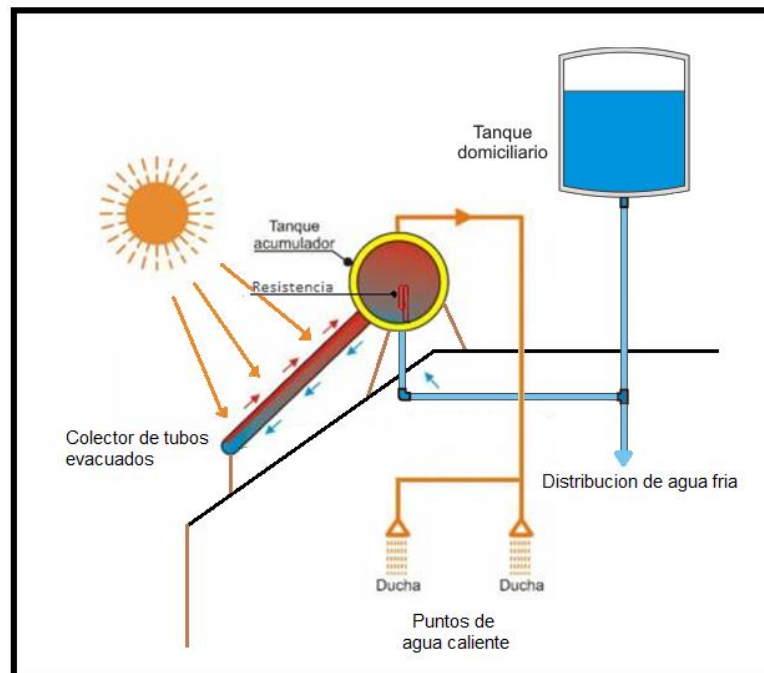
Calentador de agua	Costo//persona/mes
Calentador Solar	\$ 3.013.150,00
Calentador Eléctrico	\$ 5.853.312
Calentador Gas	\$ 6.451.710

Fuente: Autores

CONCLUSIONES

- Se diseñó y construyó un sistema de calentamiento de agua asistido por energía solar (ver Figura) para una vivienda rural habitada seis personas, que alcanza las siguientes especificaciones:
 1. Una temperatura de calentamiento del agua máxima de 59°C.
 2. Un subsistema de captación de energía de tubos evacuados simples.
 3. Un subsistema de calentamiento auxiliar con energía eléctrica (para ser usado en ocasiones cuando hay ausencia de energía solar o un sobreconsumo de agua caliente).
 4. Un subsistema de almacenamiento de agua mediante un tanque aislado de 180 Litros.

Figura 109. Sistema de Calentamiento de Agua

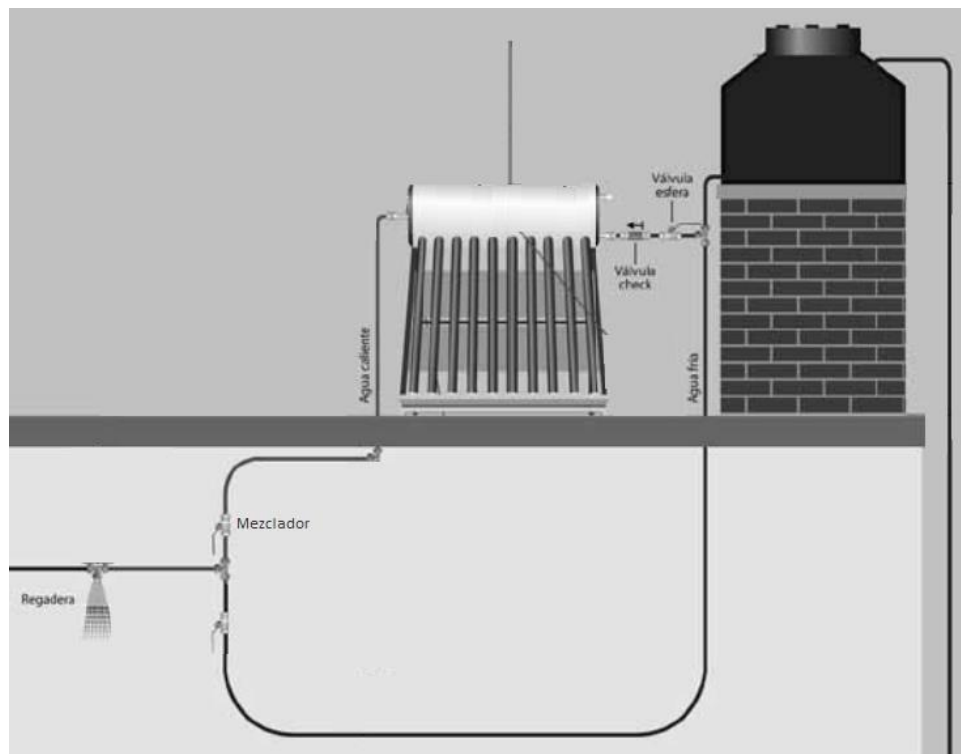


Fuente: Modificado por autores

- Se instaló el sistema de calentamiento de agua en una cabaña de la finca en la Finca *Villa Elisa* (Mesa de los Santos, Santander) con sus respectivos accesorios de comunicación para suministrar agua fría al calentador, y para suministrar el agua almacenada caliente al circuito de consumo (dos duchas de la cabaña). El circuito hidráulico de consumo de agua caliente o red de agua caliente en la vivienda es idéntico al que normalmente se incluye en toda vivienda.

De forma simplificada, se puede observar en la siguiente figura el funcionamiento del sistema, con los elementos más básicos que componen el sistema solar térmico para entregar la demanda de agua caliente a las duchas.

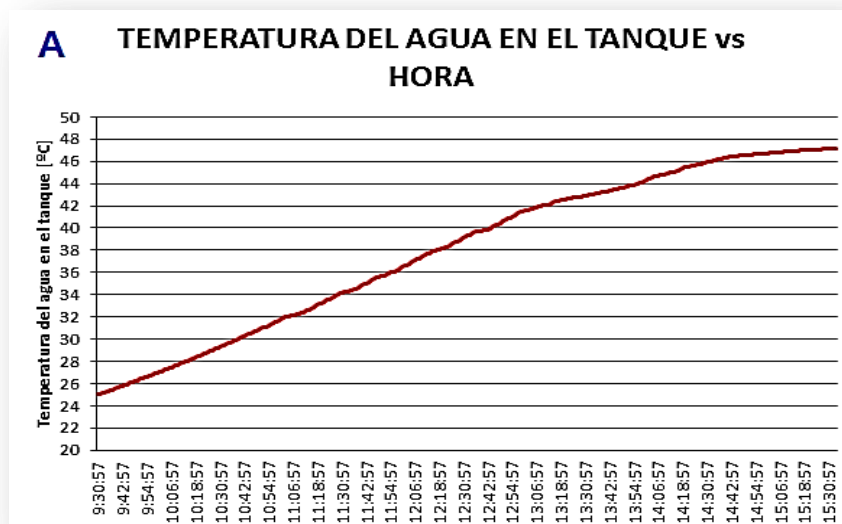
Figura 110. Elementos básicos de la red hidráulica del sistema solar térmico



Fuente: Modificado por autores

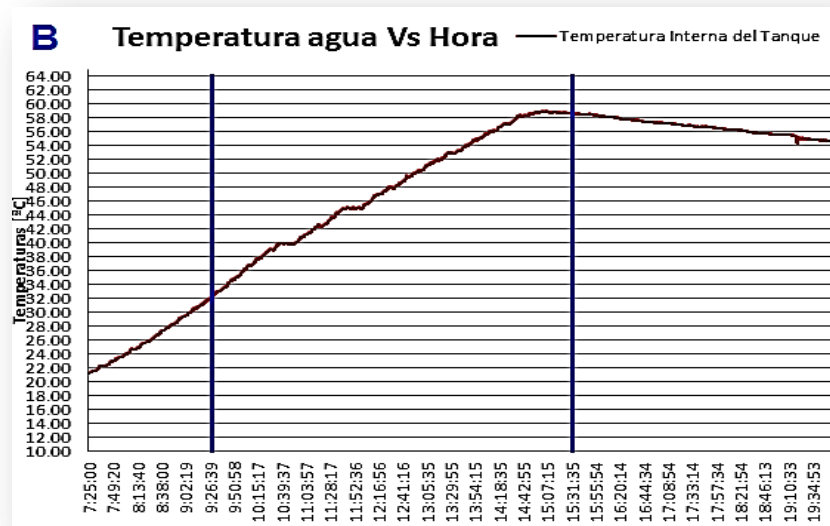
- Se implementó un sistema de adquisición de datos para el monitoreo y control del colector solar de tubos de vacío mediante el software labVIEW (Entorno gráfico de programación) y hardware de control Field Point (Sistema de adquisición de datos y control de National Instruments) permitiendo evaluar cada una de las variables requeridas observar el correcto funcionamiento del sistema.
- Analizando el modelo matemático del diseño y el real bajo el mismo rango de tiempo, se puede observar que el modelo teórico (figura 111, grafica A) presento un aumento de la temperatura del agua en el interior del tanque de almacenamiento de aproximadamente 22°C ($T_{inic} = 25^{\circ}\text{C} - T_{fin} = 47^{\circ}\text{C}$), mientras que en el modelo real (figura 102, grafica B) presento un aumento de aproximadamente 27°C ($T_{inic} = 32^{\circ}\text{C} - T_{fin} = 59^{\circ}\text{C}$). Por lo tanto se puede observar que el modelo real comporta similar con respecto al modelo matemático, incluso alcanza una temperatura más alta.

Figura 111. Comparación entre las curvas de temperatura teórica y real (Parte A)



Fuente: Autores

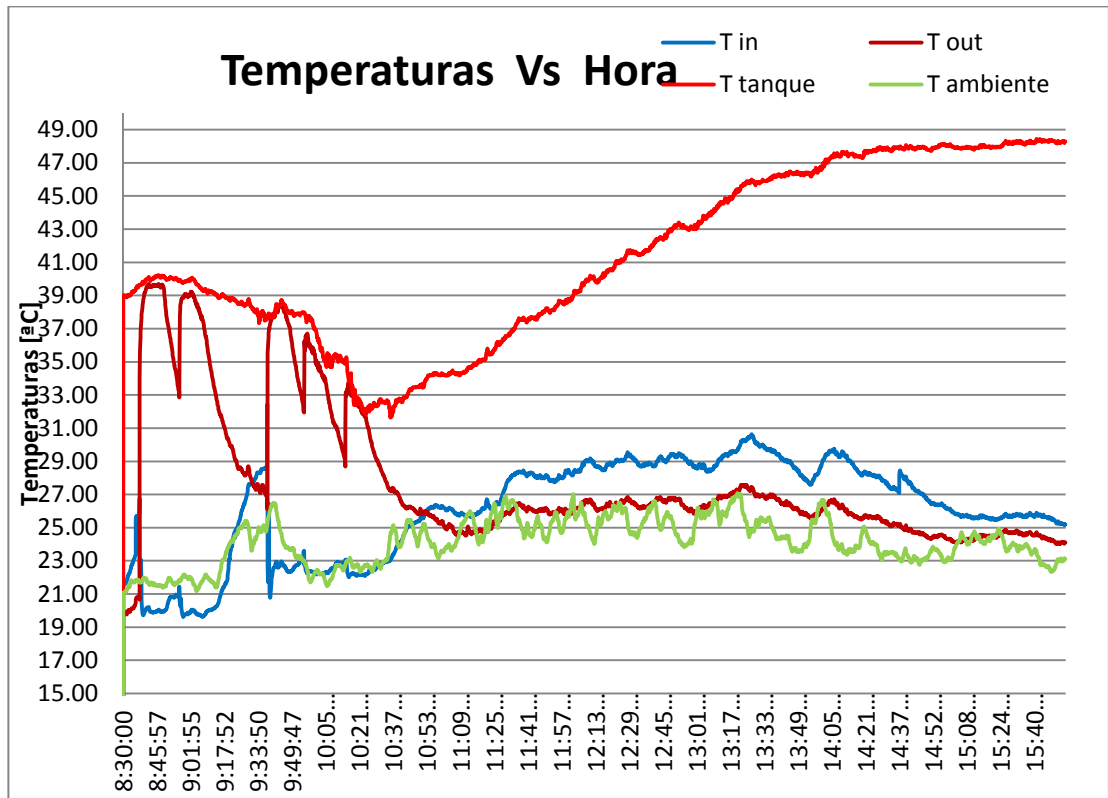
Figura 112. Comparación entre las curvas de temperatura teórica y real (Parte B)



Fuente: Autores

- El tanque de almacenamiento de agua caliente aislado térmicamente funciona de manera adecuada, ya que la GUIA TECNICA COLOMBIANA GTC 108, inciso 4.1.3.2 recomienda una rapidez de enfriamiento del tanque de $1.1^{\circ}\text{C}/\text{hora}$, en un rango de trabajo entre 50°C y 37°C . Para el tanque de almacenamiento de agua caliente fabricado se presentó un enfriamiento de aproximadamente 12°C en 11 horas, lo cual cumple con la recomendación mencionada.
- Se obtuvo una eficiencia global promedio del calentador de agua con energía solar del 78.6% para la prueba de estancamiento realizada, donde alcanzó una temperatura máxima de 59°C . En la prueba de consumo se obtuvieron temperaturas de consumo de agua calientes adecuadas tanto en los ciclos de consumo de agua caliente, como después de haber realizado dichos ciclos de consumo, como se puede ver en la siguiente gráfica (Figura 113).

Figura 113. Grafica de temperatura segunda parte prueba consumo



Fuente: Autores

- Los impactos socio-ambientales del sistema solar térmico posteriormente a su construcción e instalación, se pueden observar de forma resumida en el siguiente cuadro (Ver cuadro 16).
- Para destacar los resultados obtenidos, se ubican en la siguiente tabla (Ver cuadro 17) el VPN de los diferentes sistemas analizados, sistema solar, eléctrico y gas natural, con un rango de análisis de 20 años, equivalente al tiempo de vida del calentador de agua asistido por energía solar. Se observa que el sistema solar térmico, económicamente es viable en comparación con los otros sistemas.

Cuadro 16. Resumen de la evaluación socio-ambiental

Consumo de recursos y demanda energética	En las fases de fabricación e instalación existió un consumo considerable de energía. También se utilizó energía de origen fósil produciendo emisiones de gases Invernadero.
Impacto sobre el medio ambiente	El medio físico no sufre impactos significativos sobre la calidad del aire, de los suelos o del agua. Tampoco se genera contaminación auditiva
Impacto visual	Hay una influencia notoria visual sobre el paisaje.
Impacto sobre el medio biótico	Ocupación de terreno cultivable, sin afección notoria sobre la flora y fauna.

Fuente: Autores

Cuadro 17. Medición de costo de electricidad y gas natural

Calentador de agua	Costo//persona/mes
Calentador Solar	\$ 3.013.150,00
Calentador Eléctrico	\$ 5.853.312
Calentador Gas	\$ 6.451.710

Fuente: Autores

RECOMENDACIONES

- Se recomienda implementar un dosificador de soda caustica en el tanque domiciliario para la prevención de formación de algas y hongos dentro del calentador, ya que el agua no ha recibido ningún tratamiento.
- Se recomienda analizar la inversión inicial del sistema de calentamiento asistido por energía solar con producción en serie, ya que proporcionaría un valor menor de la inversión inicial del actual, y por tanto, un análisis más exacto de VPN en comparación con los otros sistemas de calentamiento (eléctrico, gas natural).
- Se recomienda mirar la implementación de un vaso de llenado para controlar el nivel de agua dentro del tanque cuando está conectado a la red de acueducto, esto daría la posibilidad de conectar el sistema en la zona urbana.

BIBLIOGRAFÍA

BACA, Guillermo. Ingeniería económica. 8 Ed. Bogotá, D.C., Colombia, Fondo educativo Panamericano, 2001.

CORPORACIÓN DE DESARROLLO TECNOLÓGICO. Sistemas solares térmicos, manual de diseño para el calentamiento de agua. Santiago de Chile; Cámara chilena de construcción. 2007.

ESSA Electrificadora de Santander S.A. E.S.P. Informa a sus usuarios del sistema de energía eléctrica de departamento de Santander y sur del cesar [online]. Departamento de Santander y sur del Cesar, Feb. 2014. Disponibilidad y acceso en la web: <http://www.essa.com.co/site/Portals/14/Docs/Tarifas/Tarifa_ESSA_201402.pdf>.

GUIA TECNICA COLOMBIANA. Especificaciones para sistemas de calentamiento de agua con energía solar, destinada al uso doméstico. GTC 108. Bogotá D.C.ICONTEC 2004.

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.

INSTITUTO DE CIENCIAS NUCLEARES Y ENERGÍAS ALTERNATIVAS (INEA). Evaluación de sistemas fotovoltaicos en Colombia. Bogotá, INEA, 1995.

INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGIA Y ESTUDIO AMBIENTAL y UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA. Atlas de radiación solar de Colombia promedio multianual. Apéndice C. Bogotá: IDEAM y UPME, 2005.

JAIMES, Nelson Eduardo y RIVERO, Sergio Armando. Diseño y construcción de un colector solar de tubos de vacío. Trabajo de grado de Ingeniería Mecánica. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander 2012.

LUNDE, Peter J. Solar thermal engineering, space heating and hot water systems. New York: John Willey & sons, 1980.

NORMA TECNICA COLOMBIANA. Instalación de sistemas domésticos de agua caliente que funcionan con energía solar. NTC 3507. Bogotá D.C.: ICONTEC 2004.

PICÓ HERAS, S. Desarrollo e implantación de energías renovables. Trabajo de grado de la carrera de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental. Cataluña: Universidad de Cataluña, 2002.

RODRÍGUEZ MURCIA, Humberto. Desarrollo de la energía solar en Colombia y sus perspectivas. En: Revista de ingeniería. Universidad de los Andes. Noviembre, 2008, vol. 28.

SANTAMARTA FLOREZ, José. Las energías renovables son el futuro. En: World Watch. Septiembre, 2004, vol. 25.

TRADING ECONOMICS. Colombia – Tasa de inflación [online]. New York City – Lisboa. Ene. 2014. Disponibilidad y acceso en la web: < <http://es.tradingeconomics.com/colombia/inflation-cpi>>.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA, Departamento de física. Determinación del consumo final de energía en los sectores residencial, urbano y comercial y determinación de consumos de equipos domésticos de energía eléctrica y gas. República de Colombia, ministerio de minas y energía UPME, 2006.

U.P.M.E Ministerio de minas y energía. Determinación del consumo final de energía en los sectores residencial, urbano y comercial y determinación de consumos de equipos domésticos de energía eléctrica y gas. República de Colombia, ministerio de minas y energía UPME, 2006.

ANEXOS

ANEXO A
CODIGO DEL MODELO MATEMATICO DEL SISTEMA SOLAR TERMICO EN
MATLAB

CÓDIGO DEL MODELO MATEMÁTICO DEL COMPORTAMIENTO TRANSITORIO DE LA TEMPERATURA AL INTERIOR DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO DEL SISTEMA SOLAR TÉRMICO EN MATLAB

```
%LIMPIAR E INICIALIZAR VARIABLES PARA UN NUEVO CALCULO

clear all
clc

%[seg] tiempo entre muestras de temperatura y radiación para que sea
cada
%1 minuto
t_muestra=3*20 ;

%ASIMUT PARED
asimut_pared=0; %colector ubicado hacia el
sur

%INCLINACION DE LA SUPERFICIE beta
beta=15;

lat=7; %latitud de la mesa de los santos en
grados
latr=((lat*pi)/180); %latitud en radianes

for i=1:1:365 %PARA 365 ESTADOS DISTINTOS DE LOS DATOS
%O=i

%LEER EL DOCUMENTO DE EXCEL EN LA HOJA 1
A=xlsread('datos_para_diseño.xlsx',1);

%HORA SOLAR

%hora solar con ángulo en grados a partir de la tabla de Excel, el valor
de
%la fila i de la columna 11
w=A(i*20,6)
wr=((w*pi)/180); %hora solar en radianes

%DECLINACION SOLAR
n=45; %día del año según el mes 14 de febrero
decli=23.45*(sind(360*((284+n)/365))) %cálculo de declinación en grados
declir=((decli*pi)/180); %cálculo de declinación en rad

%ZENIT SOLAR TETHA Z

%cenit solar para un plano horizontal en grados
cenit_solar_z=acosd(((sind(decli))*sind(lat))+((cosd(decli))*cosd(lat)
)*(cosd(w))))
```

```

%ANGULO DE ELEVACION ALFA S

ángulo de elevación del sol
ang_elev_sol=90-cenit_solar_z

%ASIMUT SOLAR
asimut_solar=asind((((cosd(decli))*(sind(w)))/(cosd(ang_elev_sol))))

%ZENIT SOLAR (para superficie inclinada)
cenit_solar=acosd(((sind(decli))*(sind(lat))*(cosd(beta)))-
((sind(decli))*(cosd(lat))*(sind(beta))*(cosd(asimut_pared)))+(cosd(decli))*(cosd(lat))*(cosd(beta))*(cosd(w)))+(cosd(decli))*(sind(lat))*(sind(beta))*(cosd(asimut_pared))*(cosd(w)))+(cosd(decli))*(sind(beta))*(sind(asimut_pared))*(sind(w))))

%TOMAMOS ESTOS DATOS DEL DOCUMENTO DE EXCEL DE RADIAICON TOTAL Y DIFUSA
H=A(i*20,3);
Hd=A(i*20,2);

D_t1=0.043; % m diámetro interno del tubo se desprecia es espesor del
vidrio
R_t1=D_t1/2; %radio del tubo 1 se desprecia el espesor
L_tubo=1.8; % m longitud del tubo de vacío aunque es un poco más pequeña

%CALOR POR RADIACION DIRECTA SOBRE LOS TUBOS
Q_directo=(H-
Hd)*((cosd(cenit_solar))/(cosd(cenit_solar_z)))*D_t1*L_tubo;

%CALOR POR RADIACION DIFUSA SOBRE LOS TUBOS
Fta=0.5; %factor de forma o de visión de medio ambiente al
tubo
Q_difusa=(Hd*(cosd(beta/2))*(cosd(beta/2))*Fta*pi*D_t1*L_tubo);

%CALCULO DE RACIACION REFLEJADA SOBRE LOS TUBOS POR LOS ALREDEDORES
r_amb=0.30; %reflectividad del medio ambiente
Q_reflejada=(H*(sind(beta/2))*(sind(beta/2))*r_amb*Fta*pi*D_t1*L_tubo);

%CALCULO DEL CALOR INCIDENTE SOBRE LA SUPERFICIE ABSORTIVA
transm=0.89; %transmitancia del tubo de vidrio
abst=0.935; %absortividad de la superficie
selectiva

Qtotal=Q_directo+Q_difusa+Q_reflejada; %[w]sumatoria de la energía por
unidad de tiempo
Q_incidente=Qtotal*transm*abst %[w] calor incidente en la
superficie selectiva para un tubo

%Vector para almacenar la energía incidente total para los 18 tubos
qtv(i)=Qtotal*t_muestra*18;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

U_pc=0.65;  %[W/m2*°C]      %coeficiente global de perdidas dado por el
fabricante

T_amb=25;          %[°C]    asumimos una temperatura ambiente de
25°

T_ambk=T_amb+273;    %[°K]    %temperatura ambiente en °K
tsv(1)=T_ambk+1;
tcv(1)=T_ambk;

abstiv=0.935;      %abosortividad de la capa selectiva
emisi_capa_selec=0.065; %emisividad de la capa selectiva
trans_vid=0.89;    %transmisividad de los tubos de vidrio
k_vidrio=1.2;      %[w/m*°K]   conductividad térmica del
borosilicato
evidrio=0.9;       %coeficiente de emisividad del vidrio
sigma=(5.67e-8);   %[w/m2*K4]   constante de boltzman
g=9.81;           %[m/s2]    gravedad

for l=0.01:0.01:50 %iteración de la temperatura de la superficie
selectiva

    V=1

    Ts=tsv(i)+1     %[°K] se empieza a iterar con un valor inicial
T_S(1)=T_ambk+2

    if Ts<T_ambk

        Ts=T_ambk+0.1;

    end

    D_ext_t2=0.058; %[m] diámetro exterior del tubo de vidrio  58 mm

    %[m] diámetro interno del tubo de vidrio 2, con un espesor de 2mm del
    %tubo 2
    D_int_t2=0.052;

    R_ext_t2=((D_ext_t2)/(2)); %[m] radio exterior del tubo de vidrio 2
en metros
    R_int_t2=((D_int_t2)/(2)); %[m] radio interior del tubo de vidrio 2
en metros

    A_ext_t2=2*pi*R_ext_t2*L_tubo; %[m^2] área exterior por donde se
pierde el calor

    Q_p=U_pc*A_ext_t2*(Ts-T_ambk); %calculo del calor perdido a
partir de asumir Ts

    %ESTO ES PARA QUE SI EL CALOR PERDIDO LLEGA A SER MAYOR QUE EL GANADO

```

```

%CON LA TS ASUMIDA, ENTONCES NO TENGA QUE CALCULAR LA TC, SINO QUE
%VARIE DE UNA VEZ LA TS HASTA QUE EL QP CONCUERDE Y AHI SI BUSQUE LA
TC

if Q_p<Q_incidente

for j=0.01:0.01:20      %iteración de la temperatura del colector

M=j;

Tc=T_ambk+j;

if Tc<T_ambk

    Tc=T_ambk+0.01;

end

k_vidrio=1.2;          %[w/m2*K]    se asume como constante
coeficiente de transferencia de calor por conducción del vidrio

%CALCULO DEL COEFICIENTE DE PERDIDAS POR CONVECCION EXTERIOR HACIA EL
%AIRE

Tf_1=((Tc+T_ambk)/2);    %[°K]      temperatura de película para
propiedades
Beta=(1/T_ambk);        %[1/°K]    coeficiente de expansión térmica del
aire

%coeficiente de conducción térmica [
k_aire=(6.19370207e-3)-(2.29549113e-5*Tf_1)+(9.95362536e-7*Tf_1^2)-
(4.89968245e-9*Tf_1^3)+(1.31352658e-11*Tf_1^4)-(1.86732208e-
14*Tf_1^5)+(1.10142617e-17*Tf_1^6);
%número de prand
Pr=-1.94181260e-1+(1.24241136e-2*Tf_1)-(5.61209203e-
5*Tf_1^2)+(7.44937147e-8*Tf_1^3)+(1.55709396e-10*Tf_1^4)-(5.62753784e-
13*Tf_1^5)+(4.68846523e-16*Tf_1^6);
%viscosidad cinemática [m2/seg]
Vis_cine=(3.89461669e-7)-(1.44466062e-8*Tf_1)+(3.90778848e-
10*Tf_1^2)-(1.05466563e-12*Tf_1^3)+(2.38817265e-15*Tf_1^4)-(3.11941823e-
18*Tf_1^5)+(1.74340719e-21*Tf_1^6);

Gr=((g*Beta*(Tc-T_ambk)*((D_ext_t2)^3))/((Vis_cine)^2));
%cálculo del número de grashoft      adimensional
Gr_corregido=Gr*(cosd(90-beta));      %grashoft
corregido por la inclinación de los tubos ya que esta ecuacion era para
tubos verticales
Ra=(Gr_corregido*Pr);      %cálculo del número de Rayleig
adimensional

C=0.59;      %Estas dos constantes son sacadas de las tablas para
flujo naturales laminares

```

```

n=0.25;
Nu_ext=C*((Ra)^n);

h_conv_ext=((Nu_ext*k_aire)/(D_ext_t2)); %cálculo del coeficiente
de perdida por convección exterior del tubo al aire

%CALCULO DEL COEFICIENTE DE PERDIDAS POR RADIACION ENTRE EL TUBO
%EXTERIOR Y EL AMBIENTE

Tprom_hr_ext=((Tc+T_ambk)/2);

h_rad_ext=(evidrio)*(sigma)*(4)*(Tprom_hr_ext^3); %cálculo del
coeficiente de pérdidas por radiación exterior del tubo al aire

h_comb_ext=(h_conv_ext+h_rad_ext); %coeficiente
combinado de pérdida del tubo al exterior

Q_p_1=h_comb_ext*A_ext_t2*(Tc-T_ambk); %cálculo
del calor perdido calculado del exterior

error_1=(Q_p-Q_p_1);

if (abs(error_1))<0.1 %error para mirar
si Tc si es la correcta
    break
end

end

%CALCULO DE LA TEMPERATURA EN LA PARTE INTERNA DEL TUBO EXTERNO
%"CONDUCCION y CONVECCION"

%[°K] cálculo de la temperatura de la pared interna del tubo
exterior
Tv=((Q_p)*(log((R_ext_t2)/(R_int_t2)))/(2*pi*k_vidrio*L_tubo))+Tc;

%CALCULO DEL CALOR DE PERDIDAS ASUMIDO SEGUN LA Tc Y LA Ts PARA
%VERIFICAR Ts YA QUE Tc YA SE CONFIRMO

Q_p_2=((pi*D_t1*L_tubo)*(sigma)*((Ts^4)-
(Tv^4)))/((1/emisi_capa_selec)+(((1-
evidrio)/(evidrio))*(R_t1/R_int_t2))));

error_2=(Q_p-Q_p_2);

if (abs(error_2))<2.0

    break

end
end

```

```

end

%AQUI SE TENDRAN QUE ALMACENAR LOS VECTORES DE LAS TEMPERATURAS Y
ENERGIAS
%PARA TENER UN REGISTRO.

tcv(i+1)=Tc;
tsv(i+1)=Ts;

Q_ia=(Q_incidente-Q_p)*18;

qiv(i+1)=Q_incidente*t_muestra*18;
qiav(i+1)=Q_ia*t_muestra;
qpv(i+1)=Q_p*t_muestra*18;

%CALCULO DE LA TEMPERATURA FINAL DEL TANQUE ASUMIENDO UNA INICIAL PARA EL
%PRIMER CALCULO DE 25°C Y ASUMINENDO UNA FINAL

V_tq_lit=193;           %[litros]   volumen del tanque lo puse de
50 pero en realidad son 198 litros OJO
V_agua_tq=(V_tq_lit/1000);   %[m3]       volumen de agua en el tanque
Rho_agua=997;           %[kg/m3]    densidad del agua a T de 25
porque a esta temperatura entra el agua
m_agua=V_agua_tq*Rho_agua;   %[kg]       masa de agua en el tanque

L_tq_ext=1.68;         %[m]       longitud del tanque exterior
L_tq_int=1.6;         %[m]       longitud del tanque en el interior
Cp_agua=4180;         %[J/kg*°K]   calor especifico del agua a 45°C

R_int_tq=0.19;        %radio interior del tanque
R_ext_fv=0.195;       %radio exterior de la fibra de vidrio
R_ext_lam1=0.1959;   %radio exterior de la lámina de acero 1
R_ext_pol=0.231;     %radio exterior de la espuma de poliuretano
R_ext_tq=0.24;       %radio exterior de la lámina de acero que protege el
tanque

A_lat_fv=((pi)*(R_ext_fv^2));   %área lateral exterior de la fibra de
vidrio
A_lat_lam1=((pi)*(R_ext_lam1^2)); %área lateral exterior de la lámina 1
A_lat_pol=((pi)*(R_ext_pol^2)); %área lateral exterior de la espuma
poliuretano
A_lat_tq=((pi)*(R_ext_tq^2));   %área lateral exterior del tanque

A_tq_ext=2*pi*R_ext_tq*L_tq_ext; %[m2]   área exterior del tanque
A_total_ext_tq=(A_tq_ext+(2*A_lat_tq)); %[m2]   área total del tanque
exterior incluido el cilindro y las tapas circulares exteriores

tftqv(1)=T_ambk;         %esto es solo para el primer cálculo de la Tfin

T_inic_tq=tftqv(i);     %temperatura inicial del agua en el tanque

```

```

if T_inic_tq<T_ambk

    T_inic_tq=T_ambk;

end

qptv(i)=((Q_ia*t_muestra*15)/(100));

T_fin_tq=((Q_ia*t_muestra-
((Q_ia*t_muestra*15)/(100)))/(m_agua*Cp_agua))+T_inic_tq)

T_prom_tq=((T_inic_tq+T_fin_tq)/2);    %[°K] temperatura promedio del
agua del tanque

U_pt=((Q_ia*15)/(100))*((1)/((A_total_ext_tq)*(T_prom_tq-T_ambk)))

tftqv(i+1)=T_fin_tq;

uptv(i)=U_pt;

    if U_pt<0

        break

    end

end

end

% ESTO ES PARA MIRAR COMO VARIO LA T FINAL DEL TANQUE Y EL CALOR
INCIDENTE
% ABSORVIDO Y MUESTRE LOS DOS VECTORES PERO AL FINAL DE TODO EL CALCULO
DE
% LOS 365 INSTANTES

%ESTO ES PARA CONVERTIR LOS VECTORES FILA EN VECTORES COLOMNA PARA PODER
%PASARLOS A EXCEL

qtv=qtv';    %energía TOTAL que llega a los 18 tubos para 18 tubos al
tiempo de muestra
tsv=tsv';    %temperatura de la superficie selectiva
tcv=tcv';    %temperatura del colector
qiv=qiv';    %energía TOTAL que llega a las 18 superficies selectivas
sin tener en cuenta las perdidas
qptv=qptv';    %calor de pérdidas del tanque
qiav=qiav';    %energía incidente absorbida en la sup selectiva para
los 18 tubos en el tiempo de muestra ya habiéndole restado las perdidas
qpv=qpv';    %energía perdida de los 18 tubos para el tiempo de
muestra
tftqv=tftqv';    %temperatura final del tanque
uptv=uptv';    %U de pérdidas del tanque aislado

```

```
%LINEAS DE CODIGO PARA IMPORTAR LOS DATOS ALMACENADOS EN LOS VECTORES DE
%MATLABA HACIA EXCEL
```

```
xlswrite('DATOS_ALMACENADOS_DISEÑO.xlsx',qtv,'Hoja5','C2');
xlswrite('DATOS_ALMACENADOS_DISEÑO.xlsx',qiv,'Hoja5','D2');
xlswrite('DATOS_ALMACENADOS_DISEÑO.xlsx',qiav,'Hoja5','E2');
xlswrite('DATOS_ALMACENADOS_DISEÑO.xlsx',qpv,'Hoja5','F2');
xlswrite('DATOS_ALMACENADOS_DISEÑO.xlsx',qptv,'Hoja5','G2');
xlswrite('DATOS_ALMACENADOS_DISEÑO.xlsx',uptv,'Hoja5','H2');
xlswrite('DATOS_ALMACENADOS_DISEÑO.xlsx',tftqv,'Hoja5','I2');
```

CÓDIGO DEL MODELO MATEMÁTICO DEL COMPORTAMIENTO NOCTURNO DE LA TEMPERATURA AL INTERIOR DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO DEL SISTEMA SOLAR TÉRMICO EN MATLAB

```
for i=1:1:900 %NUMERO DE DATOS EN QUE SE LLEVO A CABO LA PRUEBA 900
MINUTOS
T_ambk=18+273; %temperatura ambiente de la noche constante asumido
18°C

V_tq_lit=198; %[litros] volumen del tanque
V_agua_tq=(V_tq_lit/1000); %[m3] volumen de agua en el tanque
Rho_agua=997; %[kg/m3] densidad del agua a T de 25
porque a esta temperatura entra el agua
m_agua=V_agua_tq*Rho_agua; %[kg] masa de agua en el tanque

Cp_agua=4180; %[J/kg*°K] calor especifico del agua a 45°C
U_t=0.4066; %Coeficiente global de perdidas calculado a partir de
la geometría del tanque
A_t=2.89; %Area total del tanque

tiempo=60*i; %Cálculos cada 1 minuto

T_fv(1)=47+273; %Temperatura del agua en el tanque para iniciar
calculos

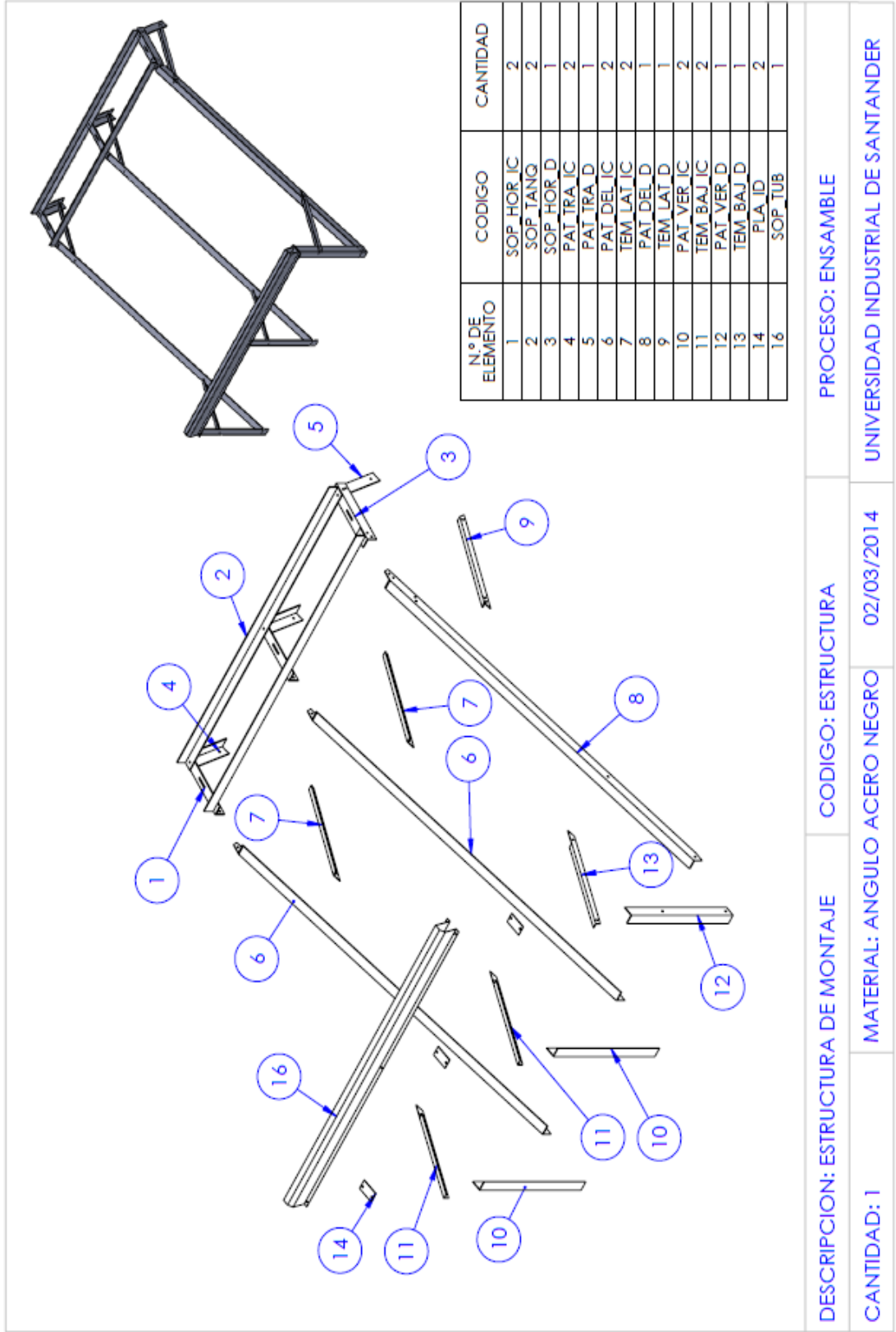
T_i=T_fv(i); %Temperatura del agua en el tanque inicial

%CALCULO DE LA TEMPERATURA FINAL DEL AGUA EN EL TANQUE PARA CADA CICLO DE
%DATOS
T_f=((T_i)-
(T_ambk))/(exp(((U_t)*(A_t)*(tiempo))/((m_agua)*(Cp_agua)))))+T_ambk
T_fv(i)=T_f;

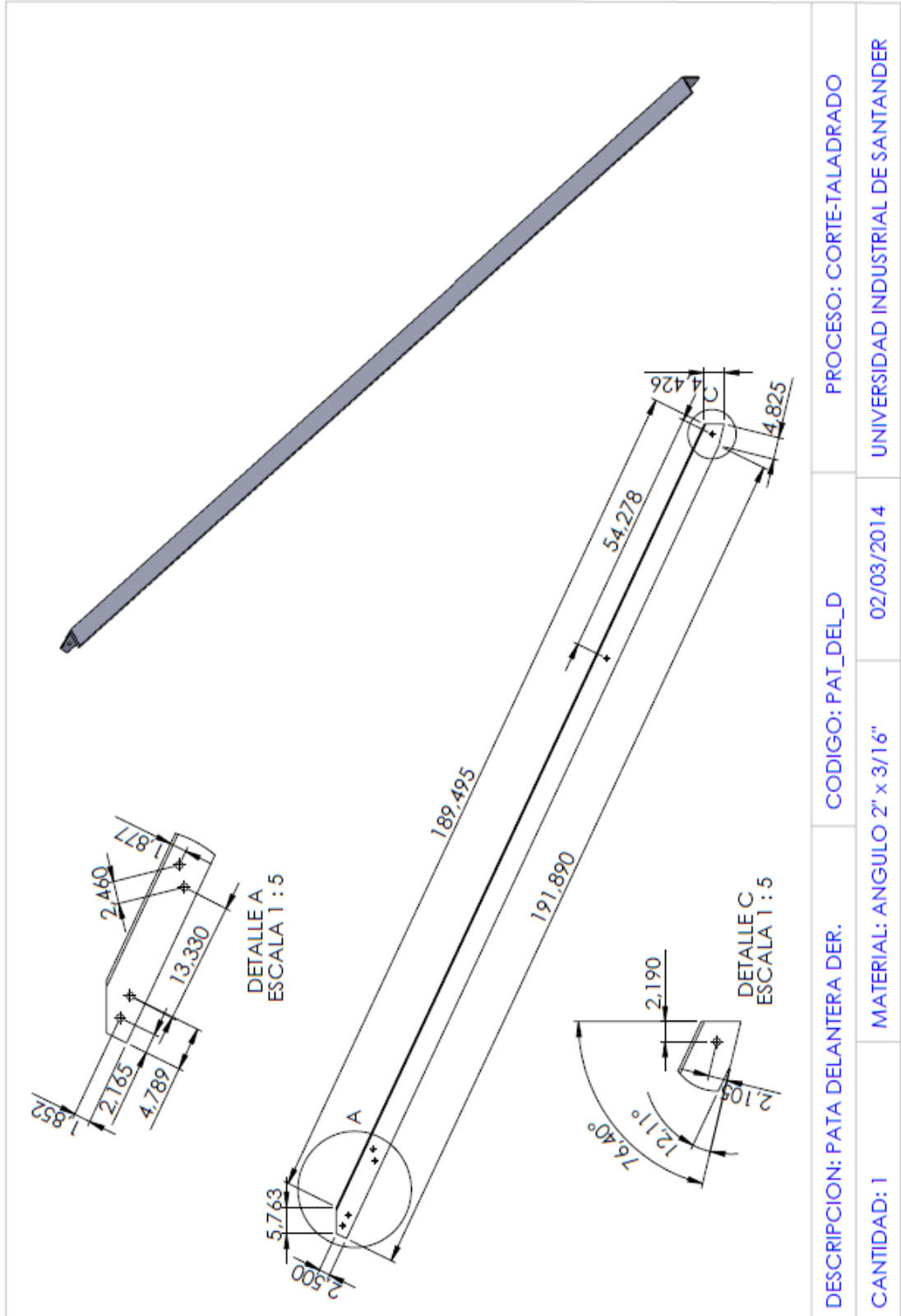
end

%CAMBIAR EL VECTOR FILA POR UN VECTOR COLUMNNA
T_fv=T_fv';
%ESCRIBIR DATOS ALMACENADOS DE LOS VECTORE EN EXCEL
xlswrite('grafica_enfriamiento.xlsx',T_fv,'Hojal','C2');
```

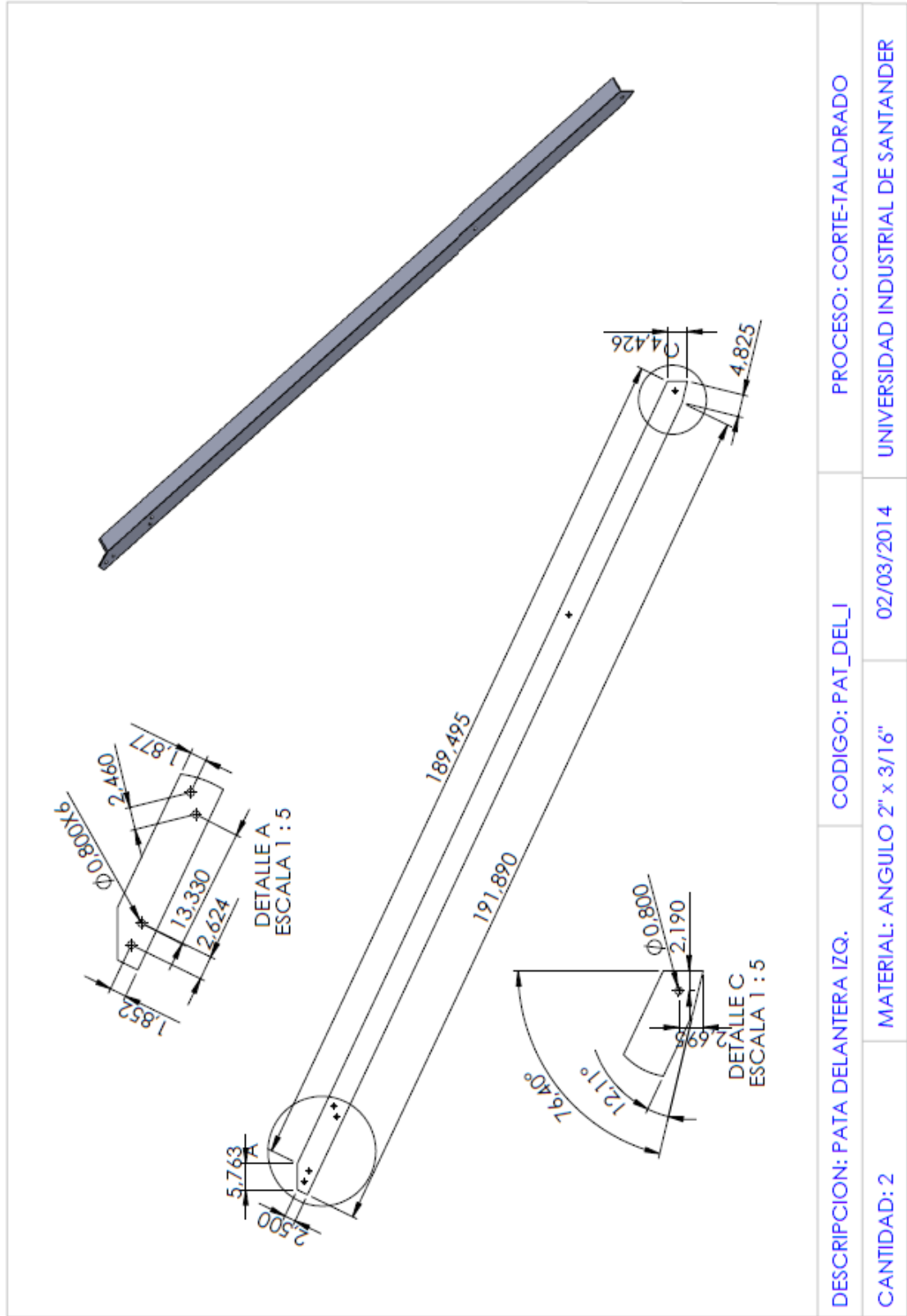
ANEXO B
PLANOS DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO DE AGUA ASISTIDO POR
ENERGÍA SOLAR

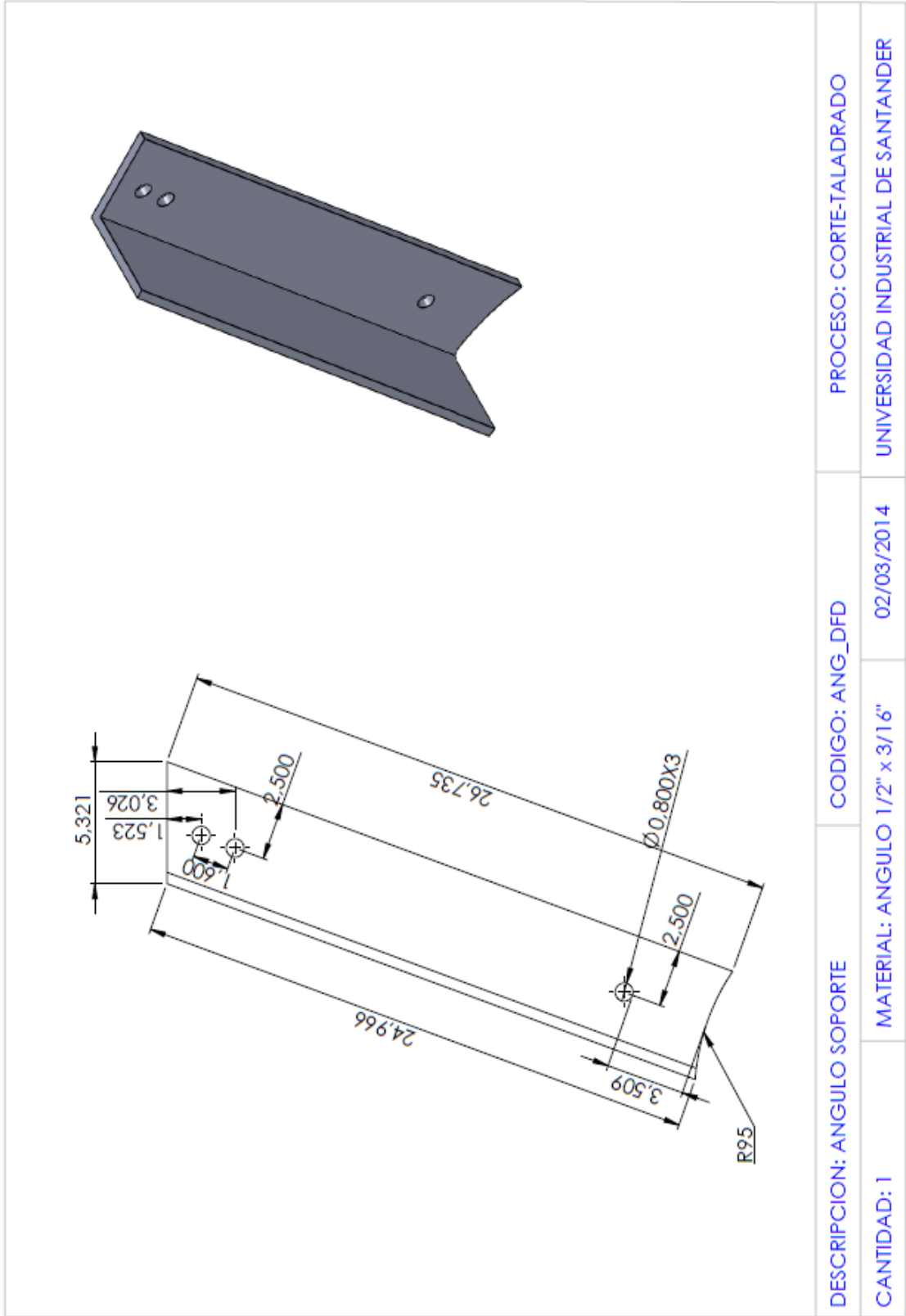


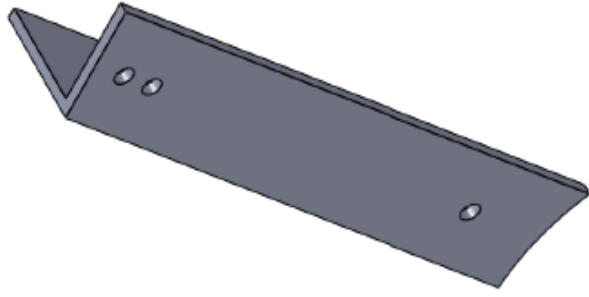
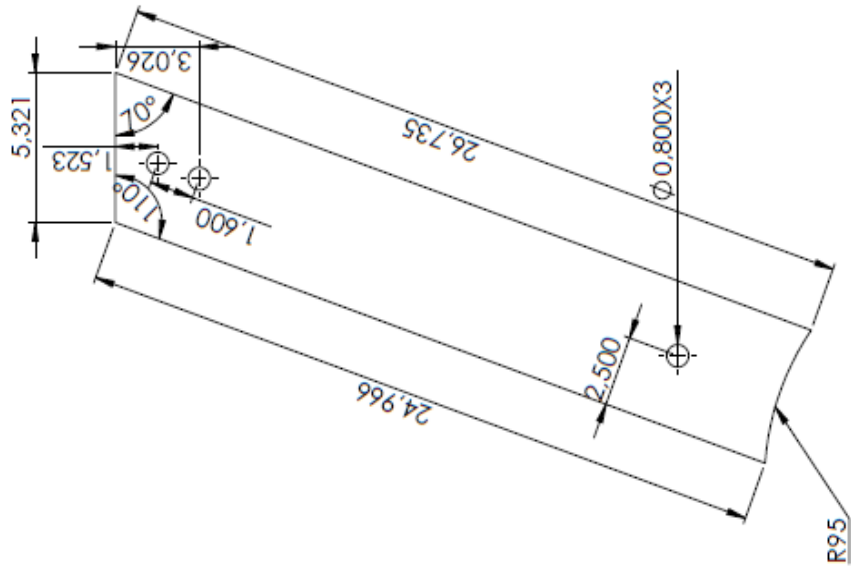
DESCRIPCION: ESTRUCTURA DE MONTAJE	CODIGO: ESTRUCTURA	PROCESO: ENSAMBLE
CANTIDAD: 1	MATERIAL: ANGULO ACERO NEGRO	02/03/2014
		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER



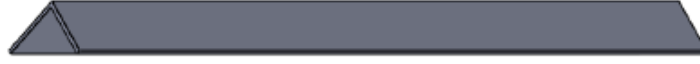
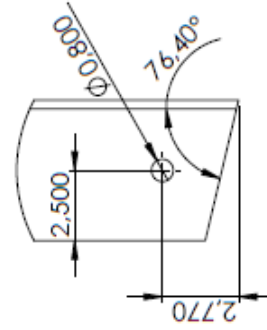
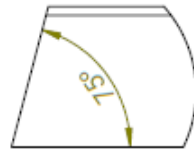
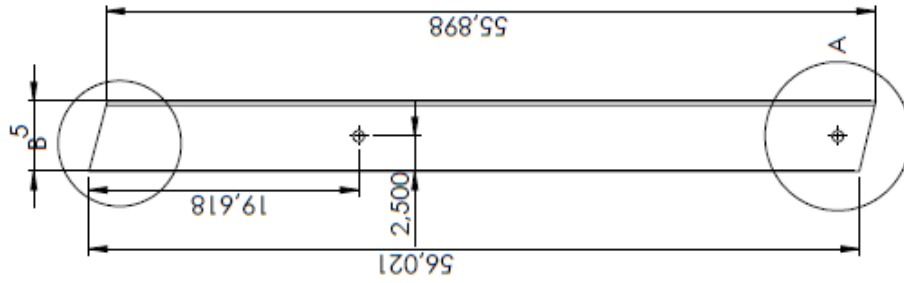
DESCRIPCION: PATA DELANTERA DER.	CODIGO: PAT_DEL_D	PROCESO: CORTE-TALADRADO
CANTIDAD: 1	MATERIAL: ANGULO 2" x 3/16"	02/03/2014
		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER







DESCRIPCION: TAPA TRASERA SOPORTE IZQ.	CODIGO: PAT_TRA_IC	PROCESO: CORTE-TALADRADO
CANTIDAD: 2	MATERIAL: ANGULO 2" x 3/16"	02/03/2014
		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER



DESCRIPCION: PATA VERTICAL DER.

CODIGO: PAT_VER_D

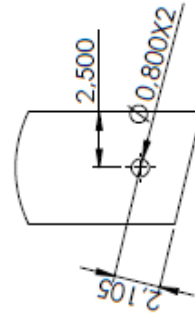
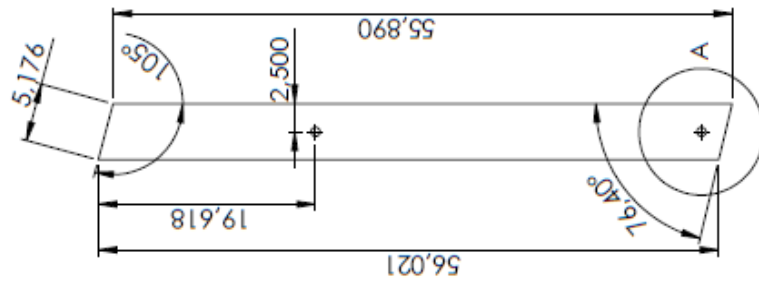
PROCESO: CORTE-TALADRADO

CANTIDAD: 1

MATERIAL: ANGULO 2" x 3/16"

02/03/2014

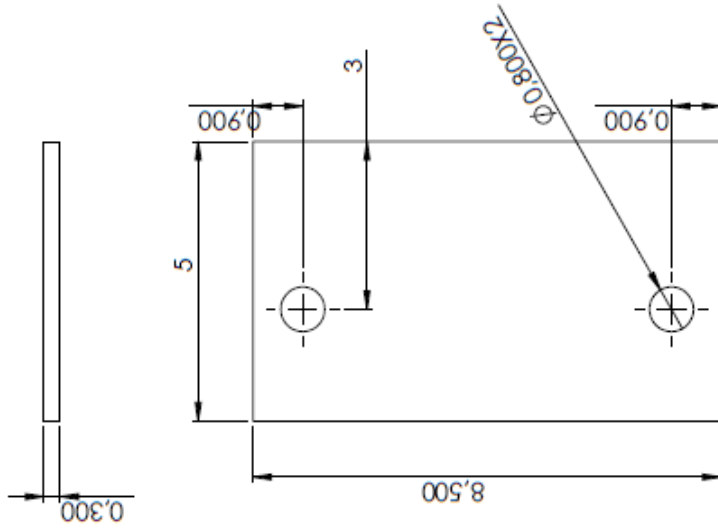
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER



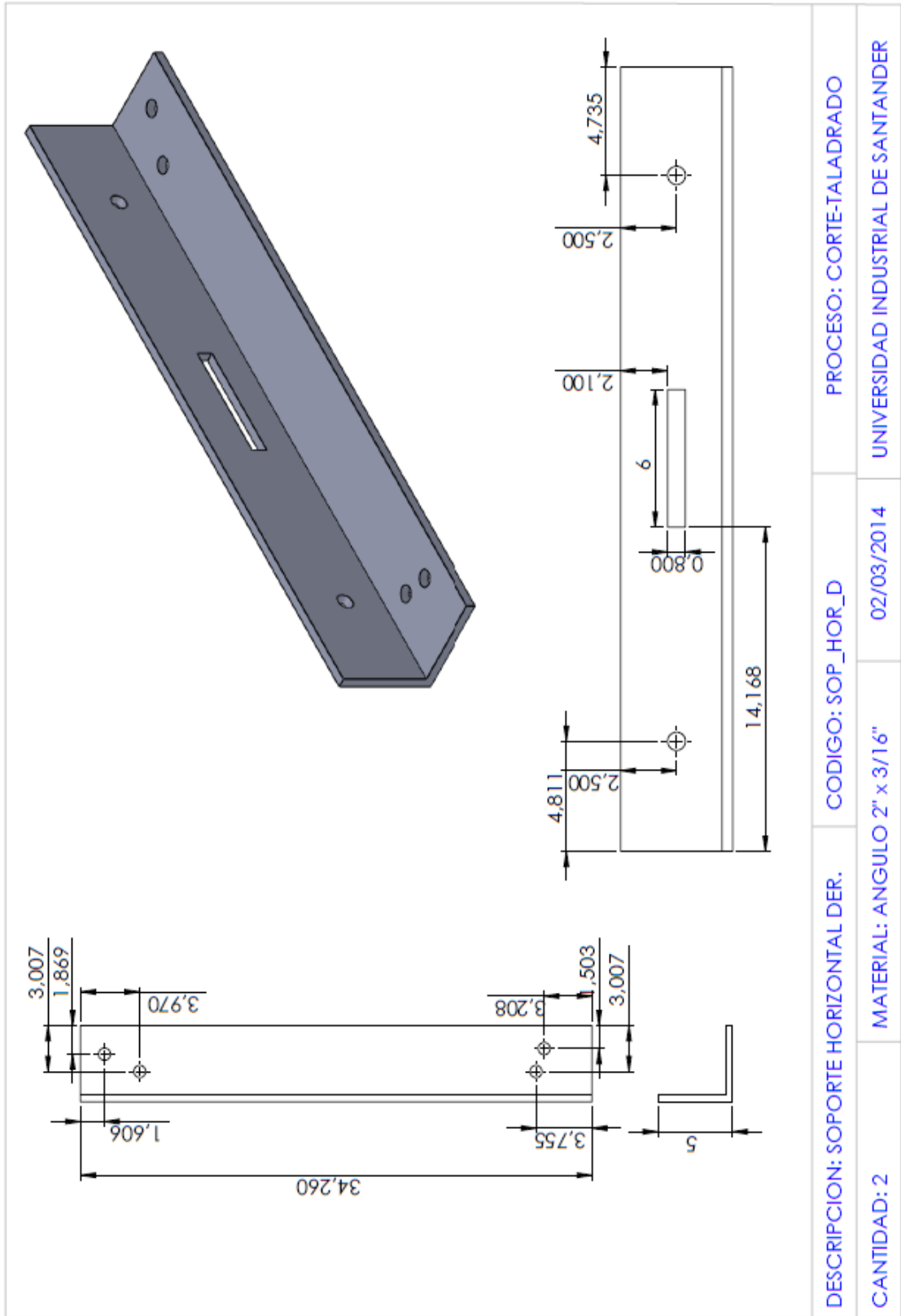
DETALLE A
ESCALA 2 : 5

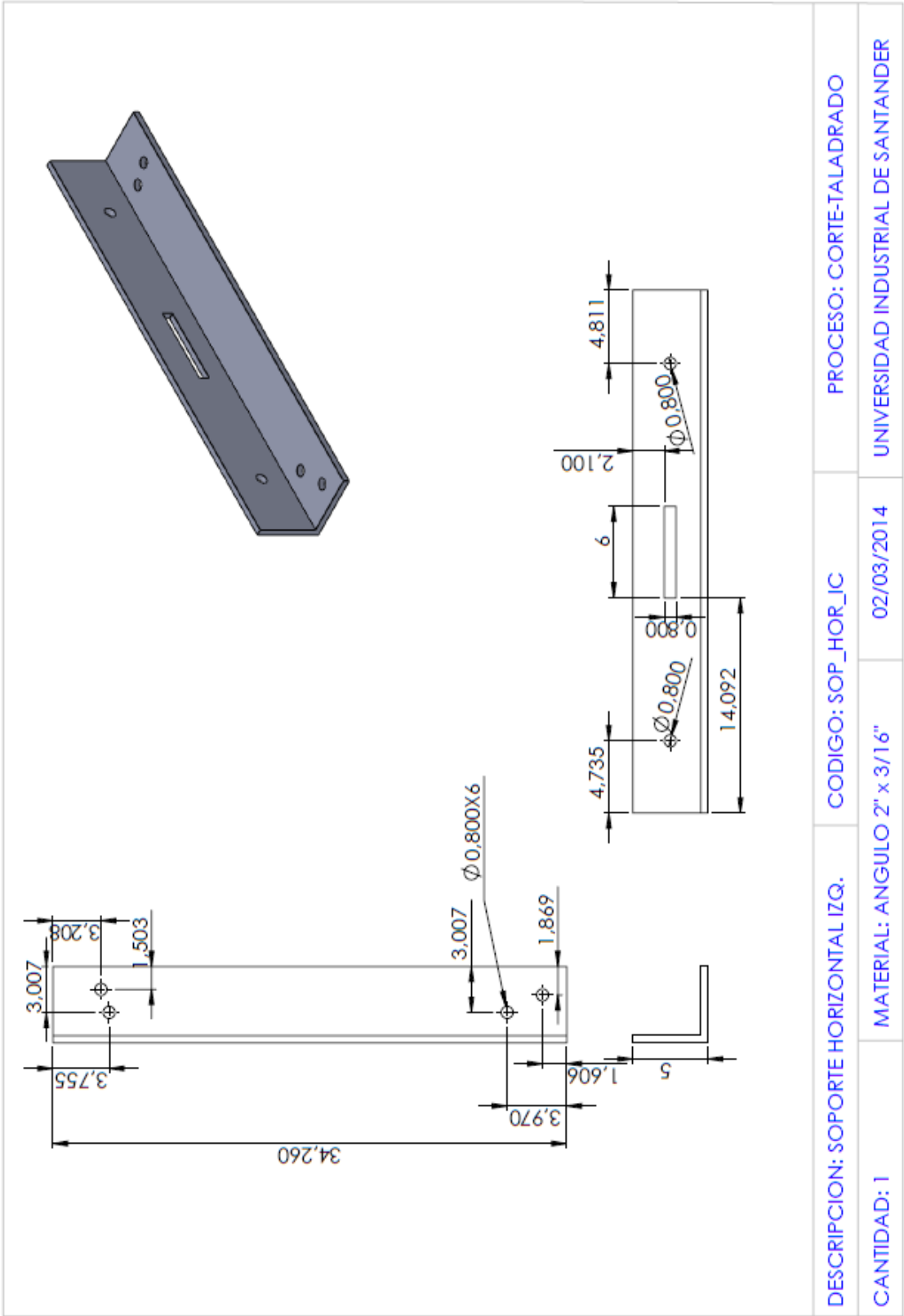
DESCRIPCION: PATA VERTICAL DELANERA IZQ. CODIGO: PAT_VER_JC PROCESO: CORTE-TALADRADO

CANTIDAD: 2 MATERIAL: ANGULO 2" x 3/16" 02/03/2014 UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

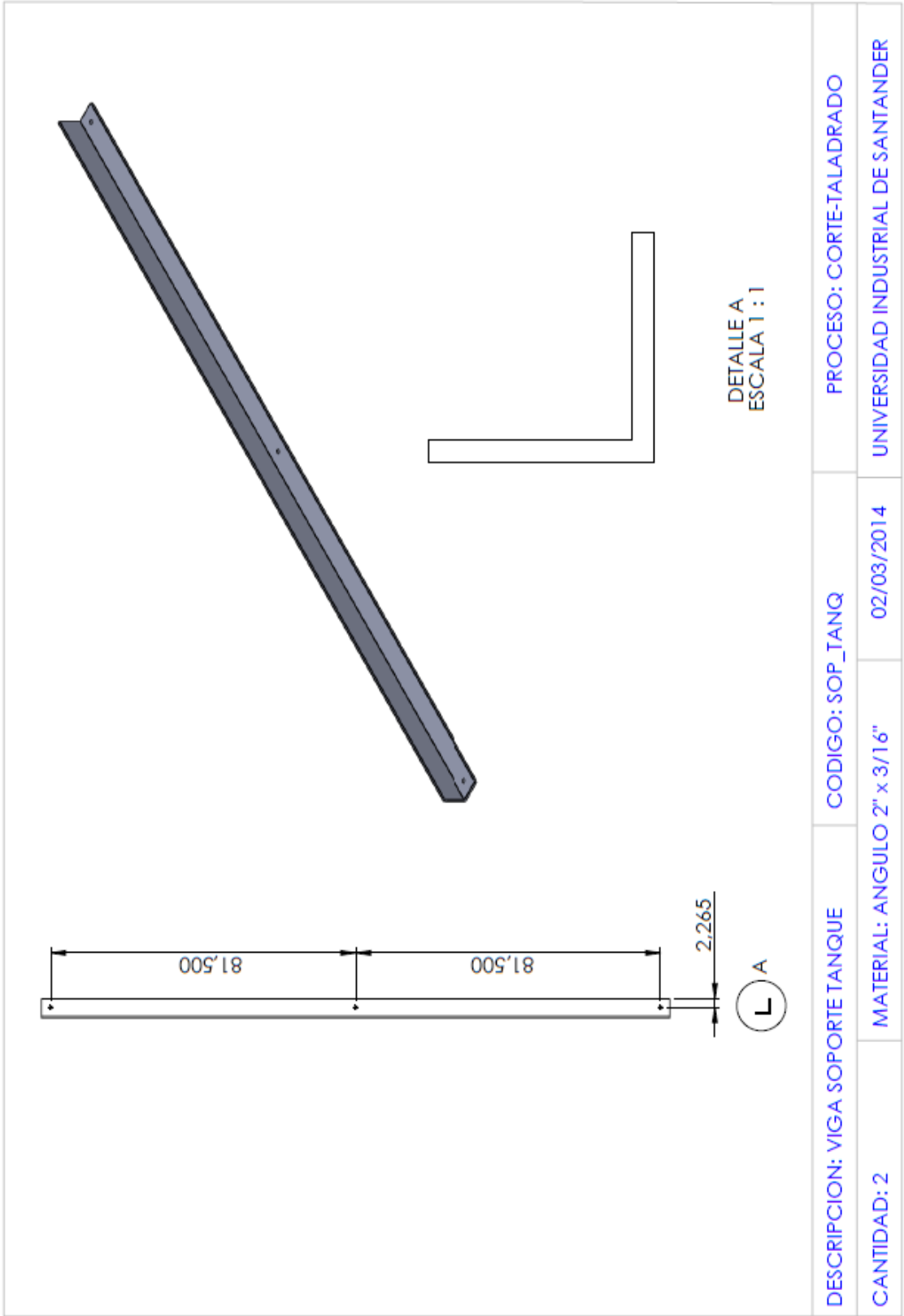


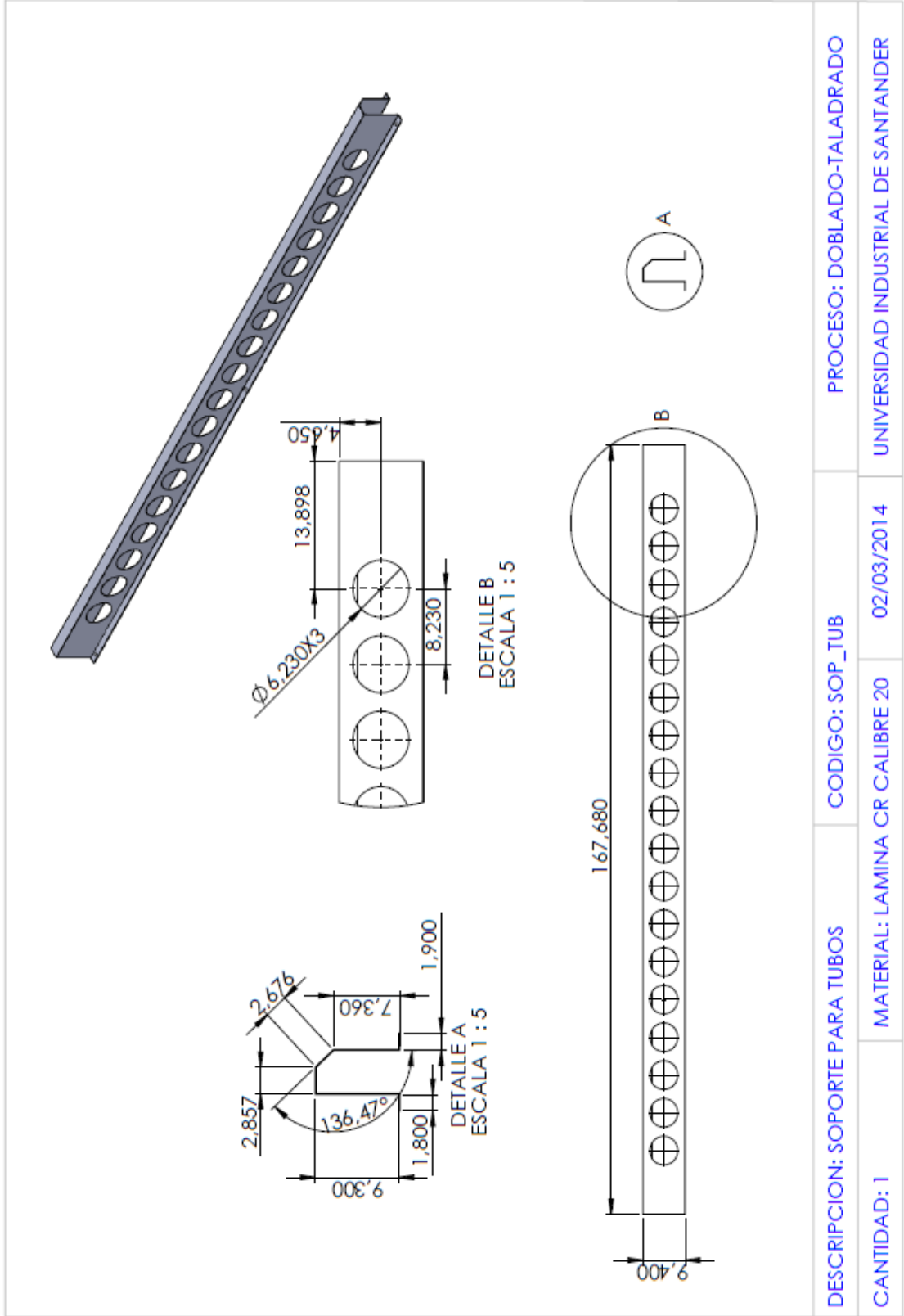
DESCRIPCION: CALZA DE SOPORTE	CODIGO: ANG_DFD	PROCESO: CORTE-TALADRADO
CANTIDAD: 3	MATERIAL: PLATINA 2" x 1/8"	02/03/2014
		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

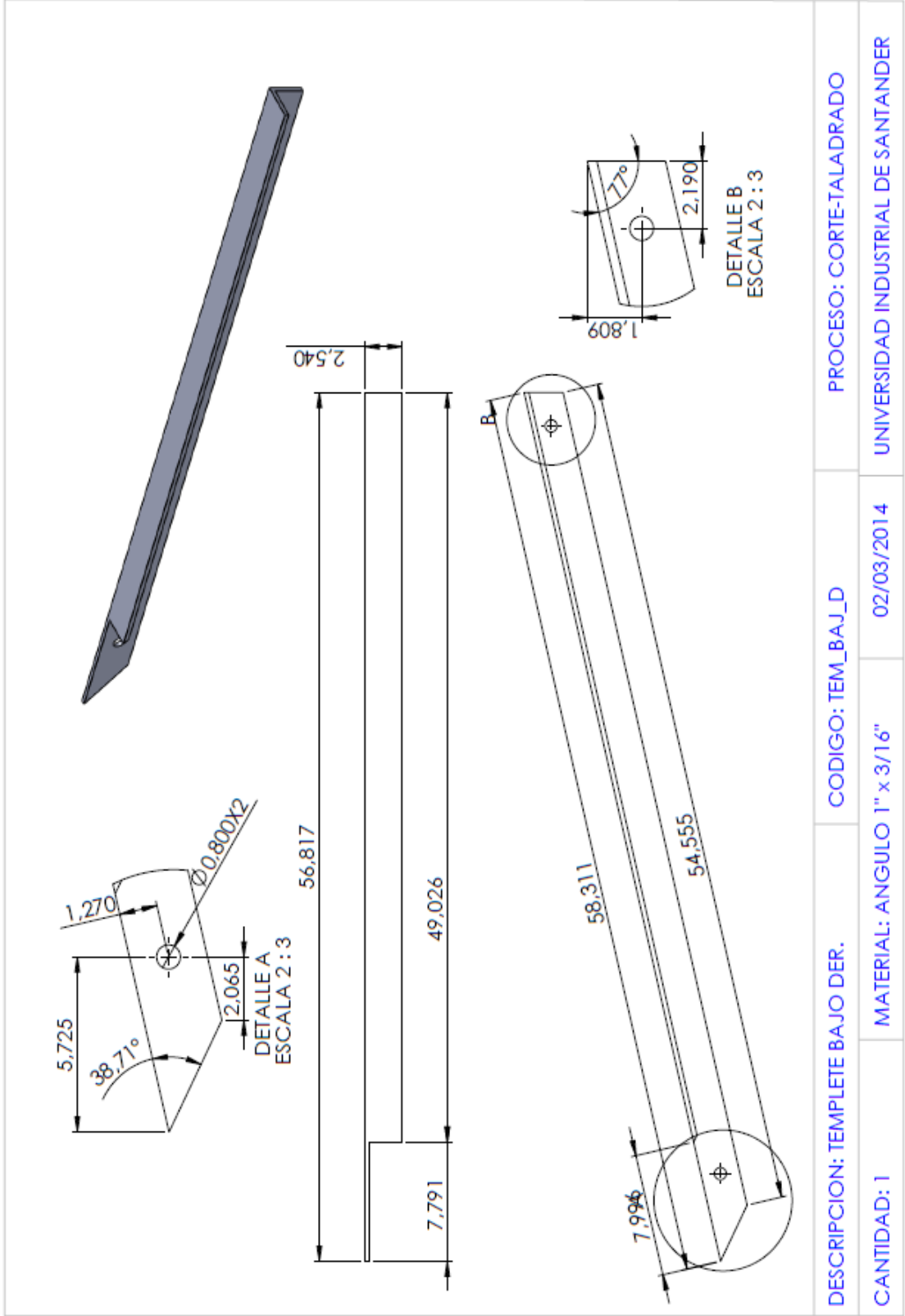


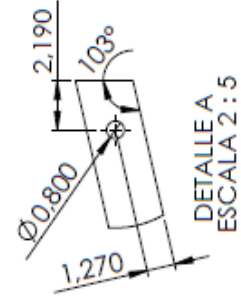
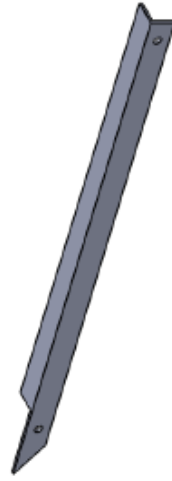
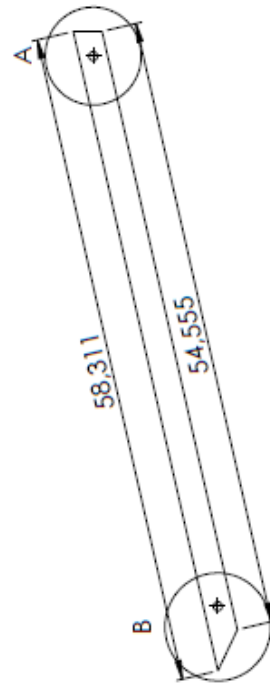
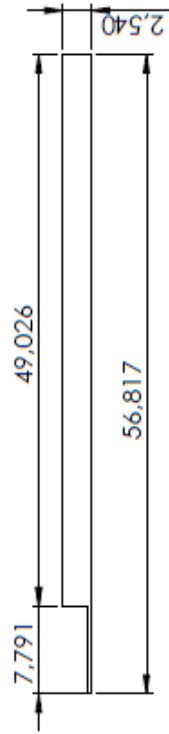
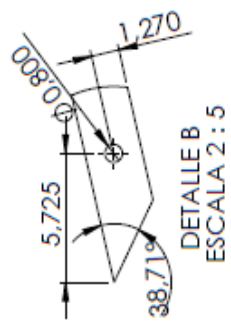


DESCRIPCION: SOPORTE HORIZONTAL IZQ.	CODIGO: SOP_HOR_IC	PROCESO: CORTE-TALADRADO
CANTIDAD: 1	MATERIAL: ANGULO 2" x 3/16"	02/03/2014
		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

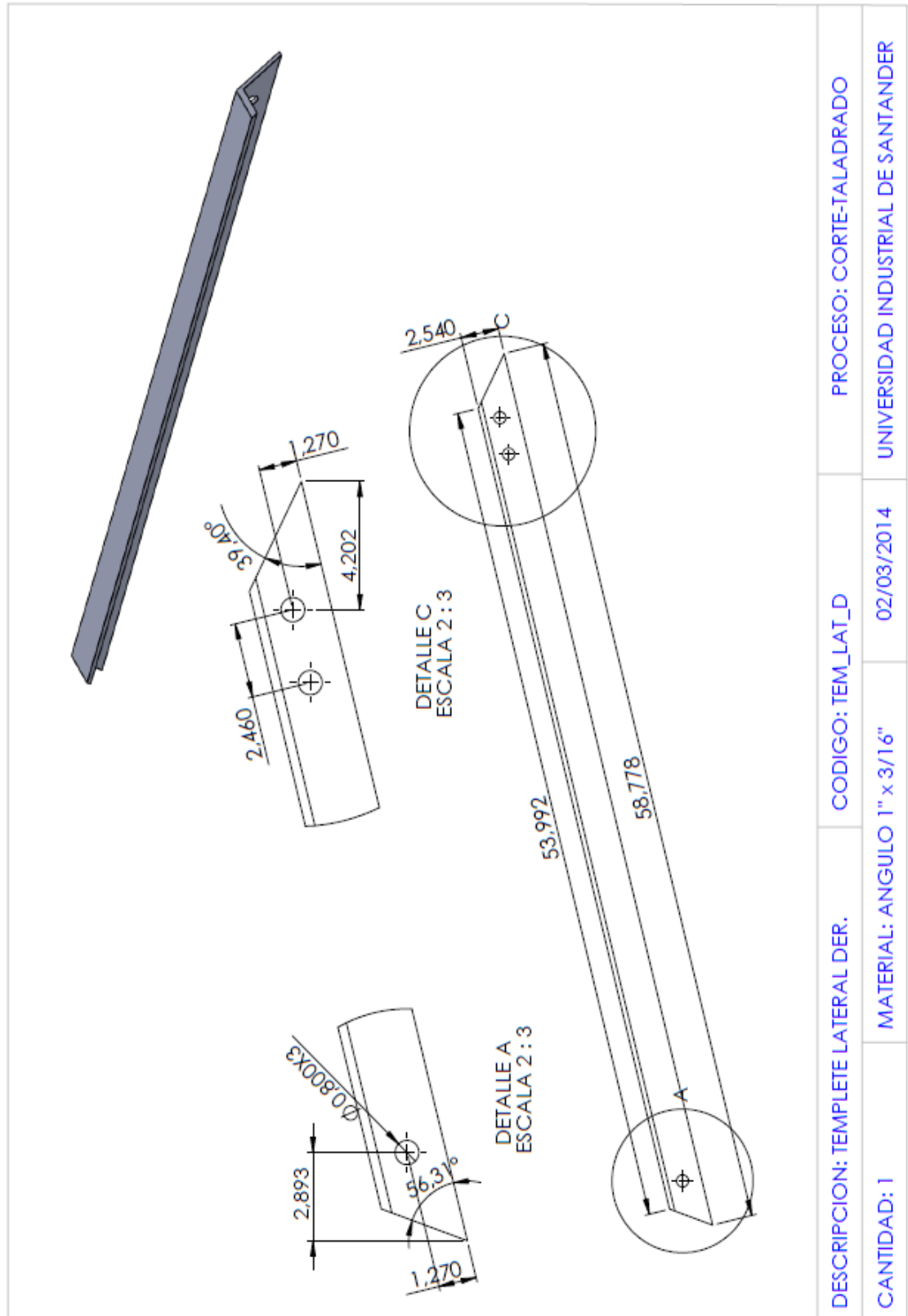




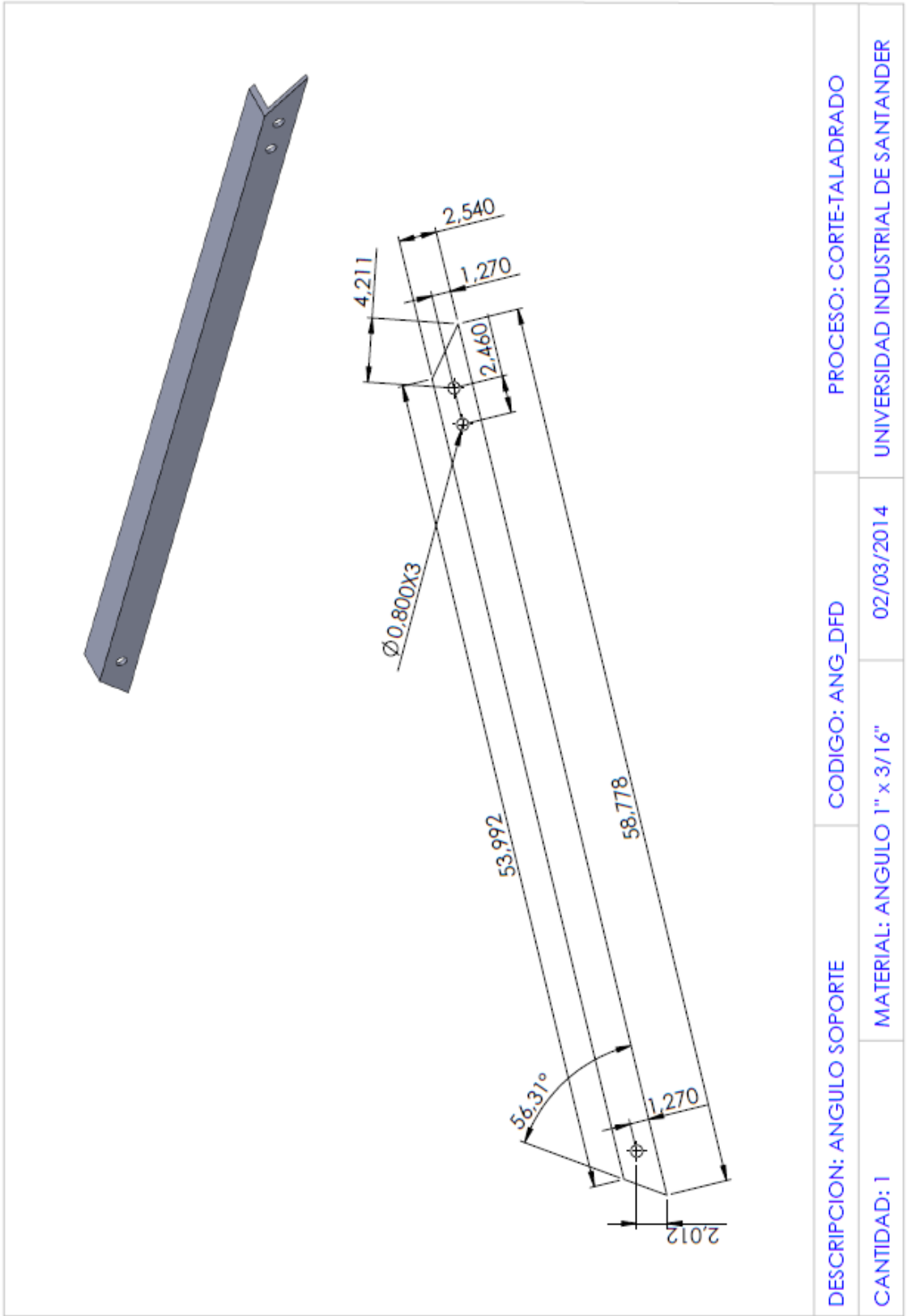




DESCRIPCION: TEMPLATE PARTE BAJA IZQ.	CODIGO: TEM_BAJ_IC	PROCESO: CORTE-TALADRADO
CANTIDAD: 2	MATERIAL: ANGULO 1" x 3/16"	02/03/2014
		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER



DESCRIPCION: TEMPLETE LATERAL DER.	CODIGO: TEM_LAT_D	PROCESO: CORTE-TALADRADO
CANTIDAD: 1	MATERIAL: ANGULO 1" x 3/16"	02/03/2014
		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER



DESCRIPCION: ANGULO SOPORTE	CODIGO: ANG_DFD	PROCESO: CORTE-TALADRADO
CANTIDAD: 1	MATERIAL: ANGULO 1" x 3/16"	02/03/2014
		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

ANEXO C
DATOS ALMACENADOS POR MEDIO DEL SISTEMA DE MONITOREO Y CONTROL

Cuadro 15. Datos registrados de la prueba de estancamiento

HORA	Radiación Total [W/m ²]	Radiación Difusa [W/m ²]	Temperatura de Entrada [°C]	Temperatura de Salida [°C]	Temperatura Interna del Tanque [°C]	Temperatura Ambiente [°C]
7:27:09	282.26	34.7	17.69	18.09	21.33	18.75
7:29:25	290.89	34.95	17.88	18.16	21.49	18.69
7:31:41	305.25	36.19	18.28	18.22	21.55	18.65
7:33:56	313.09	36.69	18.5	18.37	21.83	19.06
7:36:12	325.11	37.43	18.75	18.62	22.2	18.87
7:38:28	329.29	37.43	19.15	18.72	22.33	19.34
7:40:44	340.78	37.68	19.93	18.84	22.33	19.4
7:43:00	348.88	38.68	20.62	18.93	22.33	19.18
7:45:15	357.24	38.93	21.3	19.03	22.51	19.18
7:47:31	370.3	39.67	22.08	19.21	22.92	18.69
7:49:47	386.5	40.67	22.73	19.09	22.92	19.18
7:52:03	394.07	44.15	23.76	19.4	23.29	20.37
7:54:19	398.51	42.41	24.57	19.43	23.29	19.9
7:56:34	408.96	43.4	25.28	19.59	23.51	19.62
7:58:50	431.95	44.15	26	19.77	23.6	20.12
8:01:06	449.45	44.65	26.62	19.96	23.85	20.93
8:03:22	446.06	44.65	27.03	20.05	23.95	20.62
8:05:38	517.38	53.1	27.46	20.3	24.23	21.33
8:07:53	211.73	33.7	28.02	20.68	24.72	21.46
8:10:09	535.92	68.77	27.96	20.58	24.6	21.02
8:12:25	564.66	72.75	27.96	20.58	24.6	21.74
8:14:41	500.13	67.78	28.27	20.8	24.88	22.23
8:16:57	494.65	69.77	28.52	21.21	25.22	22.27
8:19:12	179.86	54.1	28.27	21.58	25.47	21.52
8:21:28	572.23	71.01	27.81	21.46	25.56	21.49
8:23:44	564.66	62.8	27.71	21.67	25.78	21.46
8:26:00	563.35	70.76	27.71	21.55	25.84	22.05
8:28:16	570.41	73.75	28.02	21.83	26.09	22.17
8:30:31	568.05	64.05	28.3	21.77	26.37	22.33
8:32:47	570.14	64.79	28.55	21.89	26.62	22.36
8:35:03	569.62	60.81	28.9	21.89	26.62	22.79
8:37:19	574.32	56.34	29.21	22.39	27.06	22.45
8:39:35	582.42	52.85	29.27	22.64	27.37	22.08
8:41:50	581.64	51.36	29.21	22.51	27.49	22.33
8:44:06	599.14	54.1	29.27	22.51	27.74	22.23
8:46:22	609.85	51.61	29.58	22.76	27.96	22.42
8:48:38	602.02	48.38	29.36	22.64	28.18	21.7
8:50:54	631.27	51.11	29.74	22.7	28.34	22.36
8:53:09	631.27	52.85	29.64	22.64	28.37	22.98
8:55:25	642.77	51.61	29.8	23.32	28.93	22.86
8:57:41	653.48	52.61	29.55	23.63	29.21	22.7

Fuente: Autores

Cuadro 15. Datos registrados de la prueba de estancamiento (Continuación)

HORA	Radiación Total [W/m ²]	Radiación Difusa [W/m ²]	Temperatura de Entrada [°C]	Temperatura de Salida [°C]	Temperatura Interna del Tanque [°C]	Temperatura Ambiente [°C]
8:59:57	663.14	53.35	29.3	23.45	29.36	22.76
9:02:13	662.1	55.34	29.67	23.32	29.42	23.35
9:04:28	671.5	53.35	29.74	23.48	29.67	23.85
9:06:44	679.08	52.85	29.74	23.48	29.86	24.1
9:09:00	683	53.35	30.33	23.6	30.27	23.85
9:11:16	685.61	53.1	30.36	23.85	30.55	21.64
9:13:32	696.32	52.61	30.36	23.73	30.64	23.11
9:15:47	705.46	56.83	30.14	23.76	30.76	23.73
9:18:03	710.95	59.07	30.48	24.2	31.14	23.79
9:20:19	719.57	58.33	30.39	23.95	31.29	23.63
9:22:35	720.62	60.07	30.39	24.01	31.45	24.54
9:24:51	726.36	60.56	32.44	23.95	31.63	24.38
9:27:06	732.63	61.81	34.03	24.51	32.1	24.91
9:29:22	740.73	59.57	34.09	24.51	32.35	24.85
9:31:38	756.14	62.06	32.85	24.54	32.54	24.2
9:33:54	768.42	66.53	32.41	24.69	32.94	24.51
9:36:10	793.24	70.02	32.13	24.54	32.97	24.72
9:38:25	823.02	79.22	32.1	24.88	33.16	25.41
9:40:41	835.56	89.42	31.88	24.97	33.35	25.66
9:42:57	859.59	93.4	31.63	25.07	33.63	26
9:45:13	877.88	97.13	31.85	25.6	34.03	25.56
9:47:29	894.34	94.14	31.51	25.63	34.41	26
9:49:44	941.62	101.35	31.29	25.81	34.56	25.78
9:52:00	903.74	103.34	30.89	25.66	34.78	26.41
9:54:16	917.59	105.09	31.23	25.78	35	26.19
9:56:32	904.26	99.61	31.11	25.94	35.25	26.53
9:58:48	903.74	110.81	31.11	26.47	35.81	26.41
10:01:03	888.85	93.89	30.76	26.41	35.9	25.81
10:03:19	881.54	88.67	30.51	26.13	36.05	26.16
10:05:35	903.48	84.19	31.01	26.65	36.71	26.84
10:07:51	890.42	81.21	30.7	26.28	36.65	25.84
10:10:07	885.72	84.69	30.7	26.53	36.8	26.56
10:12:22	911.06	82.7	30.79	26.93	37.3	26.65
10:14:38	932.48	92.4	30.64	27	37.52	25.81
10:16:54	963.83	102.35	30.3	26.56	37.74	24.94
10:19:10	952.59	100.61	30.27	26.28	37.86	25.25
10:21:26	971.4	84.94	30.67	26.41	38.3	24.29
10:23:41	988.12	84.69	30.51	26.16	38.45	24.66
10:25:57	916.54	90.91	30.64	26.34	38.79	24.57
10:28:13	287.23	68.52	30.55	26.28	39.04	24.01
10:30:29	848.36	98.12	30.55	26	38.92	23.91

Fuente: Autores

Cuadro 15. Datos registrados de la prueba de estancamiento (Continuación)

HORA	Radiación Total [W/m ²]	Radiación Difusa [W/m ²]	Temperatura de Entrada [°C]	Temperatura de Salida [°C]	Temperatura Interna del Tanque [°C]	Temperatura Ambiente [°C]
10:32:45	523.38	89.17	30.3	25.97	39.11	24.51
10:35:00	313.35	53.1	30.33	26.13	39.63	24.51
10:37:16	261.1	43.65	30.64	26.34	39.98	22.79
10:39:32	226.88	38.68	30.48	25.94	39.88	22.27
10:41:48	320.4	40.67	30.2	25.28	39.76	22.42
10:44:04	175.16	35.19	30.76	25.63	39.95	22.51
10:46:19	426.2	44.4	30.45	25.38	39.85	22.36
10:48:35	281.48	37.68	30.02	24.97	39.76	22.73
10:50:51	922.29	67.28	30.02	24.79	39.76	23.54
10:53:07	914.97	68.03	29.92	24.88	39.98	23.82
10:55:23	924.64	70.76	29.42	24.79	40.13	24.04
10:57:38	925.42	70.76	29.42	24.97	40.54	24.79
10:59:54	930.13	68.52	29.61	25.35	40.79	24.32
11:02:10	923.59	67.78	29.64	25.38	40.97	25.07
11:04:26	918.89	71.01	29.8	25.6	41.16	24.41
11:06:42	807.87	64.05	29.67	25.63	41.44	25.47
11:08:57	940.31	71.51	29.77	25.97	41.53	25.81
11:11:13	966.44	72.75	29.95	26.09	41.84	25.41
11:13:29	513.46	59.07	30.02	26.37	42.22	25.66
11:15:45	207.55	45.64	30.36	26.47	42.5	24.57
11:18:01	284.62	53.1	30.3	26.31	42.53	23.73
11:20:16	991.52	89.42	29.83	25.81	42.25	24.69
11:22:32	985.77	85.69	29.67	25.91	42.5	25.53
11:24:48	964.87	73	29.74	26.13	42.75	25.72
11:27:04	971.4	72.75	29.95	26.34	43.18	25.04
11:29:20	958.86	69.52	29.95	26.28	43.46	24.94
11:31:35	983.16	69.77	29.61	26.09	43.59	24.66
11:33:51	992.82	69.52	29.55	26.75	44.05	25.81
11:36:07	1015.81	68.27	29.36	26.41	44.21	25.47
11:38:23	674.64	58.08	29.42	26.34	44.46	24.51
11:40:39	958.86	69.77	29.24	26.19	44.74	24.69
11:42:54	220.35	37.43	29.18	26.16	44.86	24.41
11:45:10	169.93	31.46	29.46	26.41	45.08	23.6
11:47:26	319.88	38.18	29.21	25.97	44.96	23.67
11:49:42	281.74	48.13	28.86	25.78	44.86	24.38
11:51:58	205.98	34.7	28.9	25.94	45.14	23.79
11:54:13	344.7	41.66	28.58	25.47	44.86	24.32
11:56:29	277.04	38.18	28.3	25.44	44.96	24.6
11:58:45	1012.41	72.01	27.96	25.35	44.96	24.91
12:01:01	1044.29	75.99	27.84	25.41	45.08	25.56
12:03:17	738.9	57.58	28.09	25.6	45.42	26.28

Fuente: Autores

Cuadro 15. Datos registrados de la prueba de estancamiento (Continuación)

HORA	Radiación Total [W/m ²]	Radiación Difusa [W/m ²]	Temperatura de Entrada [°C]	Temperatura de Salida [°C]	Temperatura Interna del Tanque [°C]	Temperatura Ambiente [°C]
12:05:32	593.66	47.88	28.4	25.91	45.67	26.34
12:07:48	958.6	64.79	28.49	26	45.8	26.09
12:10:04	996.22	65.04	28.37	26.13	46.08	26.47
12:12:20	608.55	44.89	28.71	26.56	46.55	25.35
12:14:36	965.39	61.06	28.86	26.41	46.76	25.04
12:16:51	893.03	57.83	28.83	26.37	46.83	25.75
12:19:07	853.32	57.33	28.86	26.56	46.98	25.91
12:21:23	934.83	63.05	29.02	26.53	47.26	25.78
12:23:39	928.3	66.28	28.93	26.62	47.48	25.75
12:25:55	203.89	28.23	29.21	26.87	47.73	25.63
12:28:10	505.1	42.16	29.55	26.9	48.13	24.6
12:30:26	667.32	52.61	29.3	26.53	47.98	24.88
12:32:42	963.83	66.04	29.18	26.37	47.88	25.53
12:34:58	920.46	84.19	29.02	26.53	48.16	26.13
12:37:14	953.11	78.72	28.74	26.5	48.26	26.19
12:39:29	940.05	64.79	31.11	26.9	48.6	25.94
12:41:45	900.61	65.79	31.11	26.93	48.79	25.56
12:44:01	829.81	64.3	31.14	27.03	49.07	26.03
12:46:17	907.92	60.81	30.86	27.09	49.38	24.69
12:48:33	879.19	57.83	30.39	27.03	49.5	25.53
12:50:48	859.07	54.35	30.17	26.93	49.66	25.47
12:53:04	854.63	54.1	30.14	27.06	49.91	25.1
12:55:20	857.76	56.09	30.08	26.93	50.09	25.25
12:57:36	856.2	57.08	29.86	27.03	50.28	25.44
12:59:52	864.29	56.58	29.55	27.09	50.41	26
13:02:07	847.58	55.84	29.74	27.06	50.5	26.16
13:04:23	840	60.32	29.95	27.25	50.81	25.75
13:06:39	903.22	69.77	30.02	27.25	51.15	25.38
13:08:55	888.85	67.53	30.02	27.21	51.28	25.66
13:11:11	841.04	65.29	29.83	27.09	51.43	25.6
13:13:26	571.97	55.59	30.3	27.37	51.81	25.63
13:15:42	864.56	71.01	30.11	27.12	51.81	24.57
13:17:58	750.4	92.65	29.77	26.93	51.84	24.94
13:20:14	975.32	89.42	32.57	27.12	51.9	25.84
13:22:30	874.74	63.3	31.98	27.18	52.15	26.09
13:24:45	832.95	64.79	32.16	27.25	52.46	25.07
13:27:01	219.57	31.46	32.32	27.43	52.83	24.51
13:29:17	782.79	53.6	31.85	27.09	52.86	23.63
13:31:33	804.73	60.07	31.57	26.65	52.86	24.57
13:33:49	791.67	57.08	31.63	26.56	52.8	25.81
13:36:04	781.74	55.59	31.88	26.65	53.08	25.66

Fuente: Autores

Cuadro 15. Datos registrados de la prueba de estancamiento (Continuación)

HORA	Radiación Total [W/m ²]	Radiación Difusa [W/m ²]	Temperatura de Entrada [°C]	Temperatura de Salida [°C]	Temperatura Interna del Tanque [°C]	Temperatura Ambiente [°C]
13:38:20	778.61	56.58	32.1	26.75	53.21	26.09
13:40:36	785.66	61.31	32.1	26.9	53.39	26.22
13:42:52	789.06	62.31	32.38	27.37	53.8	25.22
13:45:08	714.08	53.35	32.41	27.37	54.02	24.66
13:47:23	772.08	64.05	31.82	27	53.98	25.53
13:49:39	767.38	57.08	31.76	27.06	54.23	25.47
13:51:55	548.2	63.3	31.67	27.12	54.64	25.07
13:54:11	793.5	68.52	31.51	27.09	54.79	25.07
13:56:27	807.87	74.49	31.29	26.81	54.79	25.75
13:58:42	764.24	59.82	31.45	27.06	54.98	25.38
14:00:58	743.34	69.77	31.45	27.03	55.17	25.53
14:03:14	779.92	69.77	34.78	27.28	55.32	26.13
14:05:30	744.13	64.3	34.16	27.37	55.6	25.07
14:07:46	749.09	74.49	33.5	27.21	55.7	25.28
14:10:01	772.08	91.65	33.75	27.21	55.98	24.6
14:12:17	792.19	118.77	33.35	26.84	55.98	25.63
14:14:33	802.64	122.25	33.25	26.87	56.04	26.03
14:16:49	871.35	125.23	33.32	27.12	56.23	26.56
14:19:05	775.47	120.01	33.28	27.28	56.66	25.6
14:21:20	302.12	96.13	32.88	27.31	56.88	24.69
14:23:36	280.7	86.93	32.41	27.12	57.07	24.54
14:25:52	806.56	101.11	31.98	26.84	57.16	24.76
14:28:08	795.33	103.84	31.98	26.65	57.16	25.22
14:30:24	781.48	86.68	31.57	26.62	57.19	26.22
14:32:39	750.66	74.99	31.26	26.81	57.56	26.13
14:34:55	732.63	68.27	30.51	26.87	57.69	25.41
14:37:11	666.28	59.32	30.08	26.87	58.06	24.6
14:39:27	720.62	63.05	29.64	26.72	58.25	24.32
14:41:43	677.51	68.27	28.83	26.19	58.06	24.97
14:43:58	552.12	88.17	28.74	26.47	58.31	24.76
14:46:14	799.51	110.06	30.2	26.47	58.25	25.84
14:48:30	774.17	109.07	29.92	26.62	58.5	25.81
14:50:46	257.45	85.19	29.55	26.65	58.47	25.97
14:53:02	203.37	74.24	29.55	26.72	58.5	25.56
14:55:17	166.8	63.3	29.64	26.87	58.81	24.29
14:57:33	220.35	86.18	29.46	26.56	58.75	23.6
14:59:49	233.94	82.45	29.24	26.37	58.75	23.91
15:02:05	216.69	81.71	29.08	26.22	58.9	23.73
15:04:21	204.16	74.74	28.74	26.03	58.84	23.35
15:06:36	215.65	75.99	28.49	25.84	58.84	23.11
15:08:52	222.96	75.24	28.15	25.63	58.75	23.04

Fuente: Autores

Cuadro 15. Datos registrados de la prueba de estancamiento (Continuación)

HORA	Radiación Total [W/m ²]	Radiación Difusa [W/m ²]	Temperatura de Entrada [°C]	Temperatura de Salida [°C]	Temperatura Interna del Tanque [°C]	Temperatura Ambiente [°C]
15:11:08	214.6	72.01	27.93	25.44	58.75	23.17
15:13:24	181.69	62.8	27.9	25.53	58.84	22.98
15:15:40	165.49	53.35	27.62	25.19	58.81	22.61
15:17:55	173.33	46.39	27.28	24.88	58.69	22.51
15:20:11	153.21	42.91	27.25	24.85	58.65	22.51
15:22:27	122.39	38.68	27.06	24.69	58.65	22.33
15:24:43	133.88	31.22	27.03	24.69	58.75	22.23
15:26:59	120.82	30.72	29.11	24.57	58.69	22.42
15:29:14	112.72	30.22	28.3	24.57	58.62	22.23
15:31:30	103.32	29.23	27.96	24.32	58.5	22.33
15:33:46	68.57	19.53	27.81	24.29	58.59	21.98
15:36:02	76.15	24.75	30.76	24.13	58.56	21.7
15:38:18	86.6	35.94	29.98	24.88	58.47	21.55
15:40:33	88.17	31.96	28.99	51.15	58.41	21.86
15:42:49	81.9	25.49	27.99	51.4	58.37	21.74
15:45:05	64.92	25.99	27.56	51.9	58.5	21.58
15:47:21	65.96	23.75	27.25	48.69	58.37	21.33
15:49:37	57.6	20.27	27.18	44.46	58.41	21.11
15:51:52	50.55	19.77	27.37	40.57	58.54	20.86
15:54:08	56.04	18.03	27.25	38.11	58.44	20.74
15:56:24	57.86	19.28	27.21	35.84	58.31	20.77
15:58:40	41.93	14.3	27.25	33.84	58.28	20.68
16:00:56	44.28	14.05	27.28	32.16	58.19	20.58
16:03:11	48.72	15.05	27.37	30.76	58.22	20.46
16:05:27	53.42	18.78	27.4	29.39	58.16	20.43
16:07:43	53.42	17.04	24.51	28.46	58.09	20.74
16:09:59	64.13	22.26	23.17	27.99	58.06	20.58
16:12:15	68.05	21.02	23.45	27.06	58.06	20.65
16:14:30	76.41	23.5	23.48	26.19	58.03	20.46
16:16:46	84.25	24.25	23.51	25.47	58	20.65
16:19:02	88.69	27.48	23.54	24.91	57.97	20.55
16:21:18	85.03	30.47	23.51	24.41	57.84	20.62
16:23:34	83.99	30.97	23.32	23.54	57.81	20.77
16:25:49	79.81	32.71	23.11	20.12	57.78	20.65
16:28:05	70.93	32.46	22.89	19.93	57.78	20.62
16:30:21	64.66	30.47	22.7	19.87	57.75	20.68
16:32:37	59.95	29.72	22.51	19.81	57.63	20.58
16:34:53	57.6	27.24	22.45	19.9	57.6	20.62
16:37:08	57.08	24.5	22.39	19.9	57.63	20.58
16:39:24	64.13	29.97	22.33	19.93	57.6	20.46
16:41:40	66.48	33.45	22.23	20.58	57.47	20.83

Fuente: Autores

Cuadro 15. Datos registrados de la prueba de estancamiento (Continuación)

HORA	Radiación Total [W/m ²]	Radiación Difusa [W/m ²]	Temperatura de Entrada [°C]	Temperatura de Salida [°C]	Temperatura Interna del Tanque [°C]	Temperatura Ambiente [°C]
16:43:56	57.6	40.67	22.33	20.83	57.44	20.99
16:46:12	38.01	29.47	22.39	21.02	57.41	22.98
16:48:27	34.09	23.75	22.42	21.14	57.35	21.77
16:50:43	29.39	19.28	22.55	21.08	57.38	21.49
16:52:59	27.04	19.03	22.51	20.93	57.28	21.27
16:55:15	25.47	17.78	22.51	20.93	57.28	21.27
16:57:31	22.34	14.3	22.86	20.86	57.35	20.99
16:59:46	18.94	12.31	23.07	20.83	57.22	20.83
17:02:02	18.42	11.32	24.13	21.77	57.25	20.46
17:04:18	14.76	5.85	23.51	22.23	57.19	20.43
17:06:34	12.93	8.58	23.26	22.23	57.22	20.37
17:08:50	8.23	6.59	22.95	21.98	57.19	20.86
17:11:05	11.36	6.84	22.79	21.83	57.16	20.96
17:13:21	10.84	6.34	22.61	21.67	57.1	20.77
17:15:37	10.06	5.85	22.51	21.55	57.04	20.77
17:17:53	7.18	3.11	22.45	21.49	57.07	20.77
17:20:09	7.18	3.86	22.45	21.46	57.04	20.8
17:22:24	6.92	3.86	22.42	21.36	56.97	20.68
17:24:40	5.88	2.61	22.36	21.21	56.79	20.93
17:26:56	3.79	1.62	22.36	21.18	56.82	21.02
17:29:12	1.96	0	22.39	21.18	56.85	20.37
17:31:28	1.44	0	22.2	21.18	56.82	20.21
17:33:43	0	0	22.08	21.14	56.79	19.65
17:35:59	0	0	22.02	21.08	56.69	19.65
17:38:15	0	0	22.05	21.02	56.66	19.74
17:40:31	0	0	22.08	21.08	56.69	19.81
17:42:47	0	0	22.17	21.11	56.69	19.87
17:45:02	0	0	21.98	20.99	56.63	19.62
17:47:18	0	0	22.02	21.11	56.69	19.62
17:49:34	0	0	21.83	21.02	56.66	19.46
17:51:50	0	0	21.7	20.86	56.6	19.34
17:54:06	0	0	21.7	20.93	56.63	19.34
17:56:21	0	0	21.64	20.93	56.57	19.46
17:58:37	0	0	21.58	20.83	56.44	19.43
18:00:53	0	0	21.58	20.8	56.38	19.53
18:03:09	0	0	21.58	20.83	56.41	19.4
18:05:25	0	0	21.49	20.8	56.38	19.28
18:07:40	0	0	21.36	20.68	56.29	19.28
18:09:56	0	0	21.33	20.65	56.29	19.25
18:12:12	0	0	21.3	20.65	56.26	19.34
18:14:28	0	0	21.3	20.65	56.23	19.25

Fuente: Autores

Cuadro 15. Datos registrados de la prueba de estancamiento (Continuación)

HORA	Radiación Total [W/m ²]	Radiación Difusa [W/m ²]	Temperatura de Entrada [°C]	Temperatura de Salida [°C]	Temperatura Interna del Tanque [°C]	Temperatura Ambiente [°C]
18:16:44	0	0	21.27	20.65	56.23	19.18
18:18:59	0	0	21.18	20.62	56.2	19.25
18:21:15	0	0	21.11	20.58	56.2	19.21
18:23:31	0	0	21.02	20.49	56.16	19.15
18:25:47	0	0	20.86	20.4	56.04	19.06
18:28:03	0	0	20.86	20.4	56.07	19.06
18:30:18	0	0	20.74	20.05	55.85	18.69
18:32:34	0	0	20.68	20.02	55.85	18.75
18:34:50	0	0	20.68	20.05	55.82	18.56
18:37:06	0	0	20.65	19.96	55.79	18.87
18:39:22	0	0	20.68	19.96	55.76	18.75
18:41:37	0	0	20.68	19.96	55.76	18.65
18:43:53	0	0	20.65	19.93	55.7	18.84
18:46:09	0	0	20.65	19.96	55.7	18.72
18:48:25	0	0	20.65	19.93	55.67	18.41
18:50:41	0	0	20.65	20.02	55.67	18.84
18:52:56	0	0	20.62	20.02	55.63	18.87
18:55:12	0	0	20.62	20.02	55.63	18.9
18:57:28	0	0	20.58	20.02	55.6	18.72
18:59:44	0	0	20.58	19.96	55.6	18.75
19:02:00	0	0	20.55	19.96	55.6	18.72
19:04:15	0	0	20.55	19.96	55.6	18.81
19:06:31	0	0	20.49	19.96	55.54	18.75
19:08:47	0	0	20.55	20.02	55.54	18.62
19:11:03	0	0	20.58	20.15	55.57	18.53
19:13:19	0	0	20.46	20.02	55.48	18.56
19:15:34	0	0	20.46	19.96	55.42	18.72
19:17:50	0	0	22.51	19.96	55.45	18.31
19:20:06	0	0	22.23	19.77	54.67	18.53
19:22:22	0	0	22.08	19.77	54.89	18.53
19:24:38	0	0	21.95	19.74	55.07	18.16
19:26:53	0	0	21.83	19.62	55.01	18.09
19:29:09	0	0	21.67	19.62	54.86	17.84
19:31:25	0	0	21.55	19.62	54.92	17.63
19:33:41	0	0	21.46	19.56	54.89	17.84
19:35:57	0	0	21.33	19.53	54.83	17.88
19:38:12	0	0	21.3	19.46	54.86	17.97
19:40:28	0	0	21.18	19.43	54.83	17.84
19:42:44	0	0	21.14	19.43	54.76	17.88
19:45:00	0	0	21.02	19.43	54.76	17.97
19:47:16	0	0	20.99	19.43	54.7	17.5

Fuente: Autores

Cuadro 15. Datos registrados de la prueba de estancamiento (Continuación)

HORA	Radiación Total [W/m ²]	Radiación Difusa [W/m ²]	Temperatura de Entrada [°C]	Temperatura de Salida [°C]	Temperatura Interna del Tanque [°C]	Temperatura Ambiente [°C]
19:49:31	0	0	20.86	19.37	54.64	17.84
19:51:47	0	0	20.8	19.4	54.61	18.37
19:54:03	0	0	20.8	19.43	54.61	18.09
19:56:19	0	0	20.83	19.56	54.64	17.75

Fuente: Autores

Cuadro 16. Datos registrados de la prueba de consumo en horas de la noche

HORA	Radiación Total [W/m ²]	Radiación Difusa [W/m ²]	Temperatura de Entrada [°C]	Temperatura de Salida [°C]	Temperatura Interna del Tanque [°C]	Temperatura Ambiente [°C]
20:02:16	0	0	23.85	47.07	54.45	17.47
20:04:32	0	0	21.33	52.49	54.45	17.63
20:06:47	0	0	21.83	52.65	54.3	17.5
20:09:03	0	0	22.02	52.43	54.23	17.35
20:11:19	0	0	22.08	52.27	54.11	17.84
20:13:35	0	0	22.05	51.62	53.98	17.38
20:15:51	0	0	21.95	49.13	53.89	17.81
20:18:06	0	0	21.86	45.89	53.83	17.81
20:20:22	0	0	21.7	43	53.83	17.66
20:22:38	0	0	21.58	40.38	53.77	17.47
20:24:54	0	0	21.46	38.11	53.77	17.35
20:27:10	0	0	21.33	36.09	53.64	17.44
20:29:25	0	0	21.21	34.25	53.64	17.16
20:31:41	0	0	21.08	32.57	53.61	17.28
20:33:57	0	0	21.02	31.2	53.58	17.19
20:36:13	0	0	20.93	29.8	53.58	17.19
20:38:29	0	0	20.8	28.52	53.49	17.19
20:40:44	0	0	20.65	27.4	53.42	17.1
20:43:00	0	0	20.49	26.41	53.36	17
20:45:16	0	0	20.46	25.6	53.36	17.04
20:47:32	0	0	20.37	24.88	53.33	16.97
20:49:48	0	0	20.24	24.16	53.24	16.82
20:52:03	0	0	20.15	23.6	53.21	16.76
20:54:19	0	0	20.05	23.04	53.11	16.66
20:56:35	0	0	20.02	22.61	53.08	16.63
20:58:51	0	0	19.93	22.2	53.05	16.66
21:01:07	0	0	19.87	21.83	53.02	16.79
21:03:22	0	0	19.77	21.52	52.96	17
21:05:38	0	0	19.74	21.21	52.93	17.04

Fuente: Autores

Cuadro 16. Datos registrados de la prueba de consumo en horas de la noche
(Continuación)

HORA	Radiación Total [W/m ²]	Radiación Difusa [W/m ²]	Temperatura de Entrada [°C]	Temperatura de Salida [°C]	Temperatura Interna del Tanque [°C]	Temperatura Ambiente [°C]
21:07:54	0	0	19.77	21.08	52.86	17
21:10:10	0	0	19.71	20.8	52.83	17.1
21:12:26	0	0	19.65	20.62	52.8	17.44
21:14:41	0	0	19.62	20.46	52.77	17.38
21:16:57	0	0	19.59	20.27	52.68	17.28
21:19:13	0	0	19.62	20.21	52.68	17.25
21:21:29	0	0	19.53	19.96	52.58	17.13
21:23:45	0	0	19.46	19.81	52.58	17.25
21:26:00	0	0	19.37	19.65	52.46	17.16
21:28:16	0	0	20.4	48.76	52.4	17.28
21:30:32	0	0	21.18	50.06	52.21	17.35
21:32:48	0	0	21.74	49.72	52.02	17.35
21:35:04	0	0	21.74	49	51.77	17.63
21:37:19	0	0	21.77	48.51	51.34	17.35
21:39:35	0	0	21.67	46.02	51.03	17.38
21:41:51	0	0	21.52	42.9	51.03	17.25
21:44:07	0	0	21.3	40.2	50.75	17.32
21:46:23	0	0	21.18	37.98	50.65	17.28
21:48:38	0	0	21.08	35.9	50.62	17.32
21:50:54	0	0	20.93	33.94	50.56	17.35
21:53:10	0	0	20.8	32.29	50.41	17.32
21:55:26	0	0	20.65	30.73	50.31	17.44
21:57:42	0	0	20.58	29.46	50.25	17.53
21:59:57	0	0	20.49	28.3	50.13	17.5
22:02:13	0	0	20.4	27.28	50.03	17.38
22:04:29	0	0	20.27	26.34	49.97	17.44
22:06:45	0	0	20.24	25.66	49.88	17.56
22:09:01	0	0	20.21	24.94	49.81	17.53
22:11:16	0	0	20.09	24.29	49.72	17.63
22:13:32	0	0	20.05	23.73	49.63	17.63
22:15:48	0	0	20.05	23.26	49.56	17.56
22:18:04	0	0	19.93	22.76	49.44	17.56
22:20:20	0	0	19.93	22.39	49.41	17.69
22:22:35	0	0	19.9	22.08	49.28	17.84
22:24:51	0	0	19.87	21.83	49.22	17.81
22:27:07	0	0	19.81	21.55	49.13	17.94
22:29:23	0	0	19.87	21.39	49.1	17.84
22:31:39	0	0	19.81	21.27	49	17.97
22:33:54	0	0	19.77	21.08	48.91	17.88
22:36:10	0	0	19.77	20.86	48.88	17.78
22:38:26	0	0	19.81	20.8	48.85	17.75

Fuente: Autores

Cuadro 16. Datos registrados de la prueba de consumo en horas de la noche
(Continuación)

HORA	Radiación Total [W/m ²]	Radiación Difusa [W/m ²]	Temperatura de Entrada [°C]	Temperatura de Salida [°C]	Temperatura Interna del Tanque [°C]	Temperatura Ambiente [°C]
22:40:42	0	0	19.77	20.62	48.76	17.69
22:42:58	0	0	19.77	20.46	48.69	17.69
22:45:13	0	0	19.77	20.43	48.6	17.69
22:47:29	0	0	19.77	20.3	48.57	17.66
22:49:45	0	0	19.77	20.21	48.51	17.66
22:52:01	0	0	19.74	20.09	48.44	17.75
22:54:17	0	0	19.74	20.02	48.38	17.69
22:56:32	0	0	19.71	19.93	48.32	17.84
22:58:48	0	0	19.71	19.93	48.26	17.75
23:01:04	0	0	19.74	19.93	48.26	17.78
23:03:20	0	0	19.77	19.96	48.2	17.94
23:05:36	0	0	19.77	19.96	48.1	17.84
23:07:51	0	0	19.71	19.81	48.01	17.84
23:10:07	0	0	19.71	19.81	47.95	17.84
23:12:23	0	0	19.71	19.81	47.91	17.78
23:14:39	0	0	19.71	19.74	47.88	17.75
23:16:55	0	0	19.65	19.74	47.79	17.69
23:19:10	0	0	19.65	19.62	47.73	17.69
23:21:26	0	0	19.62	19.56	47.67	17.78
23:23:42	0	0	19.62	19.56	47.6	17.78
23:25:58	0	0	19.59	19.46	47.54	17.78
23:28:14	0	0	19.59	19.4	47.51	17.56
23:30:29	0	0	19.56	19.37	47.48	17.69
23:32:45	0	0	19.56	19.34	47.42	17.25
23:35:01	0	0	19.46	19.25	47.35	16.97
23:37:17	0	0	19.43	19.21	47.29	17.25
23:39:33	0	0	19.43	19.21	47.29	17.47
23:41:48	0	0	19.37	19.15	47.17	17.44
23:44:04	0	0	19.28	19.06	47.14	17.38
23:46:20	0	0	19.25	19.03	47.11	17.32
23:48:36	0	0	19.18	18.9	47.01	17.04
23:50:52	0	0	19.15	18.84	46.98	17.25
23:53:07	0	0	19.06	18.75	46.95	16.72
23:55:23	0	0	19	18.62	46.89	16.07
23:57:39	0	0	18.9	18.56	46.83	15.95
23:59:55	0	0	18.87	18.5	46.83	15.76
0:02:11	0	0	18.84	18.53	46.76	15.6
0:04:26	0	0	18.75	18.47	46.7	15.57
0:06:42	0	0	18.65	18.31	46.61	15.42
0:08:58	0	0	18.56	18.19	46.58	15.32
0:11:14	0	0	18.5	18.16	46.55	15.42

Fuente: Autores

Cuadro 16. Datos registrados de la prueba de consumo en horas de la noche
(Continuación)

HORA	Radiación Total [W/m ²]	Radiación Difusa [W/m ²]	Temperatura de Entrada [°C]	Temperatura de Salida [°C]	Temperatura Interna del Tanque [°C]	Temperatura Ambiente [°C]
0:13:30	0	0	18.47	18.09	46.48	15.54
0:15:45	0	0	18.37	18.09	46.42	15.98
0:18:01	0	0	18.34	18.13	46.36	16.26
0:20:17	0	0	18.31	18.09	46.36	16.38
0:22:33	0	0	18.28	18.09	46.3	16.48
0:24:49	0	0	18.28	18.03	46.3	16.29
0:27:04	0	0	18.16	17.97	46.17	16.23
0:29:20	0	0	18.13	17.94	46.14	16.13
0:31:36	0	0	18.09	17.88	46.11	16.04
0:33:52	0	0	18	17.84	46.02	15.45
0:36:08	0	0	17.97	17.84	45.98	15.73
0:38:23	0	0	17.94	17.84	45.92	15.95
0:40:39	0	0	17.94	17.88	45.92	16.13
0:42:55	0	0	17.84	17.88	45.8	16.2
0:45:11	0	0	17.84	17.97	45.77	15.6
0:47:27	0	0	17.84	17.97	45.77	15.35
0:49:42	0	0	17.81	17.88	45.74	15.88
0:51:58	0	0	17.78	17.84	45.67	15.6
0:54:14	0	0	17.75	17.78	45.61	15.54
0:56:30	0	0	17.69	17.78	45.58	15.98
0:58:46	0	0	17.66	17.75	45.55	16.1
1:01:01	0	0	17.66	17.66	45.46	15.76
1:03:17	0	0	17.63	17.56	45.42	14.98
1:05:33	0	0	17.56	17.5	45.39	15.26
1:07:49	0	0	17.5	17.44	45.33	15.45
1:10:05	0	0	17.53	17.44	45.33	15.63
1:12:20	0	0	17.5	17.35	45.27	15.51
1:14:36	0	0	17.44	17.25	45.21	14.67
1:16:52	0	0	17.38	17.19	45.18	14.36
1:19:08	0	0	17.32	17.13	45.14	14.27
1:21:24	0	0	17.28	17	45.08	14.17
1:23:39	0	0	17.28	16.97	45.05	14.17
1:25:55	0	0	17.28	17.04	45.02	14.27
1:28:11	0	0	17.19	17	44.96	14.36
1:30:27	0	0	17.19	17.1	44.9	14.7
1:32:43	0	0	17.1	17.04	44.83	14.86
1:34:58	0	0	17.04	17	44.8	14.89
1:37:14	0	0	16.97	16.97	44.77	15.04
1:39:30	0	0	16.94	16.94	44.77	14.92
1:41:46	0	0	16.91	16.94	44.74	15.17

Fuente: Autores.

Cuadro 17. Datos registrados de la prueba de consumo en horas de la mañana

HORA	Radiación Total [W/m ²]	Radiación Difusa [W/m ²]	Temperatura de Entrada [°C]	Temperatura de Salida [°C]	Temperatura Interna del Tanque [°C]	Temperatura Ambiente [°C]
8:32:02	590.26	59.07	22.05	19.96	39.04	21.46
8:34:18	577.98	57.83	22.86	20.12	39.2	21.7
8:36:34	553.69	54.84	25.63	20.77	39.48	21.83
8:38:50	584.51	57.08	19.87	38.26	39.82	21.74
8:41:05	454.68	49.87	20.15	39.48	39.98	21.7
8:43:21	253.79	41.16	19.9	39.57	40.01	21.7
8:45:37	238.9	43.9	19.96	39.6	40.13	21.52
8:47:53	286.7	55.09	19.96	39.63	40.16	21.52
8:50:09	508.23	67.78	20.05	37.86	39.95	21.55
8:52:24	153.74	51.11	20.8	36.18	40.07	21.83
8:54:40	164.45	62.3	20.96	34.44	40.07	21.67
8:56:56	157.39	61.31	20.37	38.51	39.88	21.83
8:59:12	131.27	61.81	19.74	39.01	39.82	22.05
9:01:28	116.9	54.35	19.87	39.07	39.88	22.02
9:03:43	111.42	54.59	19.93	38.67	39.85	21.49
9:05:59	131.53	68.52	19.71	37.92	39.48	21.52
9:08:15	157.39	66.78	19.74	36.93	39.32	22.02
9:10:31	103.84	40.42	20.02	35.12	39.26	21.86
9:12:47	128.14	37.18	20.12	33.47	39.11	21.58
9:15:02	545.33	62.55	20.58	32.04	38.86	21.98
9:17:18	751.44	72.5	21.46	31.14	39.01	23.04
9:19:34	761.63	76.48	22.54	30.26	38.86	23.82
9:21:50	779.65	78.47	24.41	29.61	38.82	24.23
9:24:06	804.47	92.9	25.19	28.55	38.48	24.72
9:26:21	836.34	116.03	26.19	28.33	38.48	25.1
9:28:37	853.58	128.96	27.21	28.52	38.54	25.25
9:30:53	850.97	133.69	27.65	27.65	38.17	23.79
9:33:09	869	134.68	28.3	27.65	38.17	24.54
9:35:25	776.26	133.69	28.52	27.49	38.05	24.79
9:37:40	929.6	134.68	28.74	27.03	37.58	24.94
9:39:56	856.46	120.75	21.86	37.67	37.77	26.34
9:42:12	745.69	106.83	22.95	38.36	38.48	26
9:44:28	266.07	85.44	22.92	38.61	38.67	24.69
9:46:44	230.02	81.46	22.54	37.8	38.3	23.82
9:48:59	176.2	78.97	22.33	36.61	37.92	23.73
9:51:15	173.07	74.99	22.7	34.81	37.86	23.26
9:53:31	483.41	85.44	22.92	33.25	37.86	23.17
9:55:47	175.42	61.06	22.73	35.68	37.89	22.86
9:58:03	157.13	58.08	22.39	36.02	37.52	21.77
10:00:18	187.7	69.77	22.23	35.49	36.99	22.26
10:02:34	155.57	61.06	22.2	34.44	36.21	22.17

Fuente: Autores.

Cuadro 17. Datos registrados de la prueba de consumo en horas de la mañana
(Continuación)

HORA	Radiación Total [W/m ²]	Radiación Difusa [W/m ²]	Temperatura de Entrada [°C]	Temperatura de Salida [°C]	Temperatura Interna del Tanque [°C]	Temperatura Ambiente [°C]
10:04:50	138.58	48.13	22.23	34.06	35.15	22.02
10:07:06	148.77	42.66	22.36	32.6	35.43	21.64
10:09:22	295.06	55.09	22.58	31.39	35.18	22.33
10:11:37	159.22	51.36	22.86	30.54	35.06	22.7
10:13:53	191.35	65.04	22.89	29.49	35.12	22.42
10:16:09	212.25	77.97	22.17	33.63	34.09	23.04
10:18:25	269.46	70.76	22.23	33.1	33.35	22.61
10:20:41	151.12	57.83	22.14	32.44	32.72	22.79
10:22:56	135.71	61.31	22.14	31.98	32.16	22.58
10:25:12	180.38	73.25	22.2	31.23	32.13	22.79
10:27:28	191.09	64.29	22.45	29.95	32.23	22.36
10:29:44	258.49	65.54	22.61	29.05	32.38	23.04
10:32:00	180.9	59.32	22.79	28.4	32.6	22.76
10:34:15	408.7	78.22	22.98	27.74	32.57	23.07
10:36:31	1006.67	112.3	23.14	27.25	31.76	24.66
10:38:47	563.09	89.42	23.73	27.12	32.69	24.72
10:41:03	977.41	104.34	24.13	26.62	32.72	23.85
10:43:19	870.04	112.8	24.79	26.22	32.91	24.79
10:45:34	278.35	80.21	25.1	26.28	33.32	25.44
10:47:50	278.08	103.1	25.28	26	33.47	24.47
10:50:06	606.46	100.11	25.44	25.91	33.5	24.6
10:52:22	490.73	84.19	25.78	26	33.81	25.22
10:54:38	204.15	86.18	26.16	25.72	34.16	24.23
10:56:53	176.2	94.14	26.22	25.53	34.22	23.95
10:59:09	172.28	96.38	26.22	25.25	34.22	23.26
11:01:25	183.52	100.11	26.19	25.16	34.22	23.54
11:03:41	197.62	85.44	26.16	25.16	34.31	23.98
11:05:57	185.61	89.66	26	24.85	34.34	23.79
11:08:12	341.56	96.38	25.84	24.75	34.34	24.35
11:10:28	396.16	105.33	25.81	24.72	34.34	25.25
11:12:44	531.48	118.02	25.78	25.04	34.62	25.84
11:15:00	468.79	100.11	25.72	24.69	34.75	25.75
11:17:16	272.34	81.21	25.81	24.69	34.9	24.29
11:19:31	447.1	87.43	26.16	24.85	35.12	24.16
11:21:47	446.06	104.84	26.72	25.22	35.62	25.28
11:24:03	1046.11	139.16	26.12	24.94	35.46	25.91
11:26:19	726.62	122.25	26.56	25.63	36.12	25.38
11:28:35	886.5	125.48	26.72	25.6	36.21	25.56
11:30:50	994.65	128.71	27.59	25.91	36.49	26.75
11:33:06	1050.29	127.72	28.09	25.97	36.83	26.62
11:35:22	241.51	81.95	28.3	26.31	37.18	26.37

Fuente: Autores

Cuadro 17. Datos registrados de la prueba de consumo en horas de la mañana
(Continuación)

HORA	Radiación Total [W/m ²]	Radiación Difusa [W/m ²]	Temperatura de Entrada [°C]	Temperatura de Salida [°C]	Temperatura Interna del Tanque [°C]	Temperatura Ambiente [°C]
11:37:38	159.22	61.56	28.33	26.4	37.52	25.22
11:39:54	539.32	64.29	28.3	26.16	37.55	24.51
11:42:09	185.08	46.39	28.27	26.16	37.58	24.54
11:44:25	1041.67	93.4	28.09	25.97	37.58	24.91
11:46:41	592.35	88.92	28.12	26.09	37.89	25.16
11:48:57	208.33	74.74	27.96	26	37.98	24.32
11:51:13	982.63	97.62	27.9	25.81	38.05	24.66
11:53:28	1025.48	90.16	27.77	25.81	38.11	25.56
11:55:44	218	39.67	28.15	26.16	38.64	25.38
11:58:00	883.63	63.3	28.02	25.91	38.48	24.91
12:00:16	989.43	73.75	28.49	26.03	38.79	25.75
12:02:32	1024.69	78.72	28.21	25.97	38.92	27.03
12:04:47	978.98	79.96	28.4	26.16	39.23	25.72
12:07:03	545.85	66.04	28.89	26.56	39.7	26.03
12:09:19	320.93	54.35	28.99	26.53	39.88	25.07
12:11:35	168.37	51.36	28.99	26.5	40.07	24.35
12:13:51	942.4	81.21	28.71	26.09	39.82	24.91
12:16:06	929.6	77.73	28.52	26.12	40.16	25.25
12:18:22	934.31	78.72	28.74	26.37	40.38	25.84
12:20:38	966.7	88.92	28.83	26.31	40.57	25.75
12:22:54	1006.41	100.86	29.08	26.53	41.07	26.03
12:25:10	531.22	81.21	29.05	26.56	41.1	26.34
12:27:25	401.91	71.51	29.27	26.72	41.38	26.19
12:29:41	235.5	68.77	29.36	26.62	41.69	24.6
12:31:57	524.43	90.91	29.05	26.4	41.63	24.66
12:34:13	434.82	86.93	28.74	26.16	41.44	24.94
12:36:29	977.93	101.85	28.83	26.28	41.69	25.56
12:38:44	930.39	87.92	28.86	26.34	41.75	25.94
12:41:00	949.72	89.91	28.71	26.53	42.16	26.62
12:43:16	217.74	59.57	29.21	26.72	42.44	25.19
12:45:32	949.46	82.45	29.05	26.62	42.44	25.47
12:47:48	899.56	79.47	29.21	26.72	42.87	25.72
12:50:03	122.91	42.9	29.36	26.72	43.09	25.04
12:52:19	134.67	52.11	29.39	26.68	43.31	24.41
12:54:35	179.86	65.04	29.36	26.37	43.21	23.95
12:56:51	196.06	44.89	28.93	26.03	43.03	24.04
12:59:07	927.51	74.49	28.77	26	43.09	24.29
13:01:22	960.43	76.73	28.55	25.81	43.12	26.16
13:03:38	946.58	81.71	28.58	26.09	43.46	25.91
13:05:54	942.14	96.88	28.4	26.28	43.81	26
13:08:10	973.23	96.38	28.52	26.5	43.99	26.03

Fuente: Autores

Cuadro 17. Datos registrados de la prueba de consumo en horas de la mañana
(Continuación)

HORA	Radiación Total [W/m ²]	Radiación Difusa [W/m ²]	Temperatura de Entrada [°C]	Temperatura de Salida [°C]	Temperatura Interna del Tanque [°C]	Temperatura Ambiente [°C]
13:10:26	729.24	83.69	28.77	26.65	44.24	26.47
13:12:41	680.65	97.37	29.11	26.75	44.55	25.66
13:14:57	600.45	102.1	29.39	26.87	44.77	25.66
13:17:13	896.95	122.5	29.55	27.03	44.86	26.53
13:19:29	993.08	132.69	29.61	27.21	45.27	26.93
13:21:45	912.62	123.24	30.08	27.46	45.42	27.03
13:24:00	340.78	95.88	30.2	27.49	45.77	25.41
13:26:16	391.98	104.84	30.51	27.28	45.83	24.69
13:28:32	425.42	113.29	30.17	27	45.74	24.97
13:30:48	308.13	108.32	29.86	26.84	45.77	25.28
13:33:04	316.49	107.82	29.86	26.87	45.89	25.44
13:35:19	289.58	97.37	29.64	26.84	45.98	25.63
13:37:35	264.5	78.97	29.67	26.93	46.23	24.75
13:39:51	244.65	72.75	29.42	26.72	46.3	24.32
13:42:07	185.08	65.79	29.11	26.47	46.3	24.41
13:44:23	189.26	59.82	28.93	26.34	46.3	24.51
13:46:38	242.82	69.27	28.71	26.16	46.36	23.6
13:48:54	273.12	78.72	28.4	26.09	46.36	23.54
13:51:10	283.05	87.67	28.12	25.94	46.39	23.76
13:53:26	586.6	93.64	27.81	25.78	46.39	24.1
13:55:42	914.71	102.1	27.77	25.63	46.42	25.44
13:57:57	905.31	113.54	28.21	25.81	46.42	25.81
14:00:13	937.7	122.99	28.83	26.03	46.67	26.68
14:02:29	306.82	87.18	29.46	26.37	47.11	25.78
14:04:45	245.69	66.78	29.64	26.62	47.39	24.94
14:07:01	234.46	54.35	29.42	26.37	47.42	24.04
14:09:16	210.16	49.62	29.42	26.28	47.51	23.98
14:11:32	211.21	57.58	29.24	25.97	47.51	23.6
14:13:48	217.74	72.25	29.02	25.84	47.54	23.67
14:16:04	230.28	71.76	28.58	25.66	47.42	23.91
14:18:20	328.5	86.93	28.3	25.6	47.42	24.01
14:20:35	276.26	72.01	28.37	25.72	47.73	24.88
14:22:51	214.08	71.76	28.3	25.72	47.73	24.13
14:25:07	185.87	73.75	28.18	25.63	47.76	24.01
14:27:23	178.29	69.02	28.15	25.66	47.95	23.45
14:29:39	209.9	76.98	27.81	25.38	47.85	23.45
14:31:54	209.12	75.98	27.56	25.22	47.85	23.48
14:34:10	195.8	65.54	27.43	25.28	47.91	23.51
14:36:26	195.27	61.56	27.25	25.16	47.91	23.17
14:38:42	334.51	70.76	28.09	24.94	47.85	23.26
14:40:58	273.38	73.25	27.74	24.88	47.88	23.23

Fuente: Autores

Cuadro 17. Datos registrados de la prueba de consumo en horas de la mañana
(Continuación)

HORA	Radiación Total [W/m ²]	Radiación Difusa [W/m ²]	Temperatura de Entrada [°C]	Temperatura de Salida [°C]	Temperatura Interna del Tanque [°C]	Temperatura Ambiente [°C]
14:43:13	175.16	67.78	27.37	24.72	47.85	23.04
14:45:29	154.52	53.35	27.21	24.72	47.95	23.14
14:47:45	160.79	47.38	27.06	24.69	47.98	23.07
14:50:01	169.15	44.89	26.72	24.41	47.79	23.14
14:52:17	490.73	49.37	26.5	24.41	47.88	23.76
14:54:32	142.24	34.7	26.37	24.47	47.95	23.67
14:56:48	178.81	32.96	26.47	24.6	48.13	23.32
14:59:04	147.21	33.95	26.16	24.32	48.01	22.98
15:01:20	570.41	41.66	26.03	24.29	48.01	23.07
15:03:36	526.52	44.15	25.81	24.13	47.88	23.91
15:05:51	565.96	54.84	25.66	24.1	47.85	24.57
15:08:07	143.81	39.17	25.72	24.29	47.88	24.29
15:10:23	562.83	50.86	25.72	24.32	47.95	24.16
15:12:39	566.23	58.82	25.6	24.35	47.88	24.69
15:14:55	299.24	65.29	25.72	24.54	48.01	24.29
15:17:10	356.19	63.8	25.63	24.51	47.98	24.01
15:19:26	237.85	59.07	25.6	24.54	48.01	24.23
15:21:42	172.28	62.06	25.53	24.41	47.95	24.41
15:23:58	195.53	60.32	25.56	24.54	47.98	24.94
15:26:14	194.49	69.52	25.66	24.75	48.13	24.16
15:28:29	160.79	58.33	25.63	24.66	48.13	23.6
15:30:45	163.14	61.56	25.78	24.75	48.29	24.04
15:33:01	133.88	51.86	25.81	24.75	48.29	23.54
15:35:17	142.5	61.06	25.66	24.54	48.16	23.76
15:37:33	128.14	40.42	25.78	24.66	48.19	23.95
15:39:48	112.2	41.16	25.72	24.54	48.19	23.45
15:42:04	111.68	38.68	25.81	24.6	48.35	23.29
15:44:20	119.78	42.41	25.63	24.35	48.26	22.76
15:46:36	115.07	37.18	25.63	24.35	48.32	22.64
15:48:52	158.44	51.36	25.53	24.19	48.32	22.36
15:51:07	151.39	62.3	25.28	24.01	48.16	22.86
15:53:23	193.97	77.23	25.22	24.1	48.26	23.11

Fuente: Autores.

ANEXO D

**DATOS PRONOSTICADOS DE COSTOS DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA Y GAS
NATURAL UTILIZADOS PARA LA EVALUACIÓN ECONÓMICA**

Cuadro 18. Pronostico del valor de consumo de energía eléctrica por uso de ducha eléctrica

Número de Mes	Mensualidad (\$)	Valor presente (\$)	Sumatoria valor presente(\$)
0			
1	-24201,3	-24201,3	-24201,3
2	-24266,8855	-24201,3	-48402,6
3	-24332,6488	-24201,3	-72603,9
4	-24398,5903	-24201,3	-96805,2
5	-24464,7104	-24201,3	-121006,5
6	-24531,0098	-24201,3	-145207,8
7	-24597,4888	-24201,3	-169409,1
8	-24664,148	-24201,3	-193610,4
9	-24730,9879	-24201,3	-217811,7
10	-24798,0089	-24201,3	-242013
11	-24865,2115	-24201,3	-266214,3
12	-24932,5962	-24201,3	-290415,6
13	-25000,1635	-24201,3	-314616,9
14	-25067,914	-24201,3	-338818,2
15	-25135,848	-24201,3	-363019,5
16	-25203,9662	-24201,3	-387220,8
17	-25272,2689	-24201,3	-411422,1
18	-25340,7568	-24201,3	-435623,4
19	-25409,4302	-24201,3	-459824,7
20	-25478,2898	-24201,3	-484026
21	-25547,3359	-24201,3	-508227,3
22	-25616,5692	-24201,3	-532428,6
23	-25685,9901	-24201,3	-556629,9
24	-25755,5991	-24201,3	-580831,2
25	-25825,3968	-24201,3	-605032,5
26	-25895,3836	-24201,3	-629233,8
27	-25965,5601	-24201,3	-653435,1
28	-26035,9268	-24201,3	-677636,4
29	-26106,4842	-24201,3	-701837,7
30	-26177,2327	-24201,3	-726039
31	-26248,173	-24201,3	-750240,3
32	-26319,3056	-24201,3	-774441,6
33	-26390,6309	-24201,3	-798642,9
34	-26462,1495	-24201,3	-822844,2
35	-26533,8619	-24201,3	-847045,5
36	-26605,7687	-24201,3	-871246,8

Fuente: Autores

Cuadro 19. (Continuación) Pronostico del valor de consumo de energía eléctrica por uso de ducha eléctrica

37	-26677,8703	-24201,3	-895448,1
38	-26750,1674	-24201,3	-919649,4
39	-26822,6603	-24201,3	-943850,7
40	-26895,3497	-24201,3	-968052
41	-26968,2361	-24201,3	-992253,3
42	-27041,32	-24201,3	-1016454,6
43	-27114,602	-24201,3	-1040655,9
44	-27188,0826	-24201,3	-1064857,2
45	-27261,7623	-24201,3	-1089058,5
46	-27335,6417	-24201,3	-1113259,8
47	-27409,7213	-24201,3	-1137461,1
48	-27484,0016	-24201,3	-1161662,4
49	-27558,4832	-24201,3	-1185863,7
50	-27633,1667	-24201,3	-1210065
51	-27708,0526	-24201,3	-1234266,3
52	-27783,1414	-24201,3	-1258467,6
53	-27858,4338	-24201,3	-1282668,9
54	-27933,9301	-24201,3	-1306870,2
55	-28009,6311	-24201,3	-1331071,5
56	-28085,5372	-24201,3	-1355272,8
57	-28161,649	-24201,3	-1379474,1
58	-28237,967	-24201,3	-1403675,4
59	-28314,4919	-24201,3	-1427876,7
60	-28391,2242	-24201,3	-1452078
61	-28468,1644	-24201,3	-1476279,3
62	-28545,3131	-24201,3	-1500480,6
63	-28622,6709	-24201,3	-1524681,9
64	-28700,2384	-24201,3	-1548883,2
65	-28778,016	-24201,3	-1573084,5
66	-28856,0045	-24201,3	-1597285,8
67	-28934,2042	-24201,3	-1621487,1
68	-29012,6159	-24201,3	-1645688,4
69	-29091,2401	-24201,3	-1669889,7
70	-29170,0774	-24201,3	-1694091
71	-29249,1283	-24201,3	-1718292,3
72	-29328,3934	-24201,3	-1742493,6

Fuente: Autores

Cuadro 20. (Continuación) Pronostico del valor de consumo de energía eléctrica por uso de ducha eléctrica

73	-29407,8734	-24201,3	-1766694,9
74	-29487,5687	-24201,3	-1790896,2
75	-29567,48	-24201,3	-1815097,5
76	-29647,6079	-24201,3	-1839298,8
77	-29727,9529	-24201,3	-1863500,1
78	-29808,5156	-24201,3	-1887701,4
79	-29889,2967	-24201,3	-1911902,7
80	-29970,2967	-24201,3	-1936104
81	-30051,5162	-24201,3	-1960305,3
82	-30132,9558	-24201,3	-1984506,6
83	-30214,6161	-24201,3	-2008707,9
84	-30296,4978	-24201,3	-2032909,2
85	-30378,6013	-24201,3	-2057110,5
86	-30460,9273	-24201,3	-2081311,8
87	-30543,4764	-24201,3	-2105513,1
88	-30626,2492	-24201,3	-2129714,4
89	-30709,2463	-24201,3	-2153915,7
90	-30792,4684	-24201,3	-2178117
91	-30875,916	-24201,3	-2202318,3
92	-30959,5897	-24201,3	-2226519,6
93	-31043,4902	-24201,3	-2250720,9
94	-31127,6181	-24201,3	-2274922,2
95	-31211,9739	-24201,3	-2299123,5
96	-31296,5584	-24201,3	-2323324,8
97	-31381,372	-24201,3	-2347526,1
98	-31466,4156	-24201,3	-2371727,4
99	-31551,6895	-24201,3	-2395928,7
100	-31637,1946	-24201,3	-2420130
101	-31722,9314	-24201,3	-2444331,3
102	-31808,9006	-24201,3	-2468532,6
103	-31895,1027	-24201,3	-2492733,9
104	-31981,5384	-24201,3	-2516935,2
105	-32068,2084	-24201,3	-2541136,5
106	-32155,1132	-24201,3	-2565337,8
107	-32242,2536	-24201,3	-2589539,1
108	-32329,6301	-24201,3	-2613740,4

Fuente: Autores

Cuadro 21. (Continuación) Pronostico del valor de consumo de energía eléctrica por uso de ducha eléctrica

109	-32417,2434	-24201,3	-2637941,7
110	-32505,0941	-24201,3	-2662143
111	-32593,1829	-24201,3	-2686344,3
112	-32681,5104	-24201,3	-2710545,6
113	-32770,0773	-24201,3	-2734746,9
114	-32858,8842	-24201,3	-2758948,2
115	-32947,9318	-24201,3	-2783149,5
116	-33037,2207	-24201,3	-2807350,8
117	-33126,7516	-24201,3	-2831552,1
118	-33216,5251	-24201,3	-2855753,4
119	-33306,5419	-24201,3	-2879954,7
120	-33396,8026	-24201,3	-2904156
121	-33487,3079	-24201,3	-2928357,3
122	-33578,0585	-24201,3	-2952558,6
123	-33669,0551	-24201,3	-2976759,9
124	-33760,2982	-24201,3	-3000961,2
125	-33851,7886	-24201,3	-3025162,5
126	-33943,527	-24201,3	-3049363,8
127	-34035,5139	-24201,3	-3073565,1
128	-34127,7502	-24201,3	-3097766,4
129	-34220,2364	-24201,3	-3121967,7
130	-34312,9732	-24201,3	-3146169
131	-34405,9614	-24201,3	-3170370,3
132	-34499,2015	-24201,3	-3194571,6
133	-34592,6944	-24201,3	-3218772,9
134	-34686,4406	-24201,3	-3242974,2
135	-34780,4408	-24201,3	-3267175,5
136	-34874,6958	-24201,3	-3291376,8
137	-34969,2062	-24201,3	-3315578,1
138	-35063,9728	-24201,3	-3339779,4
139	-35158,9961	-24201,3	-3363980,7
140	-35254,277	-24201,3	-3388182
141	-35349,8161	-24201,3	-3412383,3
142	-35445,6141	-24201,3	-3436584,6
143	-35541,6717	-24201,3	-3460785,9
144	-35637,9897	-24201,3	-3484987,2

Fuente: Autores

Cuadro 22. (Continuación) Pronostico del valor de consumo de energía eléctrica por uso de ducha eléctrica

145	-35734,5686	-24201,3	-3509188,5
146	-35831,4093	-24201,3	-3533389,8
147	-35928,5124	-24201,3	-3557591,1
148	-36025,8787	-24201,3	-3581792,4
149	-36123,5088	-24201,3	-3605993,7
150	-36221,4035	-24201,3	-3630195
151	-36319,5635	-24201,3	-3654396,3
152	-36417,9895	-24201,3	-3678597,6
153	-36516,6823	-24201,3	-3702798,9
154	-36615,6425	-24201,3	-3727000,2
155	-36714,8709	-24201,3	-3751201,5
156	-36814,3682	-24201,3	-3775402,8
157	-36914,1351	-24201,3	-3799604,1
158	-37014,1724	-24201,3	-3823805,4
159	-37114,4809	-24201,3	-3848006,7
160	-37215,0611	-24201,3	-3872208
161	-37315,9139	-24201,3	-3896409,3
162	-37417,04	-24201,3	-3920610,6
163	-37518,4402	-24201,3	-3944811,9
164	-37620,1152	-24201,3	-3969013,2
165	-37722,0657	-24201,3	-3993214,5
166	-37824,2925	-24201,3	-4017415,8
167	-37926,7963	-24201,3	-4041617,1
168	-38029,5779	-24201,3	-4065818,4
169	-38132,6381	-24201,3	-4090019,7
170	-38235,9776	-24201,3	-4114221
171	-38339,5971	-24201,3	-4138422,3
172	-38443,4974	-24201,3	-4162623,6
173	-38547,6792	-24201,3	-4186824,9
174	-38652,1435	-24201,3	-4211026,2
175	-38756,8908	-24201,3	-4235227,5
176	-38861,9219	-24201,3	-4259428,8
177	-38967,2377	-24201,3	-4283630,1
178	-39072,839	-24201,3	-4307831,4
179	-39178,7263	-24201,3	-4332032,7
180	-39284,9007	-24201,3	-4356234

Fuente: Autores

Cuadro 23. (Continuación) Pronostico del valor de consumo de energía eléctrica por uso de ducha eléctrica

181	-39391,3628	-24201,3	-4380435,3
182	-39498,1134	-24201,3	-4404636,6
183	-39605,1533	-24201,3	-4428837,9
184	-39712,4832	-24201,3	-4453039,2
185	-39820,1041	-24201,3	-4477240,5
186	-39928,0165	-24201,3	-4501441,8
187	-40036,2215	-24201,3	-4525643,1
188	-40144,7196	-24201,3	-4549844,4
189	-40253,5118	-24201,3	-4574045,7
190	-40362,5988	-24201,3	-4598247
191	-40471,9815	-24201,3	-4622448,3
192	-40581,6605	-24201,3	-4646649,6
193	-40691,6368	-24201,3	-4670850,9
194	-40801,9112	-24201,3	-4695052,2
195	-40912,4844	-24201,3	-4719253,5
196	-41023,3572	-24201,3	-4743454,8
197	-41134,5305	-24201,3	-4767656,1
198	-41246,0051	-24201,3	-4791857,4
199	-41357,7817	-24201,3	-4816058,7
200	-41469,8613	-24201,3	-4840260
201	-41582,2447	-24201,3	-4864461,3
202	-41694,9325	-24201,3	-4888662,6
203	-41807,9258	-24201,3	-4912863,9
204	-41921,2253	-24201,3	-4937065,2
205	-42034,8318	-24201,3	-4961266,5
206	-42148,7462	-24201,3	-4985467,8
207	-42262,9693	-24201,3	-5009669,1
208	-42377,5019	-24201,3	-5033870,4
209	-42492,345	-24201,3	-5058071,7
210	-42607,4992	-24201,3	-5082273
211	-42722,9656	-24201,3	-5106474,3
212	-42838,7448	-24201,3	-5130675,6
213	-42954,8378	-24201,3	-5154876,9
214	-43071,2454	-24201,3	-5179078,2
215	-43187,9685	-24201,3	-5203279,5
216	-43305,0079	-24201,3	-5227480,8

Fuente: Autores

Cuadro 24. (Continuación) Pronostico del valor de consumo de energía eléctrica por uso de ducha eléctrica

217	-43422,3644	-24201,3	-5251682,1
218	-43540,039	-24201,3	-5275883,4
219	-43658,0326	-24201,3	-5300084,7
220	-43776,3458	-24201,3	-5324286
221	-43894,9797	-24201,3	-5348487,3
222	-44013,9351	-24201,3	-5372688,6
223	-44133,2129	-24201,3	-5396889,9
224	-44252,8139	-24201,3	-5421091,2
225	-44372,739	-24201,3	-5445292,5
226	-44492,9891	-24201,3	-5469493,8
227	-44613,5651	-24201,3	-5493695,1
228	-44734,4679	-24201,3	-5517896,4
229	-44855,6983	-24201,3	-5542097,7
230	-44977,2572	-24201,3	-5566299
231	-45099,1456	-24201,3	-5590500,3
232	-45221,3643	-24201,3	-5614701,6
233	-45343,9142	-24201,3	-5638902,9
234	-45466,7962	-24201,3	-5663104,2
235	-45590,0112	-24201,3	-5687305,5
236	-45713,5601	-24201,3	-5711506,8
237	-45837,4439	-24201,3	-5735708,1
238	-45961,6634	-24201,3	-5759909,4
239	-46086,2195	-24201,3	-5784110,7
240	-46211,1131	-24201,3	\$ (5.808.312,00)

Fuente: Autores

Cuadro 19. Pronostico del valor de consumo de gas natural para uso calentamiento de agua

<i>Mes</i>	<i>Mensualidad</i>	<i>Valor presente</i>	<i>Sumatoria valor presente</i>
0			
1	21882,96	21882,96	21882,96
2	21942,2628	21882,96	43765,92
3	22001,7264	21882,96	65648,88
4	22061,351	21882,96	87531,84
5	22121,1373	21882,96	109414,8
6	22181,0856	21882,96	131297,76
7	22241,1963	21882,96	153180,72
8	22301,47	21882,96	175063,68
9	22361,9069	21882,96	196946,64
10	22422,5077	21882,96	218829,6
11	22483,2727	21882,96	240712,56
12	22544,2024	21882,96	262595,52
13	22605,2972	21882,96	284478,48
14	22666,5575	21882,96	306361,44
15	22727,9839	21882,96	328244,4
16	22789,5767	21882,96	350127,36
17	22851,3365	21882,96	372010,32
18	22913,2636	21882,96	393893,28
19	22975,3585	21882,96	415776,24
20	23037,6218	21882,96	437659,2
21	23100,0537	21882,96	459542,16
22	23162,6549	21882,96	481425,12
23	23225,4257	21882,96	503308,08
24	23288,3666	21882,96	525191,04
25	23351,478	21882,96	547074
26	23414,7605	21882,96	568956,96
27	23478,2145	21882,96	590839,92
28	23541,8405	21882,96	612722,88
29	23605,6389	21882,96	634605,84
30	23669,6102	21882,96	656488,8
31	23733,7548	21882,96	678371,76
32	23798,0733	21882,96	700254,72
33	23862,5661	21882,96	722137,68
34	23927,2336	21882,96	744020,64
35	23992,0764	21882,96	765903,6
36	24057,095	21882,96	787786,56

Fuente: Autores

Cuadro 19. (Continuación) Pronostico del valor de consumo de gas natural para uso calentamiento de agua

<i>Mes</i>	<i>Mensualidad</i>	<i>Valor presente</i>	<i>Sumatoria valor presente</i>
0			
1	21882,96	21882,96	21882,96
2	21942,2628	21882,96	43765,92
3	22001,7264	21882,96	65648,88
4	22061,351	21882,96	87531,84
5	22121,1373	21882,96	109414,8
6	22181,0856	21882,96	131297,76
7	22241,1963	21882,96	153180,72
8	22301,47	21882,96	175063,68
9	22361,9069	21882,96	196946,64
10	22422,5077	21882,96	218829,6
11	22483,2727	21882,96	240712,56
12	22544,2024	21882,96	262595,52
13	22605,2972	21882,96	284478,48
14	22666,5575	21882,96	306361,44
15	22727,9839	21882,96	328244,4
16	22789,5767	21882,96	350127,36
17	22851,3365	21882,96	372010,32
18	22913,2636	21882,96	393893,28
19	22975,3585	21882,96	415776,24
20	23037,6218	21882,96	437659,2
21	23100,0537	21882,96	459542,16
22	23162,6549	21882,96	481425,12
23	23225,4257	21882,96	503308,08
24	23288,3666	21882,96	525191,04
25	23351,478	21882,96	547074
26	23414,7605	21882,96	568956,96
27	23478,2145	21882,96	590839,92
28	23541,8405	21882,96	612722,88
29	23605,6389	21882,96	634605,84
30	23669,6102	21882,96	656488,8
31	23733,7548	21882,96	678371,76
32	23798,0733	21882,96	700254,72
33	23862,5661	21882,96	722137,68
34	23927,2336	21882,96	744020,64
35	23992,0764	21882,96	765903,6
36	24057,095	21882,96	787786,56

Fuente: Autores

Cuadro 19. (Continuación) Pronostico del valor de consumo de gas natural para uso calentamiento de agua

37	24122,2897	21882,96	809669,52
38	24187,6611	21882,96	831552,48
39	24253,2097	21882,96	853435,44
40	24318,9359	21882,96	875318,4
41	24384,8402	21882,96	897201,36
42	24450,9231	21882,96	919084,32
43	24517,1851	21882,96	940967,28
44	24583,6267	21882,96	962850,24
45	24650,2483	21882,96	984733,2
46	24717,0505	21882,96	1006616,16
47	24784,0337	21882,96	1028499,12
48	24851,1984	21882,96	1050382,08
49	24918,5451	21882,96	1072265,04
50	24986,0744	21882,96	1094148
51	25053,7867	21882,96	1116030,96
52	25121,6824	21882,96	1137913,92
53	25189,7622	21882,96	1159796,88
54	25258,0264	21882,96	1181679,84
55	25326,4757	21882,96	1203562,8
56	25395,1104	21882,96	1225445,76
57	25463,9312	21882,96	1247328,72
58	25532,9384	21882,96	1269211,68
59	25602,1327	21882,96	1291094,64
60	25671,5145	21882,96	1312977,6
61	25741,0843	21882,96	1334860,56
62	25810,8426	21882,96	1356743,52
63	25880,79	21882,96	1378626,48
64	25950,927	21882,96	1400509,44
65	26021,254	21882,96	1422392,4
66	26091,7716	21882,96	1444275,36
67	26162,4803	21882,96	1466158,32
68	26233,3806	21882,96	1488041,28
69	26304,473	21882,96	1509924,24
70	26375,7582	21882,96	1531807,2
71	26447,2365	21882,96	1553690,16
72	26518,9085	21882,96	1575573,12

Fuente: Autores

Cuadro 19. (Continuación) Pronostico del valor de consumo de gas natural para uso calentamiento de agua

73	26590,7747	21882,96	1597456,08
74	26662,8357	21882,96	1619339,04
75	26735,092	21882,96	1641222
76	26807,5441	21882,96	1663104,96
77	26880,1926	21882,96	1684987,92
78	26953,0379	21882,96	1706870,88
79	27026,0806	21882,96	1728753,84
80	27099,3213	21882,96	1750636,8
81	27172,7604	21882,96	1772519,76
82	27246,3986	21882,96	1794402,72
83	27320,2364	21882,96	1816285,68
84	27394,2742	21882,96	1838168,64
85	27468,5127	21882,96	1860051,6
86	27542,9524	21882,96	1881934,56
87	27617,5938	21882,96	1903817,52
88	27692,4374	21882,96	1925700,48
89	27767,4839	21882,96	1947583,44
90	27842,7338	21882,96	1969466,4
91	27918,1876	21882,96	1991349,36
92	27993,8459	21882,96	2013232,32
93	28069,7092	21882,96	2035115,28
94	28145,7782	21882,96	2056998,24
95	28222,0532	21882,96	2078881,2
96	28298,535	21882,96	2100764,16
97	28375,224	21882,96	2122647,12
98	28452,1209	21882,96	2144530,08
99	28529,2261	21882,96	2166413,04
100	28606,5403	21882,96	2188296
101	28684,064	21882,96	2210178,96
102	28761,7979	21882,96	2232061,92
103	28839,7423	21882,96	2253944,88
104	28917,898	21882,96	2275827,84
105	28996,2655	21882,96	2297710,8
106	29074,8454	21882,96	2319593,76
107	29153,6382	21882,96	2341476,72
108	29232,6446	21882,96	2363359,68
	29311,8651	21882,96	2385242,64

Fuente: Autores

Cuadro 19. (Continuación) Pronostico del valor de consumo de gas natural para uso calentamiento de agua

	109	29311,8651	21882,96	2385242,64
110	29391,3002	21882,96	2407125,6	
111	29470,9507	21882,96	2429008,56	
112	29550,8169	21882,96	2450891,52	
113	29630,8996	21882,96	2472774,48	
114	29711,1994	21882,96	2494657,44	
115	29791,7167	21882,96	2516540,4	
116	29872,4523	21882,96	2538423,36	
117	29953,4066	21882,96	2560306,32	
118	30034,5804	21882,96	2582189,28	
119	30115,9741	21882,96	2604072,24	
120	30197,5884	21882,96	2625955,2	
121	30279,4238	21882,96	2647838,16	
122	30361,4811	21882,96	2669721,12	
123	30443,7607	21882,96	2691604,08	
124	30526,2633	21882,96	2713487,04	
125	30608,9894	21882,96	2735370	
126	30691,9398	21882,96	2757252,96	
127	30775,115	21882,96	2779135,92	
128	30858,5155	21882,96	2801018,88	
129	30942,1421	21882,96	2822901,84	
130	31025,9953	21882,96	2844784,8	
131	31110,0758	21882,96	2866667,76	
132	31194,3841	21882,96	2888550,72	
133	31278,9208	21882,96	2910433,68	
134	31363,6867	21882,96	2932316,64	
135	31448,6823	21882,96	2954199,6	
136	31533,9082	21882,96	2976082,56	
137	31619,3651	21882,96	2997965,52	
138	31705,0536	21882,96	3019848,48	
139	31790,9743	21882,96	3041731,44	
140	31877,1278	21882,96	3063614,4	
141	31963,5149	21882,96	3085497,36	
142	32050,136	21882,96	3107380,32	
143	32136,9919	21882,96	3129263,28	
144	32224,0831	21882,96	3151146,24	

Fuente: Autores

Cuadro 19. (Continuación) Pronostico del valor de consumo de gas natural para uso calentamiento de agua

145	32311,4104	21882,96	3173029,2
146	32398,9743	21882,96	3194912,16
147	32486,7755	21882,96	3216795,12
148	32574,8147	21882,96	3238678,08
149	32663,0924	21882,96	3260561,04
150	32751,6094	21882,96	3282444
151	32840,3663	21882,96	3304326,96
152	32929,3637	21882,96	3326209,92
153	33018,6022	21882,96	3348092,88
154	33108,0826	21882,96	3369975,84
155	33197,8055	21882,96	3391858,8
156	33287,7716	21882,96	3413741,76
157	33377,9815	21882,96	3435624,72
158	33468,4358	21882,96	3457507,68
159	33559,1352	21882,96	3479390,64
160	33650,0805	21882,96	3501273,6
161	33741,2722	21882,96	3523156,56
162	33832,7111	21882,96	3545039,52
163	33924,3977	21882,96	3566922,48
164	34016,3328	21882,96	3588805,44
165	34108,5171	21882,96	3610688,4
166	34200,9512	21882,96	3632571,36
167	34293,6358	21882,96	3654454,32
168	34386,5715	21882,96	3676337,28
169	34479,7591	21882,96	3698220,24
170	34573,1993	21882,96	3720103,2
171	34666,8926	21882,96	3741986,16
172	34760,8399	21882,96	3763869,12
173	34855,0418	21882,96	3785752,08
174	34949,499	21882,96	3807635,04
175	35044,2121	21882,96	3829518
176	35139,1819	21882,96	3851400,96
177	35234,4091	21882,96	3873283,92
178	35329,8943	21882,96	3895166,88
179	35425,6384	21882,96	3917049,84
180	35521,6418	21882,96	3938932,8

Fuente: Autores

Cuadro 19. (Continuación) Pronostico del valor de consumo de gas natural para uso calentamiento de agua

181	35617,9055	21882,96	3960815,76
182	35714,43	21882,96	3982698,72
183	35811,2161	21882,96	4004581,68
184	35908,2645	21882,96	4026464,64
185	36005,5759	21882,96	4048347,6
186	36103,151	21882,96	4070230,56
187	36200,9906	21882,96	4092113,52
188	36299,0952	21882,96	4113996,48
189	36397,4658	21882,96	4135879,44
190	36496,1029	21882,96	4157762,4
191	36595,0074	21882,96	4179645,36
192	36694,1798	21882,96	4201528,32
193	36793,6211	21882,96	4223411,28
194	36893,3318	21882,96	4245294,24
195	36993,3127	21882,96	4267177,2
196	37093,5646	21882,96	4289060,16
197	37194,0881	21882,96	4310943,12
198	37294,8841	21882,96	4332826,08
199	37395,9533	21882,96	4354709,04
200	37497,2963	21882,96	4376592
201	37598,914	21882,96	4398474,96
202	37700,807	21882,96	4420357,92
203	37802,9762	21882,96	4442240,88
204	37905,4223	21882,96	4464123,84
205	38008,146	21882,96	4486006,8
206	38111,148	21882,96	4507889,76
207	38214,4292	21882,96	4529772,72
208	38317,9904	21882,96	4551655,68
209	38421,8321	21882,96	4573538,64
210	38525,9553	21882,96	4595421,6
211	38630,3606	21882,96	4617304,56
212	38735,0489	21882,96	4639187,52
213	38840,0209	21882,96	4661070,48
214	38945,2773	21882,96	4682953,44
215	39050,819	21882,96	4704836,4
216	39156,6467	21882,96	4726719,36

Fuente: Autores

Cuadro 19. (Continuación) Pronostico del valor de consumo de gas natural para uso calentamiento de agua

217	39262,7613	21882,96	4748602,32
218	39369,1633	21882,96	4770485,28
219	39475,8538	21882,96	4792368,24
220	39582,8333	21882,96	4814251,2
221	39690,1028	21882,96	4836134,16
222	39797,663	21882,96	4858017,12
223	39905,5147	21882,96	4879900,08
224	40013,6586	21882,96	4901783,04
225	40122,0956	21882,96	4923666
226	40230,8265	21882,96	4945548,96
227	40339,852	21882,96	4967431,92
228	40449,173	21882,96	4989314,88
229	40558,7903	21882,96	5011197,84
230	40668,7046	21882,96	5033080,8
231	40778,9168	21882,96	5054963,76
232	40889,4277	21882,96	5076846,72
233	41000,238	21882,96	5098729,68
234	41111,3487	21882,96	5120612,64
235	41222,7604	21882,96	5142495,6
236	41334,4741	21882,96	5164378,56
237	41446,4905	21882,96	5186261,52
238	41558,8105	21882,96	5208144,48
239	41671,4349	21882,96	5230027,44
240	41784,3645	21882,96	5251910,4

Fuente: Autores