



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN, INNOVACIÓN Y
TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA**

CENTRO DE POSGRADOS

MAESTRÍA EN ENERGÍAS RENOVABLES

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE MAGÍSTER EN: ENERGÍAS RENOVABLES**

**TEMA: “DESARROLLO DE UN SISTEMA HÍBRIDO DE
CALENTAMIENTO DE AGUA MEDIANTE RADIACIÓN SOLAR Y
ENERGÍA ELÉCTRICA”**

AUTOR: RUALES BASTIDAS, FERNANDO AUGUSTO

DIRECTOR: PhD. DELGADO GARCÍA, REINALDO

SANGOLQUÍ

2020



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN, INNOVACIÓN Y TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA CENTRO DE POSGRADOS

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “**DESARROLLO DE UN SISTEMA HÍBRIDO DE CALENTAMIENTO DE AGUA MEDIANTE RADIACIÓN SOLAR Y ENERGÍA ELÉCTRICA**” fue realizado por el señor **Ruales Bastidas, Fernando Augusto**, con cédula de identidad No.1715826598, el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto, cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 24 de junio de 2019

Firma:

ING. REINALDO DELGADO GARCIA., PhD.

C.C.: 1750580266

DIRECTOR



VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN, INNOVACIÓN Y TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA

CENTRO DE POSGRADOS

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, **Ruales Bastidas, Fernando Augusto**, con cédula de ciudadanía No.1715826598, delcaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **“DESARROLLO DE UN SISTEMA HÍBRIDO DE CALENTAMIENTO DE AGUA MEDIANTE RADIACIÓN SOLAR Y ENERGÍA ELÉCTRICA”** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Sangolquí, 28 de enero de 2020

Firma:

ING. FERNANDO AUGUSTO RUALES BASTIDAS

C.C.: 1715826598



**VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN, INNOVACIÓN Y
TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA**

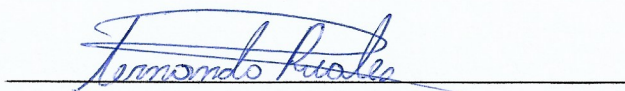
CENTRO DE POSGRADOS

AUTORIZACIÓN

Yo, **Ruales Bastidas, Fernando Augusto**, con cédula de identidad No. 1715826598, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **“DESARROLLO DE UN SISTEMA HÍBRIDO DE CALENTAMIENTO DE AGUA MEDIANTE RADIACIÓN SOLAR Y ENERGÍA ELÉCTRICA”** en el Repositorio Institucional cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 28 de enero de 2020

Firma:



ING. FERNANDO AUGUSTO RUALES BASTIDAS

C.C.: 1715826598



VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN, INNOVACIÓN Y TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA

CENTRO DE POSGRADOS

DEDICATORIA

A mi esposa Karla por su dedicación, abnegación e infinito amor,

A mis hijos Cristina y Alejandro por ser la inocencia que inspira mi vida,

A mis Padres que siempre han guiado mi camino con su ejemplo,



VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN, INNOVACIÓN Y TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA

CENTRO DE POSGRADOS

AGRADECIMIENTO

A mi esposa Karla quien influyó de manera decisiva para iniciar y elaborar este proyecto.

A mis padres Carlos y Susana quienes con su insistencia lograron ver la culminación del mismo.

A toda mi familia y amigos que directa e indirectamente han contribuido con la elaboración de este proyecto.

Al Director Dr. Delgado y Coordinador Dr. Goyos de este proyecto que con su ayuda generosa han sido partícipes en la elaboración y culminación del mismo.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

| | |
|--|------|
| CERTIFICACIÓN..... | i |
| AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD..... | ii |
| AUTORIZACIÓN..... | iii |
| DEDICATORIA..... | iv |
| AGRADECIMIENTO..... | v |
| ÍNDICE DE CONTENIDOS..... | vi |
| ÍNDICE DE TABLAS..... | x |
| ÍNDICE DE FIGURAS..... | xi |
| RESUMEN..... | xv |
| ABSTRACT..... | xvii |
| CAPÍTULO 1..... | 1 |
| DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO..... | 1 |
| 1.1 ANTECEDENTES..... | 1 |
| 1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA..... | 2 |
| 1.3 ESTADO ACTUAL DEL DESARROLLO DEL ARTE..... | 2 |
| 1.4 OBJETIVOS..... | 4 |
| 1.4.1 GENERAL..... | 4 |
| 1.4.2 ESPECÍFICOS..... | 4 |
| 1.5 ALCANCE DEL PROYECTO..... | 5 |
| 1.6 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA..... | 5 |
| CAPÍTULO 2..... | 9 |
| MARCO TEÓRICO..... | 9 |
| 2.1 SITUACIÓN ENERGÉTICA MUNDIAL..... | 9 |
| 2.1.1 DEMANDA DE ENERGÍA EN EL MUNDO..... | 9 |
| 2.1.2 OFERTA DE ENERGÍA EN EL MUNDO..... | 11 |

| | |
|--|----|
| 2.1.3 USO DE LA ENERGÍA EN EL MUNDO | 12 |
| 2.2 SITUACIÓN DE ENERGÍA EN ECUADOR..... | 15 |
| 2.2.1 DEMANDA DE ENERGÍA EN EL ECUADOR..... | 15 |
| 2.2.2 USO DE LA ENERGÍA EN EL ECUADOR..... | 17 |
| 2.2.3 OFERTA DE ENERGÍA EN EL ECUADOR | 19 |
| 2.3 SUBSIDIOS ENERGÉTICOS EN EL ECUADOR | 20 |
| CAPÍTULO 3..... | 22 |
| MODELAMIENTO MATEMATICO CAPTADOR SOLAR | 22 |
| 3.1 DESARROLLO MODELO DE SISTEMA DE CAPTACION SOLAR | 22 |
| 3.1.1 CALEFACTOR SOLAR HÍBRIDO DE AGUA PARA USO SANITARIO..... | 24 |
| 3.1.2 CÁLCULOS DE LA CONDUCTANCIA TÉRMICA Y PÉRDIDAS EN EL COLECTOR SOLAR PLANO | 29 |
| 3.1.3 DESCRIPCION DEL MODELO MATEMÁTICO..... | 33 |
| 3.1.4 ELABORACION DEL MODELO MATEMATICO DEL COLECTOR | 37 |
| CAPÍTULO 4..... | 43 |
| SIMULACIÓN DEL SISTEMA HIBRIDO..... | 43 |
| 4.1 MODELAMIENTO EXPERIMENTAL DE LAS FUNCIONES DE TRANSFERENCIA DEL COLECTOR SOLAR | 43 |
| 4.1.1 DESCRIPCIÓN DEL MODELAMIENTO DE LAS FUNCIONES DE TRANSFERENCIA | 43 |
| 4.2 VALIDACIÓN DEL MODELO TEÓRICO | 47 |
| 4.2.1 FACTOR DE CORRECCION DE LA ECUACION DIFERENCIAL DEL COLECTOR SOLAR..... | 52 |
| 4.2.2 FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DEL COLECTOR SOLAR | 59 |
| 4.2.3 REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA SOLUCIÓN DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DEL COLECTOR SOLAR | 62 |

| | |
|---|----|
| CAPÍTULO 5..... | 65 |
| CONSTRUCCIÓN Y PUESTA EN MARCHA DEL PROTOTIPO..... | 65 |
| 5.1 DESCRIPCIÓN DE LOS ELEMENTOS DEL SISTEMA | 65 |
| 5.1.1 TUBOS DE COBRE | 65 |
| 5.1.2 PLACA COLECTORA..... | 66 |
| 5.1.3 CAJA COLECTORA | 67 |
| 5.1.4 TANQUE DE ALMACENAMIENTO | 67 |
| 5.1.5 SISTEMA DE RECOLECCIÓN, ALMACENAMIENTO DE DATOS y CONTROL DE TEMPERATURA (PLC) | 68 |
| 5.1.6 SISTEMA COLECTOR SOLAR HIBRIDO | 69 |
| 5.2 PUESTA EN MARCHA DEL SISTEMA | 69 |
| 5.3 PROCEDIMIENTO DE OBTENCIÓN DE DATOS DEL CALENTADOR DE AGUA HÍBRIDO SOLAR-ELECTRICO..... | 73 |
| 5.3.1 CONEXIÓN DEL CABLE DE COMUNICACIÓN..... | 73 |
| 5.3.2 INSTALACIÓN DE LA MÁQUINA VIRTUAL..... | 73 |
| 5.3.3 EJECUCIÓN DE LA MÁQUINA VIRTUAL EN EL SISTEMA | 78 |
| 5.3.4 IDENTIFICACIÓN DE PUERTO DE COMUNICACIONES EN EL SISTEMA..... | 79 |
| 5.3.5 INICIO DEL PROGRAMA DE TOMA DE DATOS EN TIEMPO REAL..... | 82 |
| 5.3.6 VISUALIZACIÓN DE VARIABLES EN TIEMPO REAL..... | 86 |
| 5.4 LECTURA DE DATOS | 88 |
| CAPÍTULO 6..... | 95 |
| PRUEBAS DEL SISTEMA..... | 95 |
| 6.1 PRUEBAS Y PUESTA EN MARCHA..... | 95 |
| 6.2 RESULTADOS Y VALIDACIÓN DEL SISTEMA | 98 |

| | |
|--|-----|
| 6.2.1 EFICIENCIA MODELOS DE COMPORTAMIENTO | 98 |
| 6.3 COMPARACIÓN DE UN SISTEMA HÍBRIDO VS UN SISTEMA CONVENCIONAL ELÉCTRICO..... | 104 |
| 6.3.1 CÁLCULO DE ENERGÍA GENERADA POR EL COLECTOR..... | 105 |
| 6.3.2 CÁLCULO DE ENERGÍA GENERADA POR LAS RESISTENCIAS ELÉCTRICAS | 106 |
| 6.3.3 COMPARACIÓN TOTAL DE ENERGÍA GENERADA POR DEL COLECTOR VS ENERGÍA ELÉCTRICA..... | 107 |
| CAPÍTULO 7..... | 109 |
| EVALUACIÓN ECONÓMICA Y FINANCIERA | 109 |
| 7.1 AHORRO ENERGÉTICO DEL SISTEMA HÍBRIDO | 109 |
| 7.2 ANÁLISIS DE COSTOS DEL SISTEMA HÍBRIDO | 110 |
| 7.2.1 MATERIALES Y EQUIPOS..... | 110 |
| 7.2.2 CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE | 111 |
| 7.2.3 RESUMEN DE COSTOS | 111 |
| 7.2.4 ANÁLISIS DE RENTABILIDAD DEL SISTEMA HÍBRIDO VS SISTEMA ELÉCTRICO..... | 111 |
| 7.2.5 ANÁLISIS DE RENTABILIDAD DEL SISTEMA HÍBRIDO VS SISTEMA A GAS..... | 114 |
| CAPÍTULO 8..... | 117 |
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... | 117 |
| 8.1 CONCLUSIONES | 117 |
| 8.2 RECOMENDACIONES..... | 118 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 119 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|------------|
| <i>Tabla 1. Demanda mundial de energía primaria en Mtoe.....</i> | <i>6</i> |
| <i>Tabla 2. Consumo agua [m3] por persona al año.....</i> | <i>18</i> |
| <i>Tabla 3. Datos de heliofanía en el Ecuador.....</i> | <i>22</i> |
| <i>Tabla 4. Valores de energía y potencia solar en área de estudio.....</i> | <i>23</i> |
| <i>Tabla 5. Potencia sugerida para el apoyo eléctrico.....</i> | <i>28</i> |
| <i>Tabla 6. Conductividades terminas de materiales.....</i> | <i>32</i> |
| <i>Tabla 7. Coeficiente de transferencia de calor.....</i> | <i>33</i> |
| <i>Tabla 8. Representación del retardo en Laplace.....</i> | <i>61</i> |
| <i>Tabla 9. Datos obtenidos del PLC.....</i> | <i>71</i> |
| <i>Tabla 10. Datos obtenidos mediante el PLC.....</i> | <i>96</i> |
| <i>Tabla 11. Datos experimentales de temperaturas.....</i> | <i>100</i> |
| <i>Tabla 12. Cálculos de potencia y eficiencia experimentales.....</i> | <i>102</i> |
| <i>Tabla 13. Cálculos de energía térmica solar vs energía eléctrica.....</i> | <i>104</i> |
| <i>Tabla 14. Comparación energía colector vs energía eléctrica.....</i> | <i>107</i> |
| <i>Tabla 15. Energía total del colector vs eléctrica.....</i> | <i>107</i> |
| <i>Tabla 16. Fuentes de energía usadas para el calentamiento de agua.....</i> | <i>109</i> |
| <i>Tabla 17. Costos de materiales y equipos para el sistema solar híbrido.....</i> | <i>110</i> |
| <i>Tabla 18. Costos de construcción y montaje para el sistema solar híbrido.....</i> | <i>111</i> |
| <i>Tabla 19. Resumen de costos del proyecto.....</i> | <i>111</i> |
| <i>Tabla 20. Costos de consumo de energía.....</i> | <i>112</i> |
| <i>Tabla 21. Consumo energético mensual familia tipo.....</i> | <i>112</i> |
| <i>Tabla 22. Consumo energía sistema híbrido vs sistema eléctrico.....</i> | <i>113</i> |
| <i>Tabla 23. Costos totales del sistema.....</i> | <i>113</i> |
| <i>Tabla 24. Consumo energía sistema híbrido vs sistema gas.....</i> | <i>115</i> |
| <i>Tabla 25. Costos totales del sistema.....</i> | <i>115</i> |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|-----------|
| <i>Figura 1. Crecimiento demanda de energía a nivel mundial.....</i> | <i>9</i> |
| <i>Figura 2. Proyección de la demanda energética a nivel mundial.....</i> | <i>10</i> |
| <i>Figura 3. Evolución de la oferta de energía mundial.....</i> | <i>11</i> |
| <i>Figura 4. Oferta de energía mundial 2010.....</i> | <i>12</i> |
| <i>Figura 5. Sistema global del uso de la energía en Mtoe.....</i> | <i>13</i> |
| <i>Figura 6. Consumo de energía mundial por sector.....</i> | <i>14</i> |
| <i>Figura 7. Uso final de la energía en la residencia.....</i> | <i>15</i> |
| <i>Figura 8. Matriz energética Ecuador.....</i> | <i>16</i> |
| <i>Figura 9. Demanda de energía total en Ecuador por fuente en Kbeq.....</i> | <i>16</i> |
| <i>Figura 10. Demanda de energía total primaria en Ecuador por sector.</i> | <i>17</i> |
| <i>Figura 11. Uso final de la energía en residencias.....</i> | <i>19</i> |
| <i>Figura 12. Matriz energética de oferta en Ecuador.....</i> | <i>19</i> |
| <i>Figura 13. Subsidios por tipo de energía primaria</i> | <i>21</i> |
| <i>Figura 14. Datos experimentales de radiación solar.....</i> | <i>24</i> |
| <i>Figura 15. Sistema para calentamiento de agua.</i> | <i>25</i> |
| <i>Figura 16. Componentes del sistema de captación solar.</i> | <i>26</i> |
| <i>Figura 17. Tanque de almacenamiento sin intercambiador.</i> | <i>26</i> |
| <i>Figura 18. Sistema de apoyo eléctrico.....</i> | <i>27</i> |
| <i>Figura 19. Nusselt vs L y Beta.....</i> | <i>29</i> |
| <i>Figura 20. Resistencia en función de L.....</i> | <i>30</i> |
| <i>Figura 21. Resistencia en función de Beta</i> | <i>30</i> |
| <i>Figura 22. UL en función de L</i> | <i>31</i> |
| <i>Figura 23. UL en función de Beta</i> | <i>31</i> |
| <i>Figura 24. Ingreso de datos en System Identification Tool.....</i> | <i>45</i> |

| | |
|--|----|
| <i>Figura 25. Radiación u_1 y Temperatura de salida del colector y1</i> | 45 |
| <i>Figura 26. Modelos simulados por Matlab</i> | 46 |
| <i>Figura 27. Respuesta al escalón unitario</i> | 47 |
| <i>Figura 28. Respuesta del sistema al escalón unitario con $T=1580s$</i> | 50 |
| <i>Figura 29. Respuesta al escalón unitario del sistema con $T=528s$</i> | 51 |
| <i>Figura 30. T_c en función de factor de ajuste $Farb$</i> | 54 |
| <i>Figura 31. Caudal en función del factor de ajuste</i> | 55 |
| <i>Figura 32. Constante de tiempo t_c en función del caudal y el factor $Farb$</i> | 55 |
| <i>Figura 33. Flujo en función de la constante de tiempo y el factor $Farb$</i> | 56 |
| <i>Figura 34. Pérdidas térmicas en función del coeficiente ($Farb$)</i> | 57 |
| <i>Figura 35. Ajuste de eficiencia en función de $Farb$</i> | 58 |
| <i>Figura 36. Simulación del modelo mediante Simulink</i> | 60 |
| <i>Figura 37. Comparación temperatura de salida medida y calculada por el modelo</i> .. | 60 |
| <i>Figura 38. Gráficas de radiación y temperaturas</i> | 63 |
| <i>Figura 39. Temperaturas del colector teóricas y experimentales</i> | 64 |
| <i>Figura 40. Tubos de cobre de media pulgada</i> | 65 |
| <i>Figura 41. Soldadura de placa de cobre</i> | 66 |
| <i>Figura 42. Placa colectora</i> | 66 |
| <i>Figura 43. Caja colectora con lamina reflectora en la base</i> | 67 |
| <i>Figura 44. Tanque de almacenamiento con orificios para resistencias eléctricas</i> | 68 |
| <i>Figura 45. PLC</i> | 68 |
| <i>Figura 46. Sistema colector solar hibrido</i> | 69 |
| <i>Figura 47. Cables de alimentación del sistema</i> | 70 |
| <i>Figura 48. Sensor de luminosidad</i> | 70 |
| <i>Figura 49. Variables recolectadas por el PLC</i> | 72 |
| <i>Figura 50. Conexión cable comunicaciones</i> | 73 |
| <i>Figura 51. Contenido de la carpeta "MAQUINA VIRTUAL"</i> | 74 |

| | |
|---|----|
| <i>Figura 52. Contenido de la carpeta "vmware 7"</i> | 74 |
| <i>Figura 53. Archivo ejecutable wmware</i> | 75 |
| <i>Figura 54. Mensaje de vmware</i> | 75 |
| <i>Figura 55. Instalación de la máquina virtual</i> | 76 |
| <i>Figura 56. Mensaje de instalación "vmware"</i> | 76 |
| <i>Figura 57. Mensaje de instalación "vmware"</i> | 77 |
| <i>Figura 58. Ventana de inicio de la máquina virtual</i> | 77 |
| <i>Figura 59. Conflicto de fecha de licencia de LabView</i> | 78 |
| <i>Figura 60. Archivo ejecutable de la máquina virtual</i> | 78 |
| <i>Figura 61. Inicio de la máquina virtual</i> | 79 |
| <i>Figura 62. Inicio Windows XP</i> | 79 |
| <i>Figura 63. Panel de control Windows XP</i> | 80 |
| <i>Figura 64. Propiedades del sistema</i> | 80 |
| <i>Figura 65. Propiedades del Sistema</i> | 81 |
| <i>Figura 66. Ventana de puertos de comunicación</i> | 81 |
| <i>Figura 67. Ventana inicio Labveiw</i> | 83 |
| <i>Figura 68. Buscar carpeta DATOS COLECTOR HIBRIDO FR</i> | 83 |
| <i>Figura 69. Carpeta PROGRAMAS EJECUCION</i> | 84 |
| <i>Figura 70. Archivos carpeta PROGRAMAS EJECUCION</i> | 84 |
| <i>Figura 71. Programa de lectura datos tiempo real</i> | 85 |
| <i>Figura 72. Selección del puerto de comunicación en Labview</i> | 85 |
| <i>Figura 73. Icono de flecha RUN</i> | 86 |
| <i>Figura 74. Icono de flecha RUN CONTINUOUSLY</i> | 86 |
| <i>Figura 75. Variables de monitoreo</i> | 87 |
| <i>Figura 76. Parar el programa de monitoreo</i> | 87 |
| <i>Figura 77. Botón de STOP de LabView no debe ser usado</i> | 88 |
| <i>Figura 78. Carpeta PROGRAMAS EJECUCION</i> | 88 |

| | |
|---|-----|
| <i>Figura 79. Contenido carpeta PANEL TOMA DATOS</i> | 89 |
| <i>Figura 80. Archivo PANEL SOLAR</i> | 89 |
| <i>Figura 81. Ventana de proyectos de LabView</i> | 90 |
| <i>Figura 82. Selección puerto de comunicaciones y ejecución programa RUN</i> | 91 |
| <i>Figura 83. Ejecución del programa de toma de datos</i> | 91 |
| <i>Figura 84. Botón TOMAR DATOS en verde</i> | 92 |
| <i>Figura 85. Fecha última descarga</i> | 93 |
| <i>Figura 86. Botón STOP para detener la descarga de datos</i> | 93 |
| <i>Figura 87. Botón de STOP de LabView</i> | 94 |
| <i>Figura 88. Almacenamiento de datos en el disco</i> | 94 |
| <i>Figura 89. Variables de monitoreo del sistema</i> | 95 |
| <i>Figura 90. Temperatura ambiente vs tanque almacenamiento</i> | 97 |
| <i>Figura 91. Temperatura de entrada y salida colector</i> | 98 |
| <i>Figura 92. Costos totales anualizados sistema eléctrico vs híbrido</i> | 114 |
| <i>Figura 93. Costos totales anualizados sistema gas vs híbrido</i> | 115 |

RESUMEN

El proyecto mostrado a continuación trata sobre la elaboración de un sistema de calentamiento de agua híbrido usando una combinación de tecnologías solar y eléctrica.

En la primera parte del proyecto se realiza un modelamiento de las variables físicas que intervienen en el dimensionamiento del sistema mediante el uso del software Matlab a fin de determinar la combinación más adecuada de las variables para luego proceder a la construcción y pruebas del sistema de calentamiento.

Durante la construcción del sistema se incorpora un tipo de placa de absorción de calor con una geometría innovadora que permite aumentar la absorción de calor comparado con los modelos de calentamiento solar convencionales. Adicionalmente se instala el sistema eléctrico de respaldo, el mismo que es controlado mediante un PLC (controlador lógico programable), en donde también se registran los tiempos de funcionamiento del respaldo solar para posteriormente ser cuantificados a fin de estimar los rendimientos totales del sistema.

Finalmente se realiza un modelamiento del sistema en Matlab a fin de determinar el comportamiento de este y comparar los resultados obtenidos en el modelo experimental con los resultados teóricos de Matlab.

Mediante los resultados teóricos y experimentales obtenidos se calculan las eficiencias del sistema híbrido solar eléctrico para determinar la viabilidad de este a nivel comercial al compararlo con los sistemas convencionales.

PALABRAS CLAVE

- **SISTEMA DE CALENTAMIENTO HÍBRIDO SOLAR ELÉCTRICO**
- **GEOMETRÍA PLACA ABSORVEDORA**
- **MODELAMIENTO SISTEMA MATLAB**
- **RESPALDO ELECTRICO CON PLC**

ABSTRACT

This Project describes the physical modeling and construction of a hybrid water heater system using the combination of solar and electrical energies as a heat source.

A novel geometry is used for the absorber plate which is intended to increase the amount of solar heat collected thus increasing the efficiency of the collector system per unit of area.

The system is modeled using Matlab to obtain theoretical results which are compared with the experimental results in order to determine the validity of the mathematical model.

The results are also used to validate the efficiency of the system and its feasibility on the current local market by comparing it with the conventional models.

KEY WORDS:

- **HIBIRD SOLAR ELECTRICAL WATER HEATER SYSTEM**
- **ABSORVER PLATE**
- **MATLAB SYSTEM MODELING**

CAPÍTULO 1

DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

1.1 ANTECEDENTES

El cambio climático, la continua transformación del mapa energético global y la elevada dependencia del Ecuador de fuentes de energía no renovables para su consumo interno hacen indispensable iniciar la investigación de proyectos de uso de energías proveniente de fuentes renovables como la solar que tiene marcadas ventajas debido a su suministro ilimitado y una proyección de rápido crecimiento en las próximas décadas (International Energy Agency (IEA), 2015), (Castro, 2011).

De acuerdo con los datos que maneja la SENPLADES¹, la demanda doméstica energética del Ecuador está basada en su mayor parte en fuentes no renovables derivadas del petróleo, las mismas que representan aproximadamente el 79% del consumo total. Por lo tanto, en su definición de las estrategias para el buen vivir se considera el cambio de la matriz energética en la que se incluye el uso de fuentes renovables (SENPLADES, 2013).

En este contexto el MIPRO² ha emprendido un programa de desarrollo de capacidades técnicas y productivas mediante el uso de energías renovables. Como ejemplo de esto se destaca la entrega de paneles solares térmicos en la provincia del Napo a fin de reducir parcialmente el uso de GLP³ en calentamiento de agua para uso sanitario (MIPRO, 2013).

¹ SENPLADES. Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo

² MIPRO. Ministerio de Industrias y Productividad.

³ GLP. Gas licuado de petróleo.

Adicionalmente es necesario tomar en cuenta el Decreto Ejecutivo 1815, promulgado el primero de julio del 2009, que declara como política de estado la adaptación y mitigación al cambio climático.

Dentro de estos lineamientos se evidencia la necesidad de implementar proyectos que hagan factible el uso de energías renovables para el desarrollo sostenible de la población.

1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Como resultado del Decreto Ejecutivo 1815 los programas emprendidos en la actualidad por las entidades gubernamentales se han enfocado casi en su totalidad en la eficiencia energética del uso la energía eléctrica, sin embargo, no se ha considerado el potencial térmico solar como un medio a gran escala de sustitución de las energías convencionales empleadas para uso doméstico de calentamiento de agua sanitaria como el GLP o la energía eléctrica (MIPRO, 2013)

No se ha estudiado ni desarrollado un producto para el mercado local adaptado a las condiciones económicas y climáticas del país que cumpla con las características de eficiencia establecidas por la norma de referencia teniendo en cuenta el uso combinado de energía solar y eléctrica de manera más eficiente para el usuario final (Cámara de la construcción de Quito, 2009), (UE, 2006)

1.3 ESTADO ACTUAL DEL DESARROLLO DEL ARTE

En la actualidad la investigación y desarrollo de los sistemas de calentamiento de agua para uso sanitario mediante el uso de energías alternativas se enfoca en dos áreas fundamentales:

- Mejoramiento de la tecnología existente mediante el desarrollo de nuevos materiales aislantes y conductores térmicos a fin de incrementar la eficiencia (Orozco, 2006).
- Análisis y modelamiento numérico de los sistemas desarrollados a fin de determinar las áreas de mejora en la eficiencia (Klein, 1973), (Pillajo & Castillo, 2007).

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 GENERAL

Desarrollar un sistema híbrido de calentamiento de agua por medio del uso radiación solar y energía eléctrica para la evaluación de sus características de eficiencia operativas.

1.4.2 ESPECÍFICOS

- Investigar el estado actual del desarrollo del arte.
- Realizar un análisis del material de fabricación de los tubos y la placa de absorción del colector solar a fin de mejorar su utilidad en función del costo.
- Analizar y determinar un método de cálculo que permita optimizar el área de transferencia de calor en función del espaciamiento, el diámetro y la longitud de los tubos del colector a fin de elaborar un modelo matemático.
- Obtener los patrones de acumulación de calor en el tanque de almacenamiento de agua considerando parámetros como el espesor y aislamiento adecuados.
- Calcular la fracción solar en el área de influencia para determinar la cantidad de energía eléctrica de respaldo necesaria para optimizar el consumo energético.
- Determinar la mejor configuración y funcionamiento de las resistencias eléctricas internas para optimizar el respaldo eléctrico en los días de poca radiación solar.
- Estimar el consumo anual de potencia eléctrica del prototipo y el ahorro de energía obtenido por medio de la radiación solar aprovechada.
- Realizar un análisis técnico económico del prototipo en función de las condiciones climáticas y económicas del país.

- Promover la eficiencia energética en el Ecuador al aprovechar de mejor manera sus recursos naturales.

1.5 ALCANCE DEL PROYECTO

Desarrollar un calefactor híbrido solar y eléctrico de agua adaptado a las circunstancias del Ecuador potenciando sus características a través de un análisis de los parámetros de diseño, los costos de construcción y su eficiencia operativa.

1.6 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA

El contexto energético global está cambiando rápidamente debido principalmente a la volatilidad del mercado de los combustibles fósiles. Parte de la oferta energética a nivel mundial está tomando un giro hacia las fuentes renovables dado el rápido crecimiento en el uso de energías como la eólica y solar (International Energy Agency (IEA), 2015). Sin embargo, el mundo todavía tiene una gran deficiencia en lo que respecta a la oferta de energía más sustentable y limpia (Altomonte, Coviello, & Cuevas, 2004).

Se estima que la demanda de energía a nivel global crecerá un 30% hacia el 2035 en donde las energías renovables serán la segunda fuente de generación de electricidad, teniendo una brecha muy cercana respecto al uso proyectado del carbón (International Energy Agency (IEA), 2015).

Este rápido incremento en el uso de energías renovables estará sustentado por la reducción constante en los costos de la tecnología, el incremento en el precio de los combustibles fósiles y principalmente por el incremento en los subsidios a estas nuevas tecnologías que se estima se triplicarán desde los USD 88 billones⁴

⁴ Un billón de USD equivale a mil millones USD, de acuerdo con la concepción inglesa.

alcanzados en el 2011 hasta un estimado de USD 240 billones en el 2035 (International Energy Agency (IEA), 2015).

Se debe considerar entonces que cualquier política energética que se tome en las próximas décadas influirá de una u otra forma en el cambio climático.

En la tabla 1, mostrada a continuación, se presentan tres escenarios con base en diferentes políticas adoptadas para mitigar el cambio climático. Los escenarios presentados incluyen el actual sin aplicar cambios, uno con nuevas políticas para el control de emisiones y el escenario de las políticas propuestas para alcanzar los 450 ppm CO₂ en la atmósfera para el año 2035.

En los escenarios presentados se observa un incremento importante en el uso de energías renovables y su impacto positivo en la reducción de emisiones según su aporte se incrementa.

Tabla 1. Demanda mundial de energía primaria en Mtoe

| | | | New Policies | | Current Policies | | 450 Scenario | |
|--------------------------------|--------|--------|--------------|--------|------------------|--------|--------------|--------|
| | 2000 | 2010 | 2020 | 2035 | 2020 | 2035 | 2020 | 2035 |
| Total | 10 097 | 12 730 | 14 922 | 17 197 | 15 332 | 18 676 | 14 176 | 14 793 |
| Coal | 2 378 | 3 474 | 4 082 | 4 218 | 4 417 | 5 523 | 3 569 | 2 337 |
| Oil | 3 659 | 4 113 | 4 457 | 4 656 | 4 542 | 5 053 | 4 282 | 3 682 |
| Gas | 2 073 | 2 740 | 3 266 | 4 106 | 3 341 | 4 380 | 3 078 | 3 293 |
| Nuclear | 676 | 719 | 898 | 1 138 | 886 | 1 019 | 939 | 1 556 |
| Hydro | 226 | 295 | 388 | 488 | 377 | 460 | 401 | 539 |
| Bioenergy* | 1 027 | 1 277 | 1 532 | 1 881 | 1 504 | 1 741 | 1 568 | 2 235 |
| Other renewables | 60 | 112 | 299 | 710 | 265 | 501 | 340 | 1 151 |
| Fossil fuel share in TPED | 80% | 81% | 79% | 75% | 80% | 80% | 77% | 63% |
| Non-OECD share of TPED** | 45% | 55% | 60% | 65% | 61% | 66% | 60% | 63% |
| CO ₂ emissions (Gt) | 23.7 | 30.2 | 34.6 | 37.0 | 36.3 | 44.1 | 31.4 | 22.1 |

Fuente: World Energy Outlook 2015.

El Gobierno del Ecuador acorde a estos cambios y posibles escenarios futuros ha declarado política de estado mediante el Decreto Ejecutivo No. 1815 la adaptación y mitigación al cambio climático.

Cabe mencionar al mismo tiempo que la Constitución del Ecuador promueve el uso de tecnologías ambientalmente limpias y energías alternativas no contaminantes en los sectores públicos y privados en su artículo 15, sección segunda, capítulo II.

Consecuentemente la SEMPLADES ha tomado como su Estrategia No.7 el cambio de la matriz energética del Ecuador en coordinación con el Ministerio de Energías Renovables y el Ministerio de Coordinación de la Producción (SEMPADES, 2013), (Ministerio de Coordinación de la Producción, 2013).

Considerando lo expuesto anteriormente y tomando en cuenta el elevado nivel de irradiación solar global que recibe el Ecuador, misma que varía entre 3.6 y 5.7 kWh/m²/día, con una insolación de aproximadamente 1642 horas_pico/año (Altomonte, Coviello, & Cuevas, 2004), (CONELEC, 2008) se plantea la necesidad de emprender un proyecto de investigación cuyo objetivo será la entrega de un producto con características híbridas (solar-eléctrico) para el uso doméstico que a la vez sea económicamente viable por estar adaptado a las condiciones locales a fin de sustituir el consumo de energías convencionales como GLP y energía eléctrica para el calentamiento de agua mediante uso de energía solar.

Este estudio contribuirá además a diversificar la matriz energética aplicando conceptos de eficiencia energética del recurso solar disponible a la vez que busca incentivar a la industria local y disminuir la intensidad energética⁵ del país que al momento lo convierten en el menos eficiente del Área Andina (3.23 kbep⁶ /1 MUSD) ya que la energía convencional usada actualmente, al ser reemplazada con energía

⁵ La intensidad energética mide la efectividad en el uso de la energía. Se expresa como energía final por unidad de producción económica.

⁶ kbpe = miles de barriles equivalentes de petróleo.

solar para el calentamiento de agua sanitaria de uso doméstico, podría ser destinada a sectores productivos de la industria local (Castro, 2011).

El desarrollo de este prototipo híbrido solar eléctrico para calentamiento de agua por medio del análisis de la ingeniería en la fabricación y de las condiciones de operación locales con base en el sustento económico permitirá obtener un producto ambientalmente sustentable y eficiente para el usuario final a la vez que contribuirá con el cambio de matriz energética promovido por el gobierno, la reducción de las emisiones de CO₂ y el uso de energías alternativas.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1 SITUACIÓN ENERGÉTICA MUNDIAL

2.1.1 DEMANDA DE ENERGÍA EN EL MUNDO

De acuerdo con las proyecciones mundiales realizadas por la IEA⁷ la demanda de energía se incrementará al menos en un 35% en el período 2010-2035 (International Energy Agency (IEA), 2015), tal como se muestra en la figura 1.

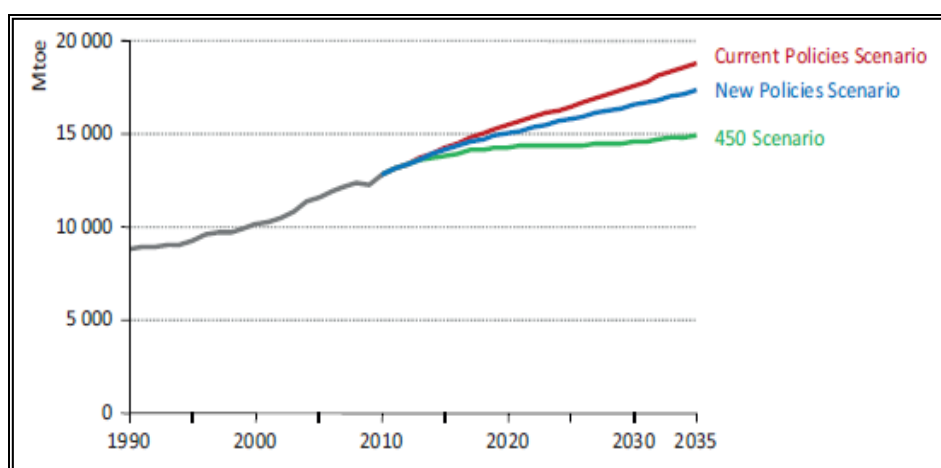


Figura 1. Crecimiento demanda de energía a nivel mundial

Fuente: (World Energy Outlook 2018)

Se observan escenarios con posibles políticas de regulación para el uso final de la energía y un escenario sin la adopción de las mismas en donde se aprecia que

⁷ IEA: International Energy Agency

la demanda de energía mundial se incrementará de 12700 Mtoe⁸ en el 2010 hasta valores que varían desde los 15000 a 18000 Mtoe.

Al dividir la demanda de energía por su fuente de origen se observa que la tendencia de mayor crecimiento en el período 2010-2035 corresponde a las energías renovables con un crecimiento estimado superior al 80% con respecto a los niveles del 2010 (International Energy Agency (IEA), 2015), tal como se muestra en la figura 2 a continuación.

Se observa que la demanda de energías renovables en el 2015 tuvo un valor cercano a los 70 Qbtu⁹ y para el 2045 se estima que su valor podría bordear los 140 Qbtu de acuerdo con las tendencias actuales de crecimiento.

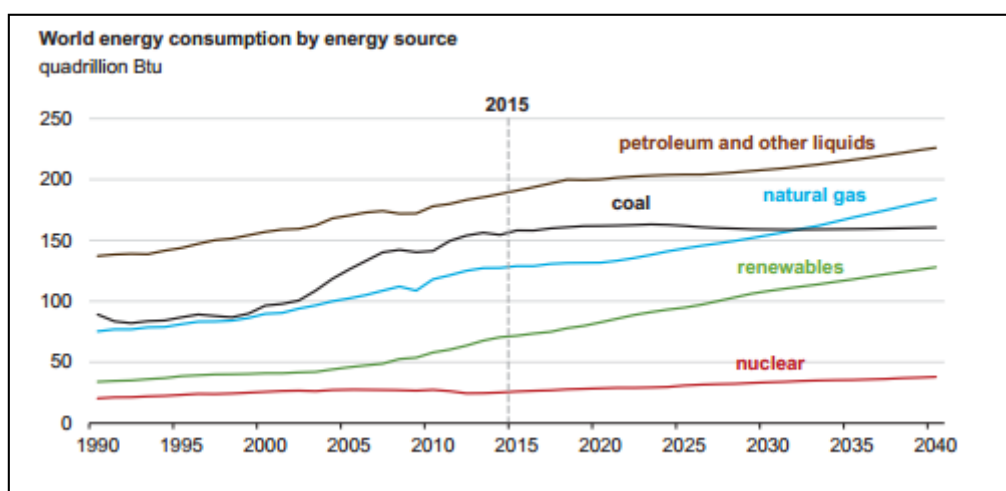


Figura 2. Proyección de la demanda energética a nivel mundial

Fuente: (International Energy Outlook 2018)

En todo caso es claro que los escenarios menos flexibles respecto a las emisiones de carbono impulsarán un incremento en el uso de estas tecnologías debido al abaratamiento de las mismas.

⁸ 1 Mtoe= 11.63 Millones de MWh = 11630 GWh

⁹ Qbtu = Quadrillon de BTU (British Technical Unit)

2.1.2 OFERTA DE ENERGÍA EN EL MUNDO

La evolución histórica de la oferta de energía en el mundo se muestra a continuación en la figura 3.

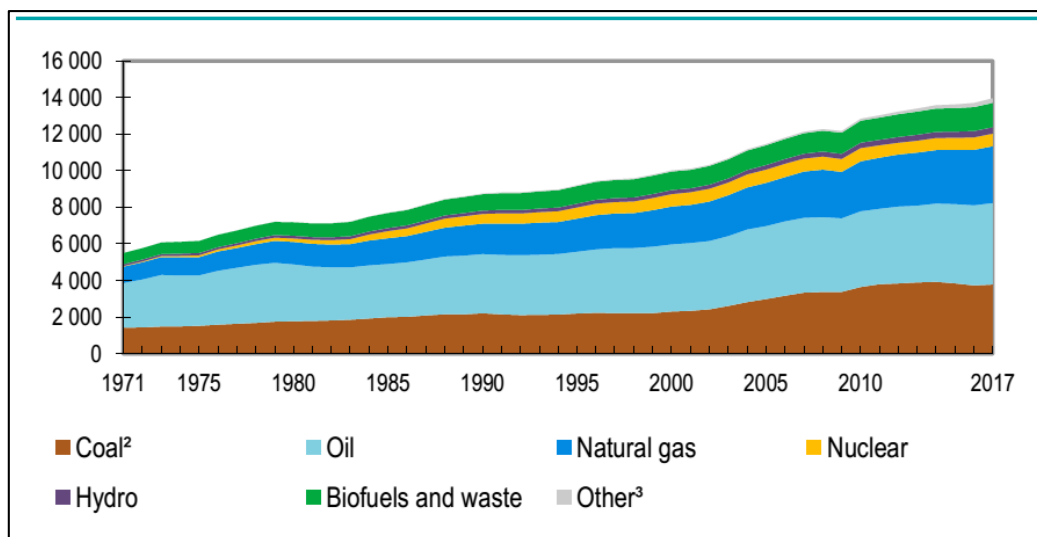


Figura 3. Evolución de la oferta de energía mundial

Fuente: (World Energy Statistics 2018)

Se observa que la producción mundial de combustibles de origen fósil ha seguido una tendencia de incremento aun tomando en cuenta que estos recursos se están agotando (International Energy Agency, 2012). En el 2017 se tuvo una producción total equivalente a 13972 Mtoe¹⁰ con una participación cercana al 80% de combustibles fósiles (petróleo, carbón, gas natural), tal como se observa a continuación en la figura 4.

¹⁰ 1 Mtoe= 11.6 Millones de MWh = 11600 GWh

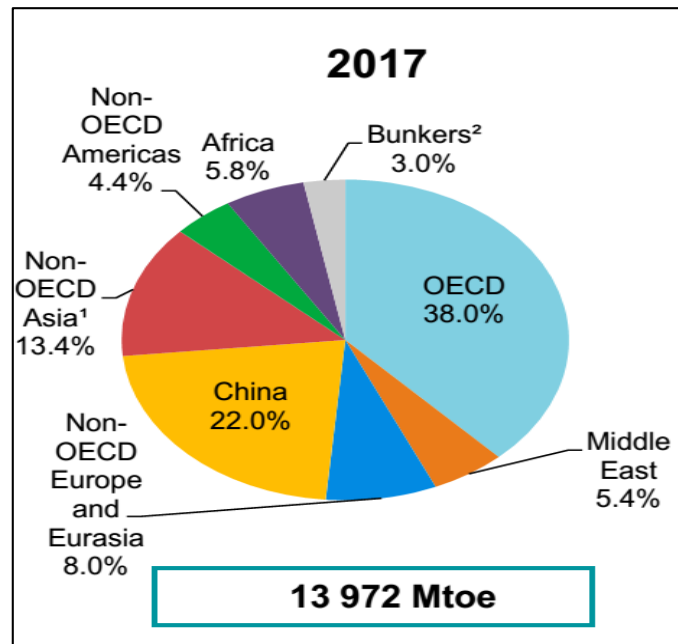


Figura 4. Oferta de energía mundial 2010

Fuente: (World Energy Statistics 2019)

2.1.3 USO DE LA ENERGÍA EN EL MUNDO

El uso de la energía se puede dividir en tres categorías básicas:

- Industria. Comprende el uso que se da a la energía para todos los procesos de extracción de materia prima o transformación de la misma en productos más elaborados.
- Transporte. Comprende el uso que se da a la energía en todos los sistemas de movilización de productos, bienes o personas.
- Residencia, agricultura, servicios y otros.

El sistema global del uso de la energía se resume en la figura 5 en donde se observa que la demanda se distribuye en un 90% entre las tres categorías mencionadas anteriormente, dejando aproximadamente el 10% restante para el uso

en otras actividades de carácter no energéticas como productos plásticos, textiles, cosméticos, etc (International Energy Agency (IEA), 2015).

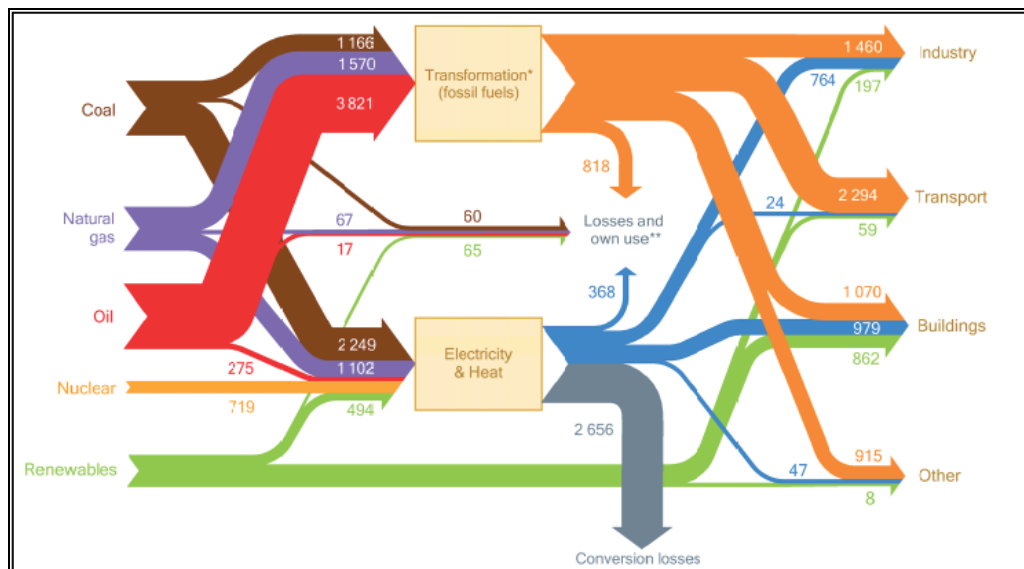


Figura 5. Sistema global del uso de la energía en Mtoe

Fuente: (World Energy Outlook 2018)

Se observa además que una de las ventajas de las energías renovables, en particular la solar y eólica, es que no requieren ningún tipo de conversión y pueden ser usadas directamente en los sectores de industria, transporte y edificaciones.

En la figura 6 se aprecia la tendencia mundial del uso de energía en las últimas décadas. Aproximadamente un tercio del consumo a nivel mundial se destina al uso residencial (Castro, 2011).

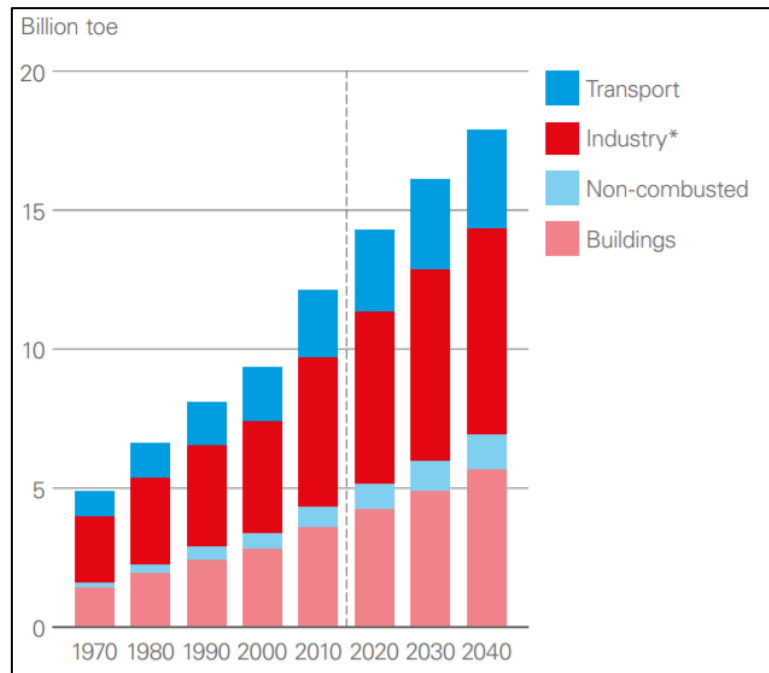


Figura 6. Consumo de energía mundial por sector

Fuente: (BP Energy Outlook 2019)

Al desglosar el uso de la energía a nivel residencial, se tienen 5 componentes fundamentales:

- Aire acondicionado
- Calefacción
- Iluminación y equipamiento
- Agua caliente sanitaria
- Cocción

El porcentaje de uso de energía que se destina para el calentamiento de agua sanitaria presenta variaciones entre el 10 al 40% [9] (Major Economies Forum on Energy and Climate, 2009). La variación de los porcentajes de uso residencial de la energía varía principalmente en función de las condiciones climáticas de la ubicación de la vivienda, tal como se aprecia en la figura 7.

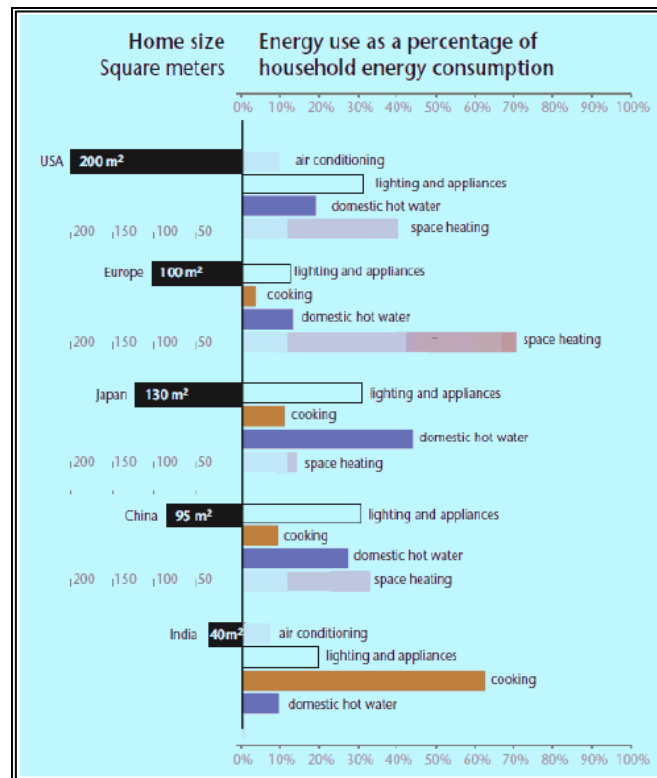


Figura 7. Uso final de la energía en la residencia

Fuente: (Major Economies Forum, 2015)

2.2 SITUACIÓN DE ENERGÍA EN ECUADOR

2.2.1 DEMANDA DE ENERGÍA EN EL ECUADOR

Para hablar de la demanda de energía del Ecuador se debe partir de la matriz energética de consumo interno mostrada en la figura 8 (SENPLADES, 2013), (Altomonte, Coviello, & Cuevas, 2004). El petróleo y sus derivados abarcan el 79% del consumo global de energía en el Ecuador donde se incluyen los sectores de industria, transporte, residencial, agrícola, etc.

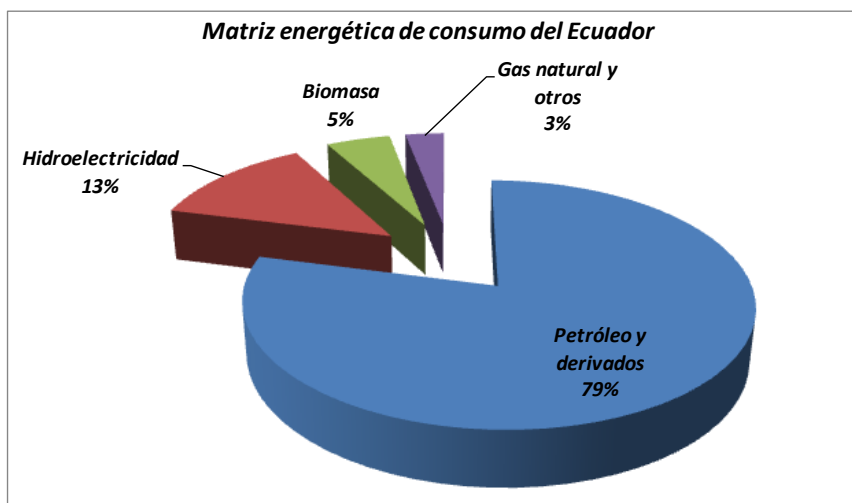


Figura 8. Matriz energética Ecuador

Fuente: (SENPLADES. Elaboración Autor)

Se evidencia que a partir de la década de los años 70 la demanda interna de energía primaria ha estado muy ligada al uso del petróleo y sus derivados tal como se muestra en la figura 9 (Castro, 2011).

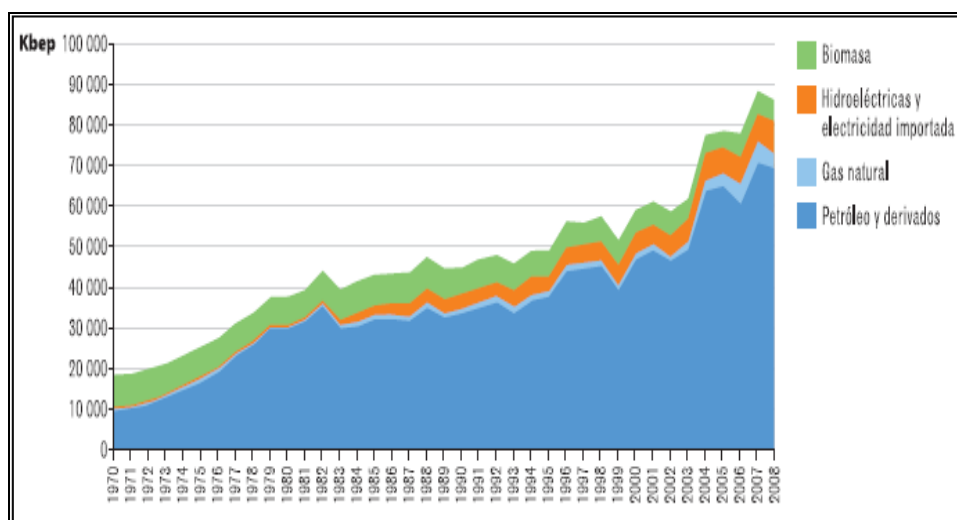


Figura 9. Demanda de energía total en Ecuador por fuente en Kbeb

Fuente: (CEDA, 2014)

2.2.2 USO DE LA ENERGÍA EN EL ECUADOR

En la figura 10 se presenta la demanda de energía total primaria por sector en el Ecuador (Castro, 2011). La demanda sectorial de energía en el Ecuador en la actualidad se divide en transporte (49%), industria (18%), residencial (12%) y otros (21%) (SENPLADES, 2013).

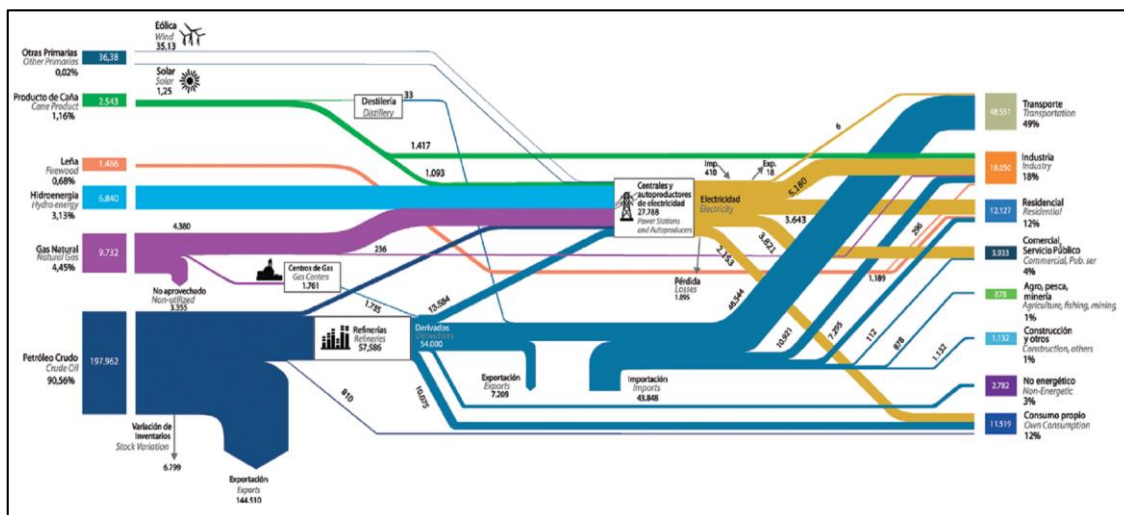


Figura 10. Demanda de energía total primaria en Ecuador por sector.

Fuente COMPENDIUM, Vol2, 2015

El consumo aproximado de energía en el 2008 para el sector de transporte fue de 35 millones de bep¹¹, seguido por el sector industrial (industria, construcción, pesca, agricultura) con 14 millones bep y el sector residencial con 12 millones bep. Se aprecia que la tendencia del uso de la energía en el sector residencial ha ido en aumento en los últimos años, por ello se debe enfocar los planes y programas de eficiencia energética y cambio de matriz de consumo en este sector.

De acuerdo con las estadísticas de la Universidad de Sheffield y la Universidad de Michigan, el Ecuador es uno de los países con mayor consumo de agua para uso

¹¹ bep: barril equivalente de petróleo = 5.8×10^6 BTU

doméstico en el mundo, con un valor de 159 m³ por persona al año tal como se muestra en la tabla 2 (SASI Group, 2006).

Tabla 2. Consumo agua [m³] por persona al año

| Posición | Territorio | Valor |
|----------|------------------------|-------|
| 1 | Australia | 487 |
| 2 | Armenia | 281 |
| 3 | Canadá | 259 |
| 4 | Nueva Zelanda | 242 |
| 5 | Cuba | 225 |
| 6 | Estados Unidos | 209 |
| 7 | Singapur | 203 |
| 10 | Costa Rica | 184 |
| 11 | Emiratos Árabes Unidos | 174 |
| 12 | Ecuador | 159 |

Fuente: (SASI Group. University of Shefflied, 2017)

Tomando como base la información del estudio acerca del consumo energético residencial realizado por el proyecto SECH-SPAHUSEC del gobierno de España se obtiene la distribución de los servicios que mayor demanda presentan en una vivienda tipo, tal como se muestra en la figura 11 (IDAE, 2013).

Se observa que el uso de la energía final para agua caliente sanitaria abarca aproximadamente el 38% del uso total de una vivienda, es decir, tomando como base los promedios de consumo del país por sector se tiene que de los 12 millones de bep usados en consumo residencial, aproximadamente 4.5 millones de bep se consumen al año en este servicio. Esta energía se podría sustituir en gran porcentaje con tecnologías renovables como el calefactor solar híbrido propuesto.

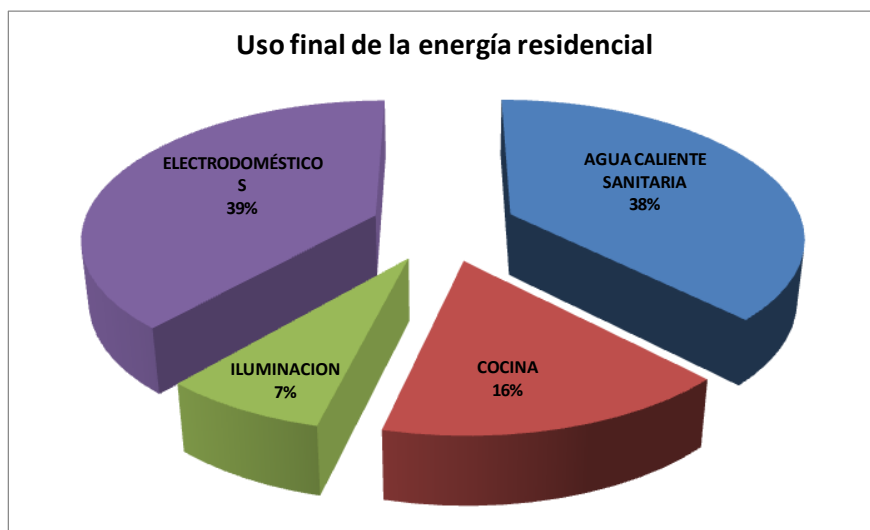


Figura 11. *Uso final de la energía en residencias*

Fuente: (IDAE. Elaboración Autor)

2.2.3 OFERTA DE ENERGÍA EN EL ECUADOR

En el Ecuador la producción total de energía en el 2010 alcanzó los 27.37 Mtoe (International Energy Agency, 2012). La distribución por fuente primaria de producción se muestra en la figura 12 (Herrera, Lopes, & Arias, 2012).

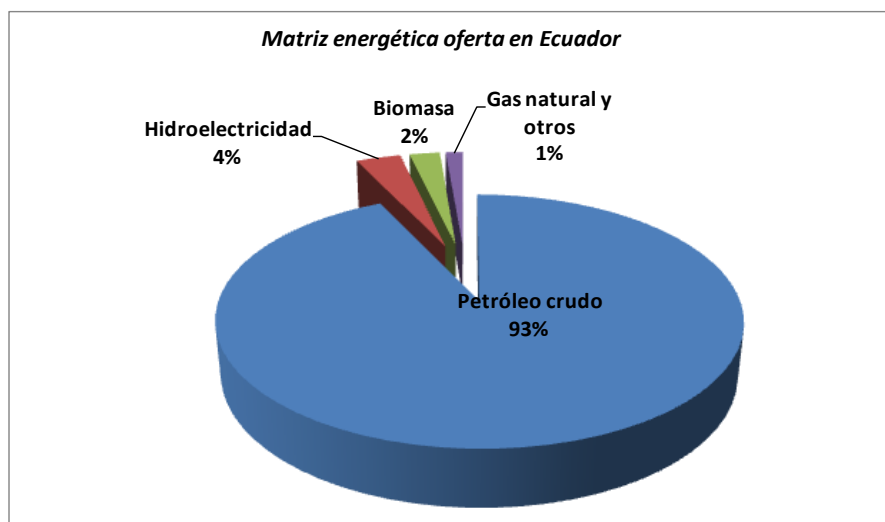


Figura 12. *Matriz energética de oferta en Ecuador.*

Fuente: (Grupo Faro. Elaboración Autor)

Aproximadamente el 65% del total de la energía producida por el Ecuador se exporta en forma de petróleo crudo.

2.3 SUBSIDIOS ENERGÉTICOS EN EL ECUADOR

Ecuador se encuentra entre los países que mayor subsidio da a sus energías en el mundo lo cual lo vuelve altamente ineficiente en materia de consumo energético (International Energy Agency (IEA), 2015). Esto se ve reflejado en el índice de intensidad energética ¹²que al momento es el más elevado del área andina con un valor de 3.23 kbep/MUSD (Castro, 2011).

La figura 13 muestra el listado de los países que mayor subsidio dan a sus energías. Durante el 2018 el Ecuador invirtió alrededor de \$2000 millones de dólares en subsidios dirigidos hacia combustibles derivados del petróleo (International Energy Agency (IEA), 2015).

¹² La intensidad energética mide la efectividad del uso de la energía y se mide en kbep/millon de USD

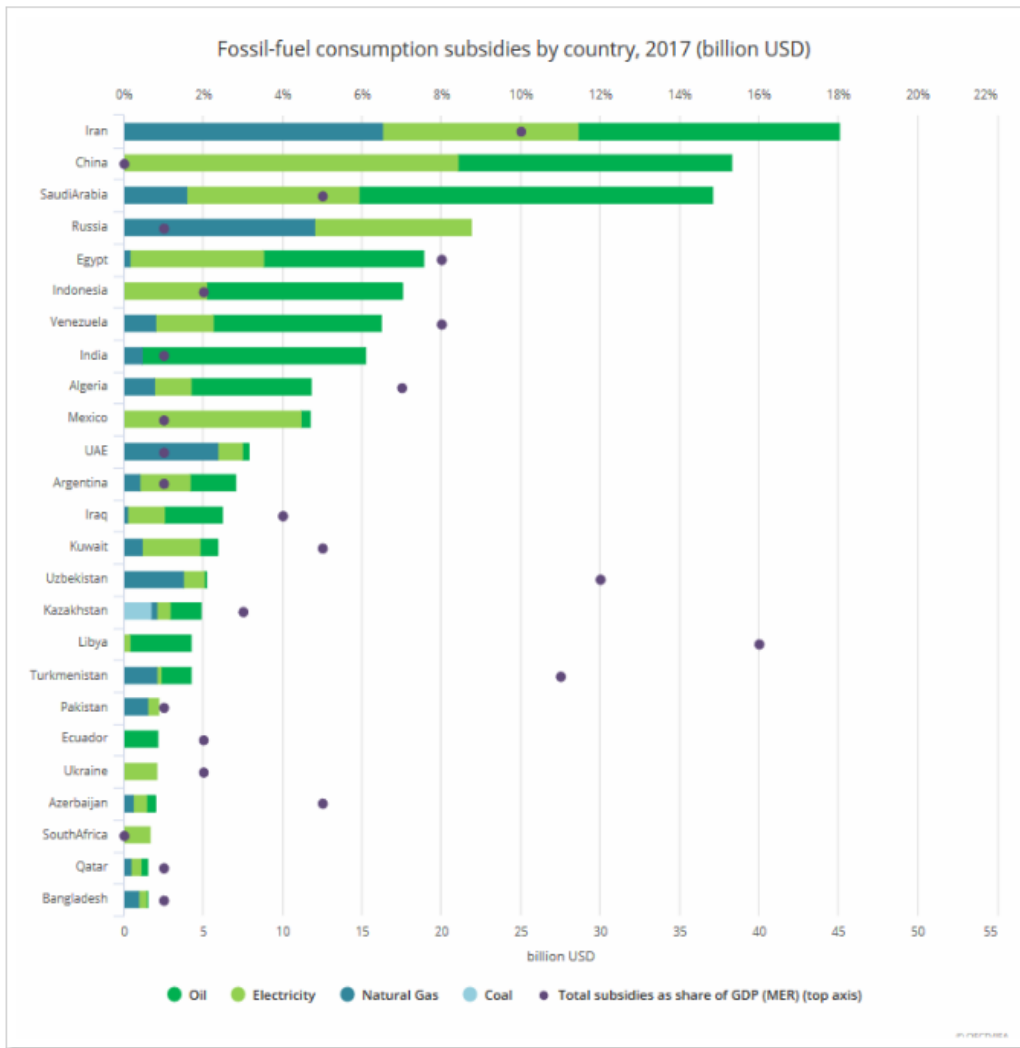


Figura 13. Subsidios por tipo de energía primaria

Fuente: (IEA 2018)

CAPÍTULO 3

MODELAMIENTO MATEMATICO CAPTADOR SOLAR

3.1 DESARROLLO MODELO DE SISTEMA DE CAPTACION SOLAR

La irradiancia solar es la potencia de la radiación solar por unidad de superficie y se expresa en W/m^2 . La constante solar es el valor de la potencia solar que llega a la tierra fuera de su atmósfera y se ha calculado que su valor es cercano a los $1367 W/m^2$. La energía solar que anualmente llega a la tierra tiene un valor aproximado de $234000 Gtoe^{13}$ que frente al consumo anual aproximado de $12.7 Gtoe$ en el 2012 representa más de 18000 veces el consumo actual del planeta (CONELEC, 2008).

Debido a su ubicación geográfica el Ecuador (latitud $0^{\circ}0'0''$) es un lugar propicio para la implementación de proyectos de generación de energía solar. Según los datos de heliofanía proporcionados por el INAMHI se obtiene un promedio anual de 5.1 horas de sol pico al día tal como se aprecia en la tabla 3 para un período de estudio de 5 años (INAMHI, 2013).

Tabla 3. Datos de heliofanía en el Ecuador

| Datos de Heliofanía Ecuador | | | | | | | | |
|-----------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|------------|-------------------|
| Mes | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | Promedio | N° días | Heliofanía diaria |
| Enero | 122.0 | 200.7 | 134.6 | 108.9 | 232.2 | 159.7 | 31 | 5.2 |
| Febrero | 117.1 | 179.9 | 102.4 | 125.9 | 156.5 | 136.4 | 28 | 4.9 |
| Marzo | 113.1 | 121.1 | 88.9 | 145.8 | 159.9 | 125.8 | 31 | 4.1 |
| Abril | 116.7 | 115.9 | 126.1 | 150.6 | 119.6 | 125.8 | 30 | 4.2 |
| Mayo | 184.2 | 156.1 | 129.4 | 177.0 | - | 161.7 | 31 | 5.2 |
| Junio | 176.3 | 166.3 | 177.9 | 174.6 | 135.1 | 166.0 | 30 | 5.5 |
| Julio | 213.1 | 217.1 | 168.6 | 211.4 | 169.5 | 195.9 | 31 | 6.3 |
| Agosto | 211.4 | 180.6 | 157.0 | 197.6 | 183.3 | 186.0 | 31 | 6.0 |
| Septiembre | 196.8 | 184.3 | 164.2 | 233.7 | 159.7 | 187.7 | 30 | 6.3 |
| Octubre | 184.8 | 139.9 | 147.0 | 167.6 | 158.8 | 159.6 | 31 | 5.1 |
| Noviembre | 123.5 | 160.8 | 129.5 | 180.2 | 78.6 | 134.5 | 30 | 4.5 |
| Diciembre | 149.2 | - | 150.8 | 186.5 | 73.1 | 139.9 | 31 | 4.5 |
| Total | 1908.2 | 1822.7 | 1676.4 | 2059.8 | 1626.3 | 1879.0 | 365 | 5.1 |

Fuente: (INAMHI. Elaboración Autor)

¹³ 1 Gtoe=1000 Mtoe = 11.63 millones de GWh = 11630 TWh

De la información proporcionada por el CONELEC¹⁴ e INAMHI¹⁵ referente a la insolación y heliofanía respectivamente, se obtienen los valores de insolación o energía y potencia promedios proveniente de la radiación solar. Los datos se muestran en la tabla 4 para el área de influencia de este proyecto (CONELEC, 2008), (INAMHI, 2013).

Tabla 4. Valores de energía y potencia solar en área de estudio

| Radiación | Energía [Wh/m ² /día] | Potencia [W/m ²] |
|--------------------|-------------------------------------|---------------------------------|
| Insolación global | 5100 | 1000 |
| Insolación directa | 4200 | 823.5 |
| Insolación difusa | 2200 | 431.4 |

Fuente: (INAMHI. Elaboración Autor)

Las mediciones de la radiación solar realizadas en el laboratorio de energías renovables de la ESPE en el mes de mayo 2011, mostradas en la figura 14, corroboran los valores presentados en los datos del CONELEC e INAMHI.

¹⁴ CONELEC. Consejo Nacional de Electricidad del Ecuador

¹⁵ INAMHI. Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología del Ecuador

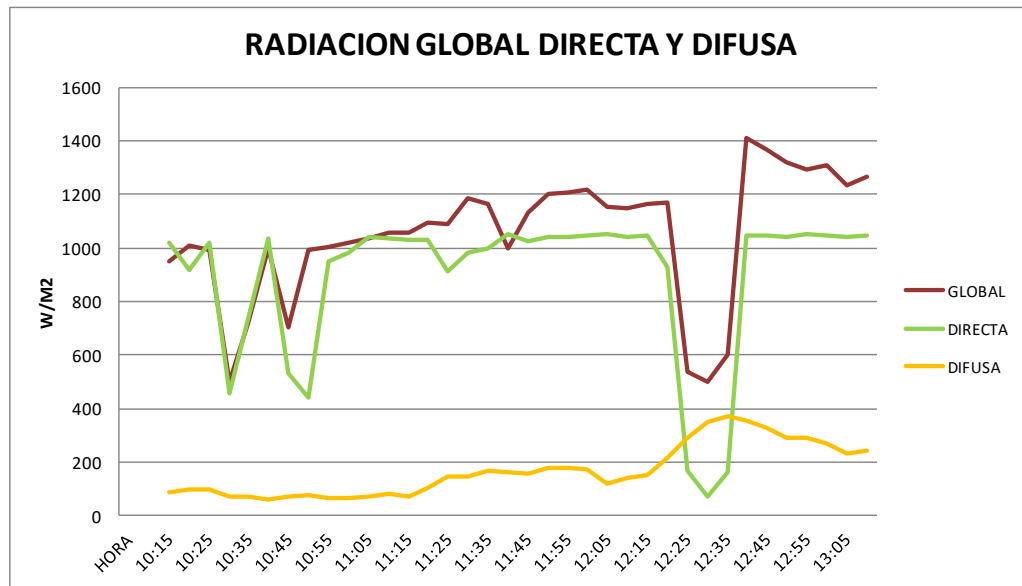


Figura 14. Datos experimentales de radiación solar.

Fuente: (Elaboración Autor)

Estos valores de radiación solar demuestran las condiciones climáticas propicias que existen en el área de influencia del proyecto para el uso de este tipo de tecnologías.

3.1.1 CALEFACTOR SOLAR HÍBRIDO DE AGUA PARA USO SANITARIO

Una vez conocido el recurso solar se ha planteado la hipótesis de construir un calefactor de agua que aproveche las características locales de una manera más eficiente desde el punto de vista operativo y económico.

En la figura 15 mostrada a continuación se presenta un esquema básico del sistema para calentamiento solar de agua de uso residencial con un subsistema de apoyo de resistencias eléctricas (Cámara de la construcción de Quito, 2009).

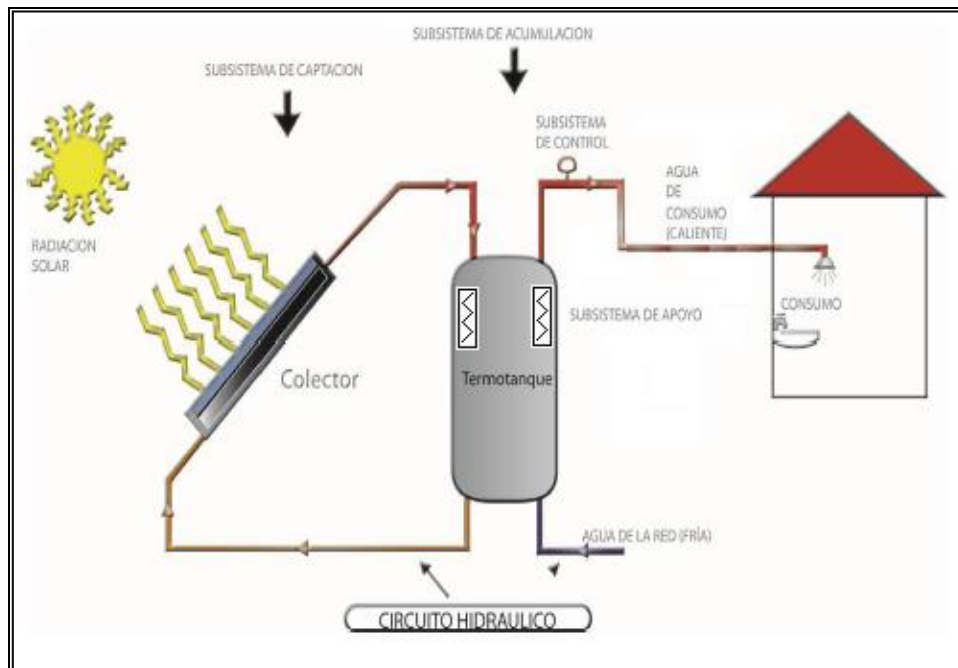


Figura 15. Sistema para calentamiento de agua.

Fuente: (Norma NEC 14-1)

El principio básico de funcionamiento del calefactor solar se basa en la diferencia de densidad del agua que circula por el mismo producto de la diferencia de temperaturas entre el agua que entra y la que sale del colector; este fenómeno es conocido como termosifón y origina la circulación del agua en el sistema.

Cuando por motivos de pérdidas de carga se requiere circulación forzada se puede incluir una bomba en el circuito hidráulico.

Los componentes principales del sistema de calentamiento solar son el sistema de captación, formado por la placa colectora, los tubos de circulación del agua, el aislamiento y el vidrio. Todos estos componentes forman el colector solar propiamente dicho, tal como se muestra en la figura 16 (Cámara de la construcción de Quito, 2009).

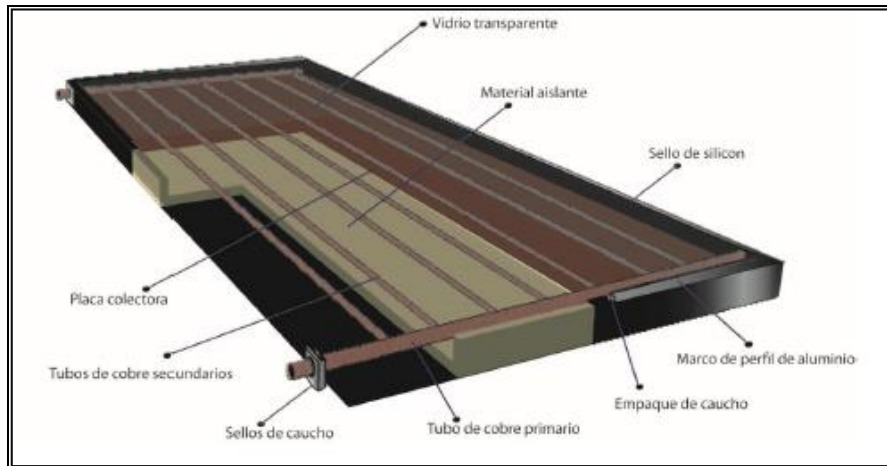


Figura 16. Componentes del sistema de captación solar.

Fuente: (Norma NEC 14-1)

Sistema de acumulación, constituido por el tanque acumulador de agua caliente tal como se muestra en la figura 17. El mismo puede tener o no un intercambiador de calor (Cámara de la construcción de Quito, 2009).

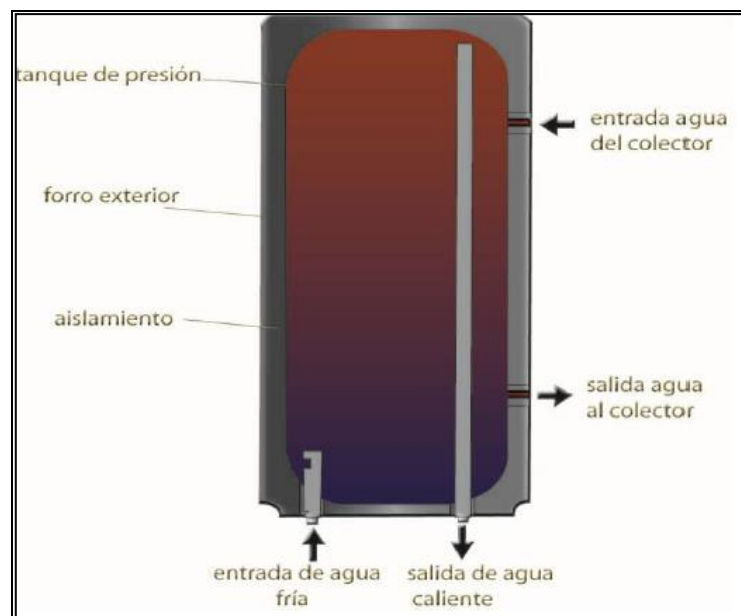


Figura 17. Tanque de almacenamiento sin intercambiador.

Fuente: (Norma NEC 14-1)

Sistema de apoyo, que usa energía convencional auxiliar, mostrado en la figura 18. Este sistema estará basado en uso de energía eléctrica en función de la

fracción solar calculada para el área de influencia del proyecto. A fin de priorizar el uso de energía solar.

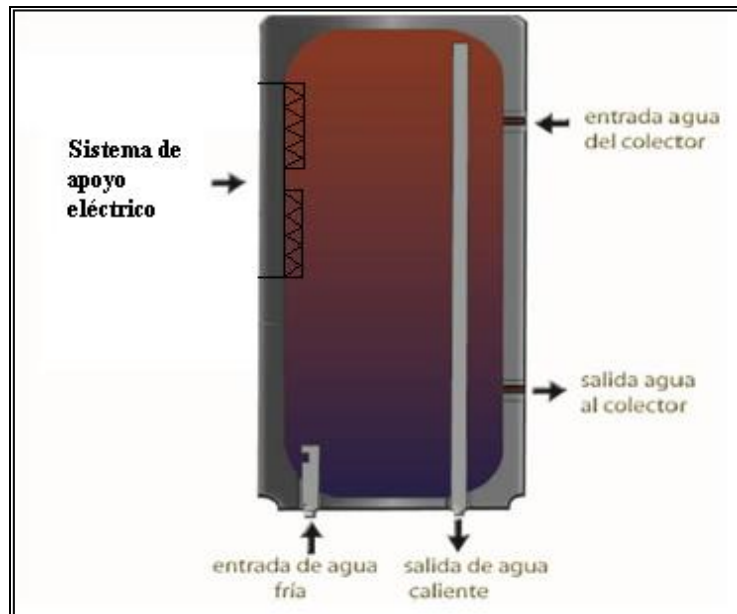


Figura 18. Sistema de apoyo eléctrico.

Fuente: (Norma NEC 14-1)

Se deberá determinar la mejor configuración (serie, paralelo), cantidad y ubicación de las resistencias dentro del tanque de almacenamiento en función del patrón de acumulación de calor a fin de optimizar su uso en los casos de poca radiación solar.

La norma NEC-10 parte 14-1 (Cámara de la construcción de Quito, 2009) muestra una referencia de la potencia de las resistencias en función de la capacidad de calentamiento de los sistemas solares térmicos tal como se muestra en la tabla 5.

Tabla 5. Potencia sugerida para el apoyo eléctrico

| CAPACIDAD DE LOS S.S.T. (EN LITROS) | POTENCIA DE LA RESISTENCIA ELÉCTRICA | VOLTAJE |
|--|---|---------|
| 140 | 1.500 W | 110V |
| 240 | 1.500 W | 110V |
| 320 | 1.500 W | 110V |
| 450 | 3.000 W | 220 V |
| 600 | 3.000 W | 220 V |
| 720 | 3.000 W | 220 V |

Fuente: (Elaboración Autor)

El circuito hidráulico se encuentra formado por las tuberías y válvulas que permiten el flujo del agua. El sistema de regulación y control, usado para asegurar el funcionamiento correcto del equipo.

Para la elaboración del prototipo las variables a determinar o calcular en el modelamiento y construcción del sistema se muestran a continuación:

A_c , representa el área efectiva del colector (m^2)

η_o , representa la eficiencia óptica del colector (adimensional)

C_c , representa la capacidad específica del fluido en el colector (JK^{-1})

U_L , representa el coeficiente global de pérdidas del colector ($W m^{-2} °C^{-1}$)

V_c , representa el volumen de fluido en el colector (m^3)

I_c , representa la irradiancia en la placa colectora (Wm^{-2})

\dot{v}_c , representa el flujo volumétrico en el colector (m^3s^{-1})

T_{cav} , representa la temperatura promedio del fluido en el colector ($°C$)

T_{ca} , representa la temperatura colector ambiente ($°C$)

T_{ci} , representa la temperatura de entrada del fluido al colector ($°C$)

T_{co} , representa la temperatura de salida del fluido del colector ($°C$)

3.1.2 CÁLCULOS DE LA CONDUCTANCIA TÉRMICA Y PÉRDIDAS EN EL COLECTOR SOLAR PLANO

Para el cálculo de la conductancia térmica y las pérdidas en el modelamiento del colector solar plano propuesto se va a utilizar el método de Hollands. Se grafica el número de Nusselt para variaciones de la longitud y ángulo Beta.

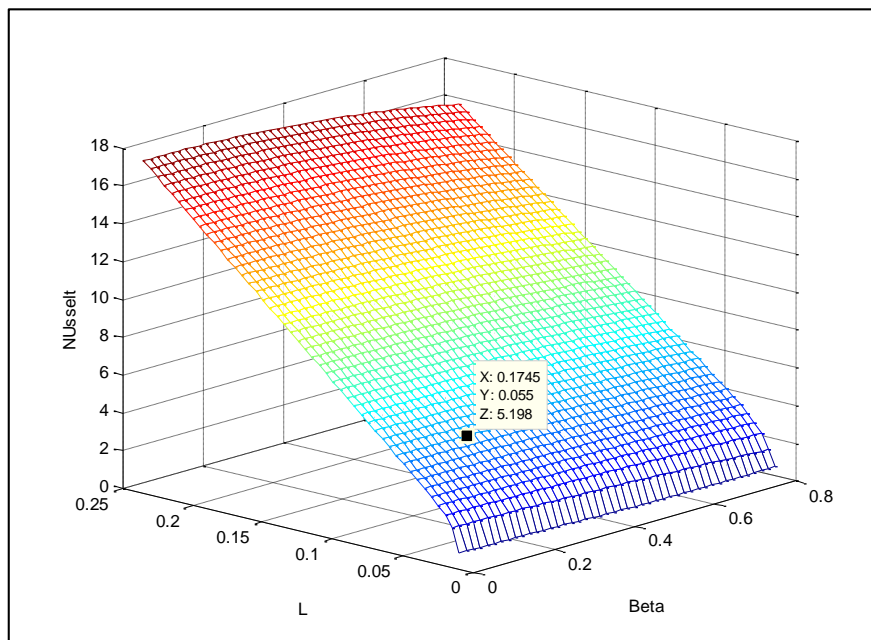


Figura 19. *Nusselt vs L y Beta*

Fuente: (Elaboración Autor)

Resistencia térmica placa cubierta:

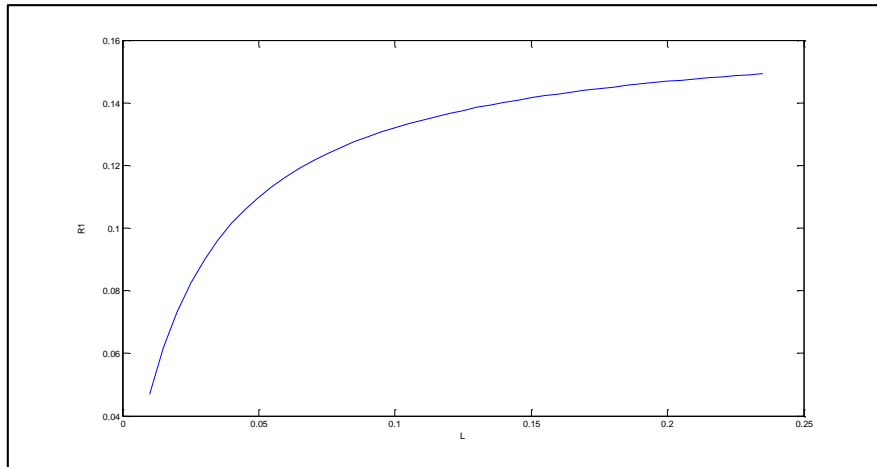


Figura 20. Resistencia en función de L .

Fuente: (Elaboración Autor)

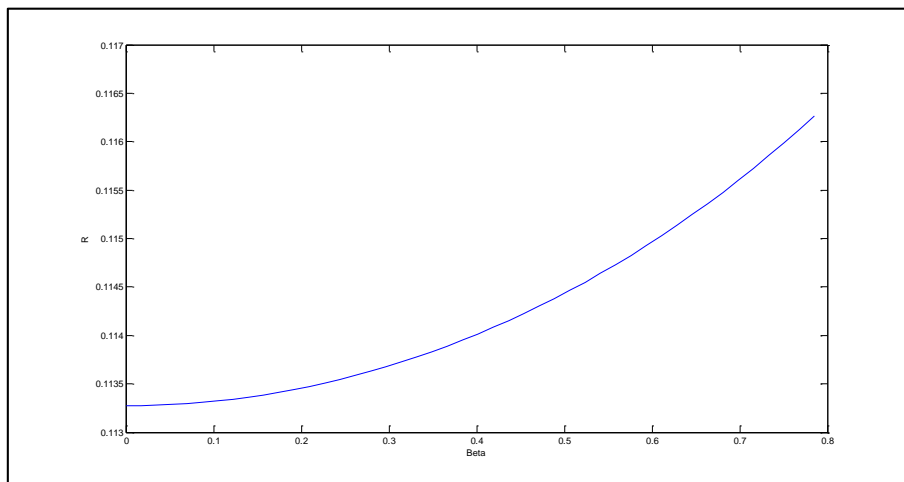


Figura 21. Resistencia en función de Beta

Fuente: (Elaboración Autor)

Coeficiente de pérdidas superiores (transferencia de calor)

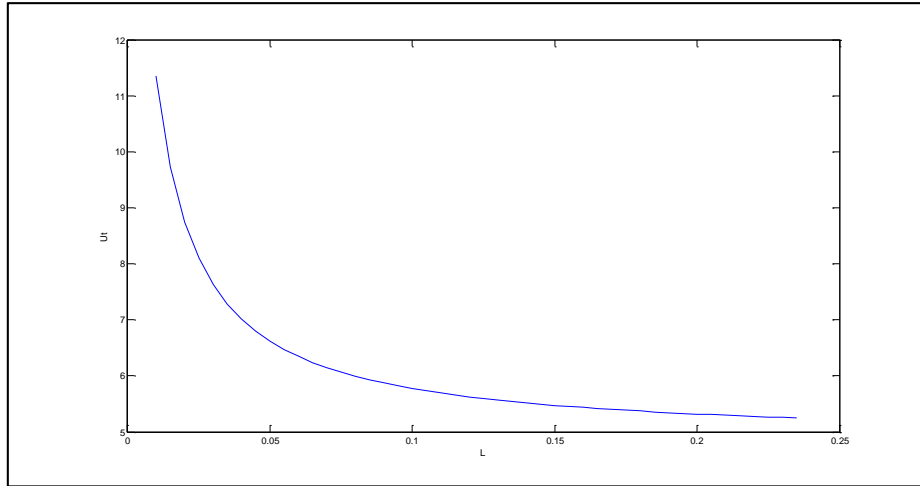


Figura 22. U_L en función de L

Fuente: (Elaboración Autor)

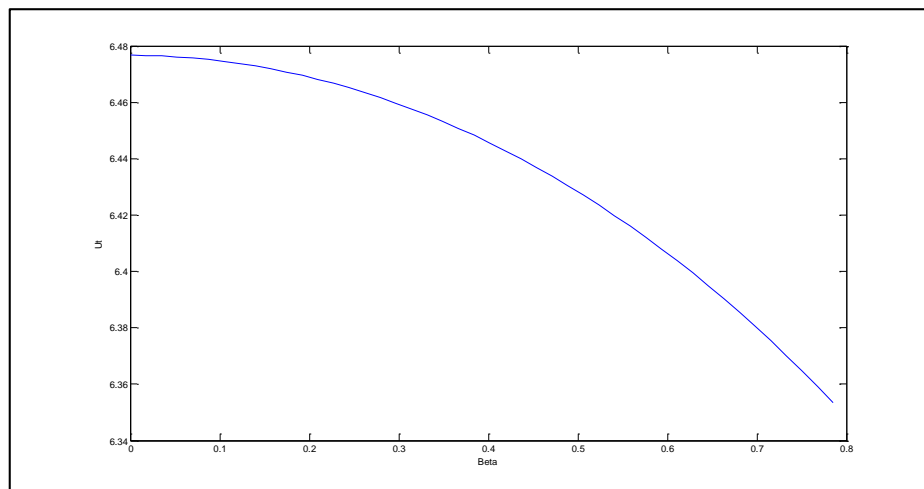


Figura 23. U_L en función de $Beta$

Fuente: (Elaboración Autor)

Con base en los gráficos 19 a 23 mostrados se puede concluir que:

- Mientras mayor el ángulo de inclinación del colector menor es el coeficiente de transferencia de calor.

- Mientras menor la longitud entre placa cubierta mayor el coeficiente de transferencia de calor.
- La longitud placa cubierta tiene mayor influencia que el ángulo de inclinación en la transferencia de calor del colector.

Se presentan en las tablas 6 y 7 las conductividades terminas y el coeficiente de transferencia de calor de algunos materiales.

Tabla 6. *Conductividades terminas de materiales*

| Material | Conductividad térmica, W/m · K |
|---------------------------|--------------------------------------|
| Diamante | 2 300 |
| Plata | 429 |
| Cobre | 401 |
| Oro | 317 |
| Aluminio | 237 |
| Hierro | 80.2 |
| Mercurio (<i>ℓ</i>) | 8.54 |
| Vidrio | 1.4 |
| Ladrillo | 0.72 |
| Agua (<i>ℓ</i>) | 0.613 |
| Piel humana | 0.37 |
| Madera (roble) | 0.17 |
| Helio (<i>g</i>) | 0.152 |
| Hule suave | 0.13 |
| Fibra de vidrio | 0.043 |
| Aire (<i>g</i>) | 0.026 |
| Uretano, espuma rígida | 0.026 |

Fuente: (Termodinámica Cengel, 2012)

Tabla 7. Coeficiente de transferencia de calor.

| Fluid | Transmission Surface | Fluid | Overall Heat Transmission Coefficient | |
|-------|----------------------|------------|---------------------------------------|----------------------|
| | | | (Btu/ft ² hr °F) | (W/m ² K) |
| Water | Cast Iron | Air or Gas | 1.4 | 7.9 |
| Water | Mild Steel | Air or Gas | 2.0 | 11.3 |
| Water | Copper | Air or Gas | 2.3 | 13.1 |
| Water | Cast Iron | Water | 40 - 50 | 230 - 280 |
| Water | Mild Steel | Water | 60 - 70 | 340 - 400 |
| Water | Copper | Water | 60 - 80 | 340 - 455 |
| Air | Cast Iron | Air | 1.0 | 5.7 |
| Air | Mild Steel | Air | 1.4 | 7.9 |
| Steam | Cast Iron | Air | 2.0 | 11.3 |
| Steam | Mild Steel | Air | 2.5 | 14.2 |
| Steam | Copper | Air | 3.0 | 17 |
| Steam | Cast Iron | Water | 160 | 910 |
| Steam | Mild Steel | Water | 185 | 1050 |
| Steam | Copper | Water | 205 | 1160 |
| Steam | Stainless Steel | Water | 120 | 680 |

Fuente: Termodinámica Cengel, 2012

3.1.3 DESCRIPCION DEL MODELO MATEMÁTICO

Para desarrollar el modelo matemático del colector se partirá del análisis del balance térmico en colectores solares planos mostrado en la ecuación 1 y que viene dado dada por la relación:

Energía útil = Radiación absorbida – Pérdidas térmicas

$$Q_u = A_c [S - U_L (T_{pm} - T_a)]$$

Ecuación 1. Calor útil

En donde:

Q_u , representa el calor útil (W)

S , representa la radiación absorbida por el colector (Wm⁻²)

A_c , representa el área efectiva del colector (m²)

U_L , representa el coeficiente global de pérdidas del colector (Wm⁻²K⁻¹)

T_{pm} , representa la temperatura media de placa (°C)

T_a , representa la temperatura ambiente (°C)

Durante el desarrollo del modelo se debe determinar las variables que influyen en coeficiente global de pérdidas (U_L) a fin de poder realizar un análisis de sensibilidad entre el costo y eficiencia operativa del modelo.

3.1.3.1 Sistema de calentamiento de agua mediante energía solar

En este estudio se analizarán las ecuaciones que gobiernan al sistema térmico del calentador solar en el dominio de Laplace o dominio (s) debido a que se determinarán las constantes del sistema mediante la teoría de control.

En la teoría de control se considera a los sistemas térmicos como sistemas de primer orden, puesto que se puede representar su comportamiento de una manera sencilla mediante ecuaciones diferenciales de primer orden.

3.1.3.2 Representación matemática de sistema de primer orden en el dominio de Laplace

De manera general un sistema lineal en el tiempo se puede caracterizar mediante una función de transferencia G que funciona como un operador lineal que toma la entrada u y la transforma en salida y .

$$y(t) = Gu(t)$$

Ecuación 2. Función de transferencia

Mediante la transformada de Laplace se puede obtener la relación entre la entrada y la salida o función de transferencia para un sistema en tiempo continuo tal como se muestra en la ecuación 3.

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)}$$

Ecuación 3. Relación entrada vs salida

3.1.3.3 Transformada de Laplace de un sistema lineal de primer orden

Se muestra a continuación una ecuación diferencial que describe un sistema lineal de primer orden.

$$\frac{dx(t)}{dt} + a_0x(t) = b_0y(t)$$

Ecuación 4. Sistema lineal de primer orden

La función de transferencia se obtiene aplicando la transformada de Laplace a los dos lados de la igualdad, tal como se muestra a continuación.

$$L\left\{\frac{dx(t)}{dt} + a_0x(t)\right\} = L\{b_0y(t)\}$$

$$sX(s) - X(0) + a_0X(s) = b_0Y(s)$$

En general se considera que esta ecuación está desarrollada con respecto a la desviación de las variables de su estado estacionario y al determinar la función de transferencia de una variable de entrada independientemente del resto de variables de entrada de un sistema se puede considerar el valor inicial como cero, por lo que $X(0) = 0$, de donde se tiene:

$$X(s)[s + a_0] = b_0Y(s)$$

$$\frac{X(s)}{Y(s)} = \frac{b_0}{s + a_0}$$

Al arreglar los términos de la función de transferencia se la puede representar en su forma canónica tal como se muestra en la ecuación 5.

$$\frac{X(s)}{Y(s)} = \frac{K}{\tau s + 1}$$

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1}$$

Ecuación 5. Forma canónica de la función de transferencia

En donde:

$K = \frac{b_0}{a_0}$, representa la ganancia del sistema en estado estable.

$\tau = \frac{1}{a_0}$, representa la constante de tiempo del sistema (Buzas, 2009).

El polo de la función de transferencia viene dado por los ceros del polinomio del denominador.

$$\tau s + 1 = 0$$

$$s = -\frac{1}{\tau}$$

$$s = -a_0$$

3.1.4 ELABORACION DEL MODELO MATEMATICO DEL COLECTOR

La ecuación de estado del colector solar plano se puede describir mediante la ecuación diferencial de primer orden que se muestra a continuación (Buzas, 2009) , (Buzas, Farkas, & Brio, 1998).

$$\frac{dT_{co}(t)}{dt} = \frac{A_c \eta_o}{C_c} I_c(t) - \frac{U_L A_c}{C_c} (T_{cav}(t) - T_{ca}(t)) + \frac{\dot{v}_c(t)}{V_c} (T_{ci}(t) - T_{co}(t))$$

Ecuación 6. Ecuación de estado colector solar plano

En donde:

$$T_{cav} = \frac{T_{ci}(t) + T_{co}(t)}{2}$$

A_c , representa el área efectiva del colector (m^2)

η_o , representa la eficiencia óptica del colector (adimensional)

C_c , representa la capacidad específica del fluido en el colector (JK^{-1})

U_L , representa el coeficiente global de pérdidas del colector ($W m^{-2} \text{ } ^\circ C^{-1}$)

V_c , representa el volumen de fluido en el colector (m^3)

I_c , representa la irradiancia en la placa colector (Wm^{-2})

\dot{v}_c , representa el flujo volumétrico en el colector (m^3s^{-1})

T_{cav} , representa la temperatura promedio del fluido en el colector ($^\circ C$)

T_{ca} , representa la temperatura colector ambiente ($^\circ C$)

T_{ci} , representa la temperatura de entrada del fluido al colector ($^\circ C$)

T_{co} , representa la temperatura de salida del fluido del colector ($^\circ C$)

3.1.4.1 Modelamiento teórico de función de transferencia del colector

La ecuación 6 descrita anteriormente se puede representar en el dominio de Laplace aplicando el principio de superposición. Este principio determina que la función de transferencia de la variable de salida puede ser calculada mediante la suma de las respuestas producidas por cada entrada individual (Buzas, 2009). Para esto se considera como entrada individual de cada sistema a la radiación solar $I_c(t)$, la temperatura de entrada de agua del colector $T_{ci}(t)$ y la temperatura ambiente $T_{ca}(t)$ y como salida de estos sistemas se considera la temperatura de salida del colector $T_{co}(t)$.

La ecuación del colector 5 puede ser considerada lineal si se asume que el flujo en el colector tiene una tasa constante, es decir $v_c(t) = cte$

Las funciones de transferencia obtenidas de esta manera describen sistemas lineales en tiempo continuo con ganancia constante.

3.1.4.2 Función de transferencia de la temperatura de salida del colector en función de la radiación solar

La primera función de transferencia a determinar es la que relaciona la temperatura de salida del colector con la radiación solar. Esta se denominará $W_1(S)$ (Buzas, 2009).

Para ello en la ecuación 6 se consideran únicamente los términos que relacionan la radiación solar con la temperatura de salida colector.

$$\frac{dT_{co}(t)}{dt} = \frac{A_c \eta_0}{C_c} I_c(t) - \frac{U_L A_c}{C_c} \frac{T_{co}(t)}{2} - \frac{\dot{v}_c}{V_c} T_{co}(t)$$

Si se considera que el caudal en el colector es constante, la ecuación 6 es lineal, con lo que se puede aplicar la transformada de Laplace a fin de determinar la relación T_{co}/I_c según se muestra a continuación.

$$L\left\{\frac{dT_{co}(t)}{dt}\right\} = L\left\{\frac{A_c\eta_0}{C_c}I_c(t) - \frac{U_L A_c T_{co}(t)}{C_c} - \frac{\dot{v}_c(t)}{V_c}T_{co}(t)\right\}$$

$$ST_{co} - T_{co}(0) + \frac{U_L A_c T_{co}(s)}{C_c} + \frac{\dot{v}_c(t)}{V_c}T_{co}(s) = \frac{A_c\eta_0}{C_c}I_c(s)$$

$$\frac{T_{co}(S)}{I_c(S)} = \frac{2V_c A_c \eta_0}{2C_c V_c S + V_c U_L A_c + 2C_c v_c}$$

Para representar la ecuación de la función de transferencia en su forma canónica se realizan las operaciones mostradas a continuación.

$$\frac{T_{co}(S)}{I_c(S)} = \frac{\frac{2V_c A_c \eta_0}{V_c U_L A_c + 2C_c v_c}}{\frac{2C_c V_c S + V_c U_L A_c + 2C_c v_c}{V_c U_L A_c + 2C_c v_c}}$$

$$\frac{T_{co}(S)}{I_c(S)} = \frac{\frac{2V_c A_c \eta_0}{V_c U_L A_c + 2C_c v_c}}{\frac{2C_c V_c S}{V_c U_L A_c + 2C_c v_c} + 1}$$

Se determinan de esta manera el valor de la constante de tiempo del sistema τ_c .

$$\tau_c = \frac{2C_c V_c}{V_c U_L A_c + 2C_c v_c}$$

$$\tau_c = \frac{1}{\frac{U_L A_c}{2C_c} + \frac{v_c}{V_c}}$$

Una vez determinada la constante de tiempo se puede obtener la función de transferencia que relaciona la salida o temperatura de colector en función de la entrada o radiación solar tal como se muestra en la ecuación 7.

$$W_1(s) = \frac{T_{co}(S)}{I_c(S)}$$

$$\frac{T_{co}(S)}{I_c(S)} = \frac{(\tau_c A_c \eta_0)}{C_c \tau_c S + 1}$$

Ecuación 7. Función de transferencia del sistema con radiación solar I_c

3.1.4.3 Función de transferencia de la temperatura de salida del colector en función de la temperatura de ingreso del colector

De manera similar a lo descrito anteriormente se determina la función de transferencia que relaciona la temperatura de salida del fluido en colector solar con la temperatura de ingreso del fluido en el colector solar.

Para ello en la ecuación 6 se consideran únicamente los términos que relacionan la temperatura de ingreso al colector con la temperatura de salida del colector.

$$\frac{dT_{co}(t)}{dt} = \frac{\dot{v}_c}{V_c} T_{ci}(t) - \frac{\dot{v}_c}{V_c} T_{co}(t) - \frac{U_L A_c T_{co}(t)}{C_c} - \frac{U_L A_c T_{ci}(t)}{C_c}$$

Se aplica la transformada de Laplace y se agrupan los términos para obtener la función de transferencia de la temperatura de salida del colector en función de la temperatura de entrada del colector, representada en la ecuación 8.

$$W_2(s) = \frac{T_{co}(S)}{T_{ci}(S)}$$

$$\frac{T_{co}(S)}{T_{ci}(S)} = \frac{\tau_c}{\tau_c S + 1} \left(\frac{v_c}{V_c} - \frac{U_L A_c}{2C_c} \right)$$

Ecuación 8. Función de transferencia con Temperatura entrada TCi

3.1.4.4 Función de transferencia de la temperatura de salida del colector en función de la temperatura ambiente

En la ecuación 6 se consideran únicamente los términos que relacionan la temperatura de ingreso al colector con la temperatura de salida del colector.

$$\frac{dT_{co}(t)}{dt} = \frac{U_L A_c}{C_c} T_{ca}(t) - \frac{U_L A_c}{2C_c} T_{co}(t) - \frac{\dot{v}_c}{V_c} T_{co}(t)$$

Se aplica la transformada de Laplace y se agrupan los términos para obtener la función de transferencia de la temperatura de salida del colector en función de la temperatura ambiente representada en la ecuación 9.

$$W_3(s) = \frac{T_{co}(S)}{T_{ca}(S)}$$

$$\frac{T_{co}(S)}{T_{ca}(S)} = \frac{\tau_c}{\tau_c S + 1} \left(\frac{U_L A_c}{C_c} \right)$$

Ecuación 9. Función de transferencia con Temperatura ambiente Tca

3.1.4.5 Función de transferencia de la temperatura de salida del colector en función del valor inicial del fluido en el colector $T_{co}(0)$

Para determinar esta función se consideran únicamente los términos que relacionan la temperatura inicial del colector, en $t=0$, con la temperatura de salida del colector.

$$\frac{dT_{co}(t)}{dt} = T_{co}(0) - \frac{U_L A_c}{2C_c} T_{co}(t) - \frac{\dot{v}_c}{V_c} T_{co}(t)$$

De donde se obtiene la función de transferencia que relaciona la temperatura de salida del colector con el estado inicial tal como se muestra en la ecuación 10.

$$W_0(s) = \frac{T_{co}(S)}{T_{co}(0)}$$

$$\frac{T_{co}(S)}{T_{co}(0)} = \frac{\tau_c}{\tau_c S + 1}$$

Ecuación 10. Función de transferencia con Temperatura inicial de colector

CAPÍTULO 4

SIMULACIÓN DEL SISTEMA HIBRIDO

4.1 MODELAMIENTO EXPERIMENTAL DE LAS FUNCIONES DE TRANSFERENCIA DEL COLECTOR SOLAR

Una vez obtenidas las ecuaciones de referencia que describen el modelo matemático del colector solar es necesario encontrar los valores de las constantes del sistema a fin de cuantificar y validar el mismo.

Para modelar el sistema experimentalmente se usará la librería System Identification Toolbox de Matlab.

Para validar el sistema se usará el software de diagrama de bloques orientado a la simulación o Simulink de Matlab.

4.1.1 DESCRIPCIÓN DEL MODELAMIENTO DE LAS FUNCIONES DE TRANSFERENCIA

Según se detalló en la sección 3.2.4 se deben determinar cuatro funciones de transferencia individuales con el fin de obtener la función de transferencia del modelo mediante la suma de las mismas en el dominio de Laplace.

Como ejemplo se describirá en detalle cómo se obtiene la función de transferencia de la temperatura de salida del fluido en función de la radiación solar o $W_1(s)$.

Para ello primeramente se recopilan los datos experimentales almacenados en el PLC y se los tabula en una hoja de cálculo de Excel a fin de poder ingresarlos al software de modelamiento Matlab.

Mediante el siguiente algoritmo se importan los datos desde Excel hacia Matlab:

```
%Programa para leer datos de Excel
function [Rad,TCout,Tempo]=Importexcel(filename, sheet, range)
filename='Solar Matlab.xlsx';
sheet='Datos1';
range1='C3:C578';
range2='D3:D578';
range3='I3:I578';
Rad=xlsread(filename, sheet, range1);
TCout=xlsread(filename, sheet, range2);
Tempo=xlsread(filename, sheet, range3);
end
```

Los datos se almacenan en 3 vectores denominados:

- Rad, radiación solar en W/m².
- TCout, temperatura de salida del colector.
- Tempo, registro del tiempo en segundos.

A continuación, se crea objeto de datos de entrada y salida a ser usado en la librería “System Identification Tool” de Matlab. Para esto se utiliza la función IDDATA en donde se consideran 1200 segundos como el tiempo de muestreo puesto que los datos en el PLC se almacenan cada 20 minutos.

```
% Acondicionamiento de las señales
W1=iddata(TCout, Rad, 1200)
Time domain data set with 575 samples.
Sampling interval: 1200
Outputs Unit (if specified) y1
Inputs Unit (if specified) u1
```

Una vez creado el objeto con los datos de entrada o radiación solar $u(t)$ y de salida o temperatura del colector $y(t)$ se los importa en el sistema tal como se observa en la figura 24.

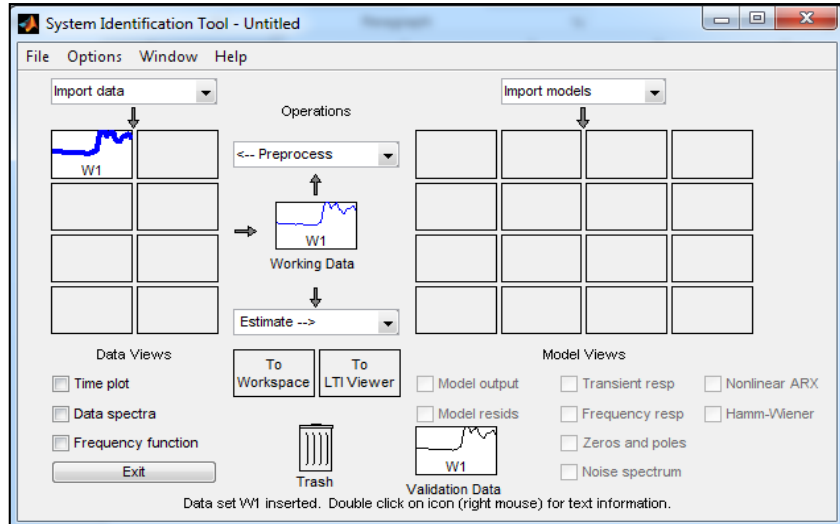


Figura 24. Ingreso de datos en System Identification Tool

Fuente: (Elaboración Autor)

La gráfica de las variables de entrada y salida se observa en la figura 25.

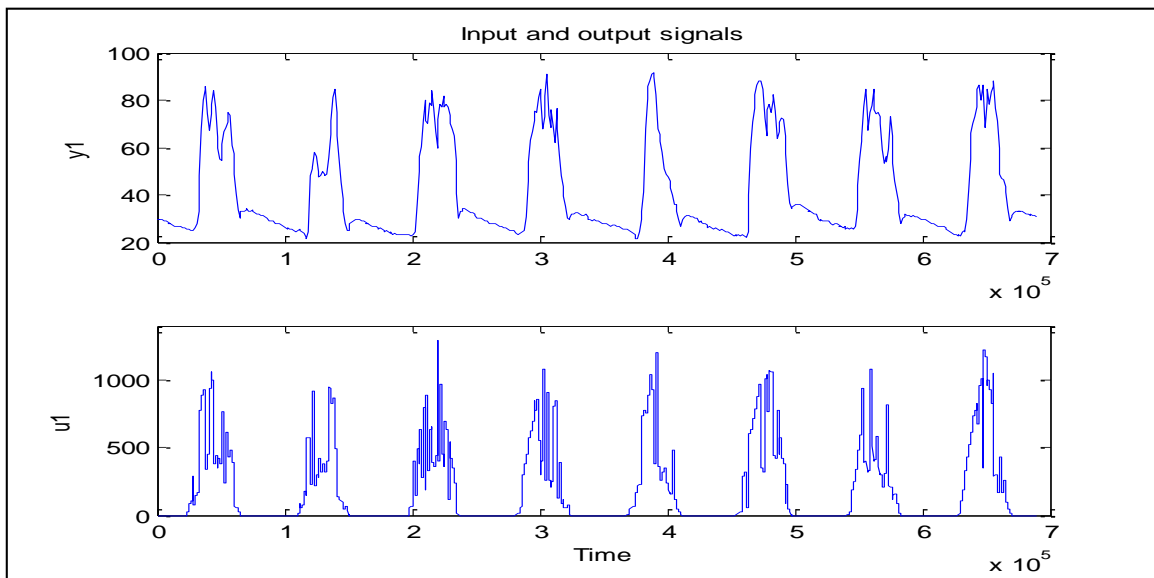


Figura 25. Radiación $u1$ y Temperatura de salida del colector $y1$

Fuente: (Elaboración Autor)

Con los datos ingresados en el sistema se realiza la simulación y se obtienen los modelos mostrados a continuación en la figura 26.

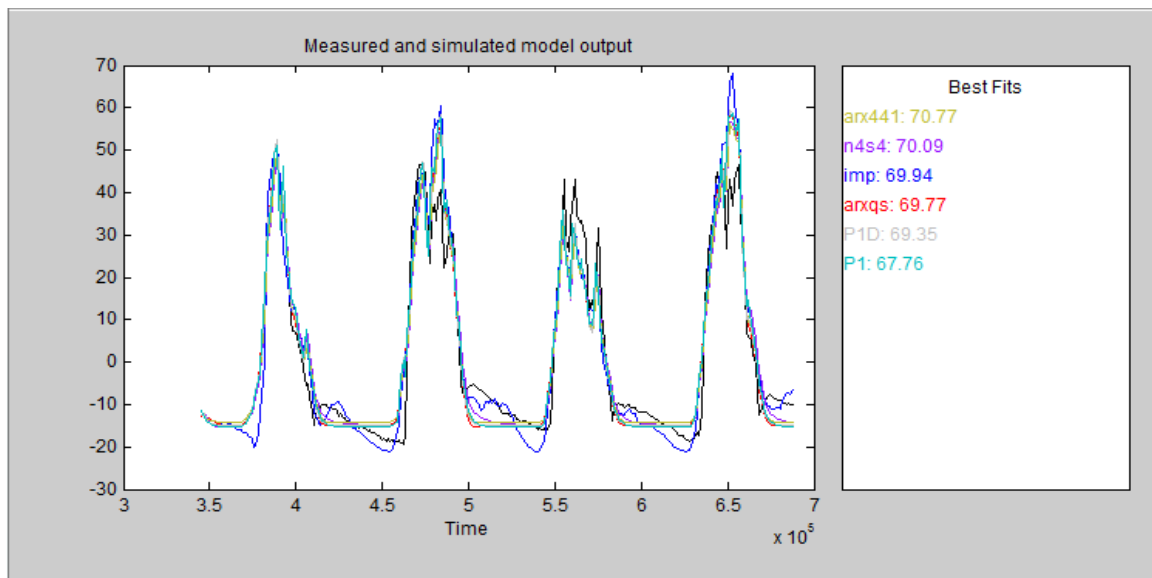


Figura 26. Modelos simulados por Matlab

Fuente: (Elaboración Autor)

En la simulación se obtienen algunos modelos tipo tal como el de variable de estado (n4s4), modelo de regresión polinómico (arx), y de procesos (P1). Se aprecia que las estimaciones de cada modelo oscilan entre un 70% y 67% con respecto a la salida original de temperatura representada en color negro. Debido a la esto se ha seleccionado el modelo que ofrece mayor simplicidad para el análisis y ofrece una buena aproximación, es decir el modelo P1, que se trata de un modelo de procesos descrito por una función de transferencia de primer orden con un polo en el dominio de Laplace (S).

A continuación, se representa la respuesta al escalón unitario de los sistemas mostrados en la figura 27.

Se observa que el modelo seleccionado P1, representado por la línea de color gris, tiene el tiempo de estabilización más rápido lo que implica que se trata de un modelo estable y lo que es más importante sencillo de representar.

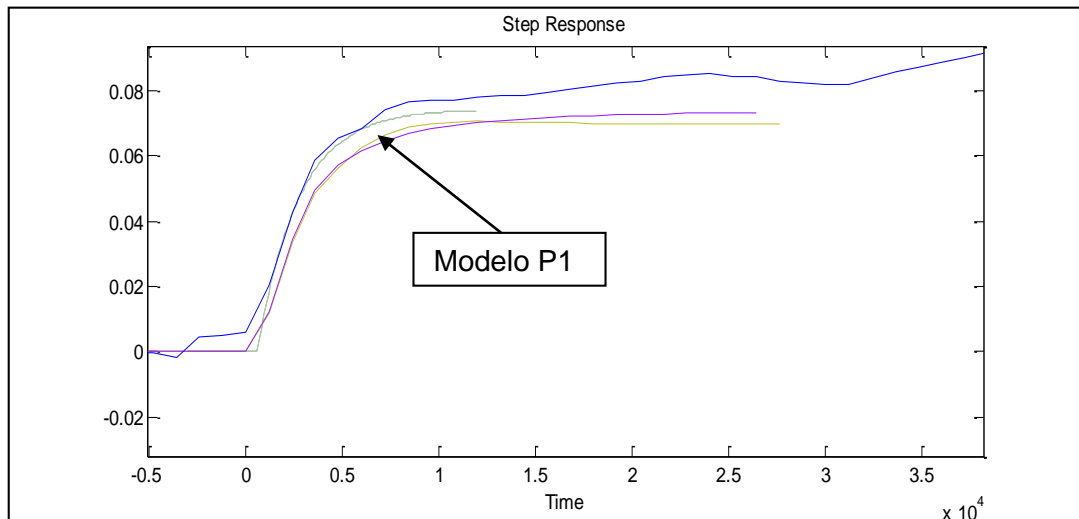


Figura 27. Respuesta al escalón unitario

Fuente: (Elaboración Autor)

El modelo seleccionado P1 representa un sistema de primer orden puesto que tiene solamente un polo en el denominador en la función de transferencia.

La función de transferencia obtenida mediante simulación se describe a continuación en la ecuación 11.

$$G(s) = \frac{0.07564}{1 + 2947s}$$

Ecuación 11. Función de transferencia simulada en Matlab

4.2 VALIDACIÓN DEL MODELO TEÓRICO

A fin de validar los datos experimentales con los teóricos se compara la ecuación 10 con la forma canónica de la función de transferencia descrita en la

ecuación 5. Se puede determinar de esta manera la constante de tiempo τ del sistema, que es igual a 2947 segundos.

Este valor debe se usa para calcular el flujo másico o caudal, mismo que se obtiene despejando el caudal de la ecuación 12 que se deriva de la ecuación 6.

$$v_c = \frac{V_c}{\tau_c} - \frac{V_c U_L A_c}{2C_c}$$

Ecuación 12. Flujo másico o caudal del colector

Para ello se calcula primeramente la capacidad específica del fluido en el colector mediante la siguiente expresión.

$$C_c = c_c V_c \rho_c$$

Ecuación 13. Capacidad específica del fluido

En donde:

c_c , representa el calor específico del fluido, agua ($J \text{ kg}^{-1}K^{-1}$)

V_c , representa el volumen del fluido en el colector (m^3)

ρ_c , representa la densidad del fluido en el colector ($kg \text{ m}^{-3}$)

El volumen total del colector (V_c) se calcula considerando que se tienen 11 tubos de 0.5 pulgadas de diámetro de 1.8 m de longitud y dos tubos colectores de 1.18 pulgadas de diámetro de 0.97 m de longitud.

$$V_1 = 11 * \pi * r^2 * h = 2508.2 \text{ cm}^3$$

$$V_2 = 2 * \pi * r^2 * h = 1382.9 \text{ cm}^3$$

$$V_C = V_1 + V_2 = 3891.1 \text{ cm}^3$$

$$V_C = V_1 + V_2 = 0.003891m^3$$

De donde se obtiene el valor de C_c mostrado a continuación.

$$C_c = 4181 \frac{J}{kgK} * 0.003891m^3 * 1000 \frac{kg}{m^3}$$

$$C_c = 16268 \frac{J}{K}$$

El área del colector se calcula a continuación.

$$A_c = L_c * B_c = 1.8m * 0.8m = 1.44m^2$$

El coeficiente de transferencia de calor U_L estimado mediante la simulación y de acuerdo a la tabla 7 se muestra a continuación.

$$U_L = 7 \frac{W}{m^2K}$$

Al reemplazar estos valores en la ecuación 12 se obtiene un caudal de 0.11 ml/s. Este caudal dista mucho del valor que se ha estimado en los estudios realizados sobre el flujo másico del efecto termosifón [42], en donde se obtienen valores promedio entre 3 y 13 ml/s. Estos valores pueden ser transformados a flujo másico considerando $\rho_{H_2O} = 1 \text{ g/ml}$.

Esta imprecisión en el modelo se produce por el efecto de la variación en la radiación solar o ruido en la señal de entrada causada por la nubosidad en el período

de estudio. Por lo tanto, se observa que es necesario afinar el modelo para obtener un valor más preciso de caudal.

La primera iteración del modelo se realiza limitando el período de análisis a un solo día a fin de reducir el efecto las variaciones o ruido que alteran el modelo. Con estos datos se obtuvo un modelo con una constante de tiempo τ equivalente a 1580 segundos tal como se observa en la figura 28 de la respuesta al escalón unitario.

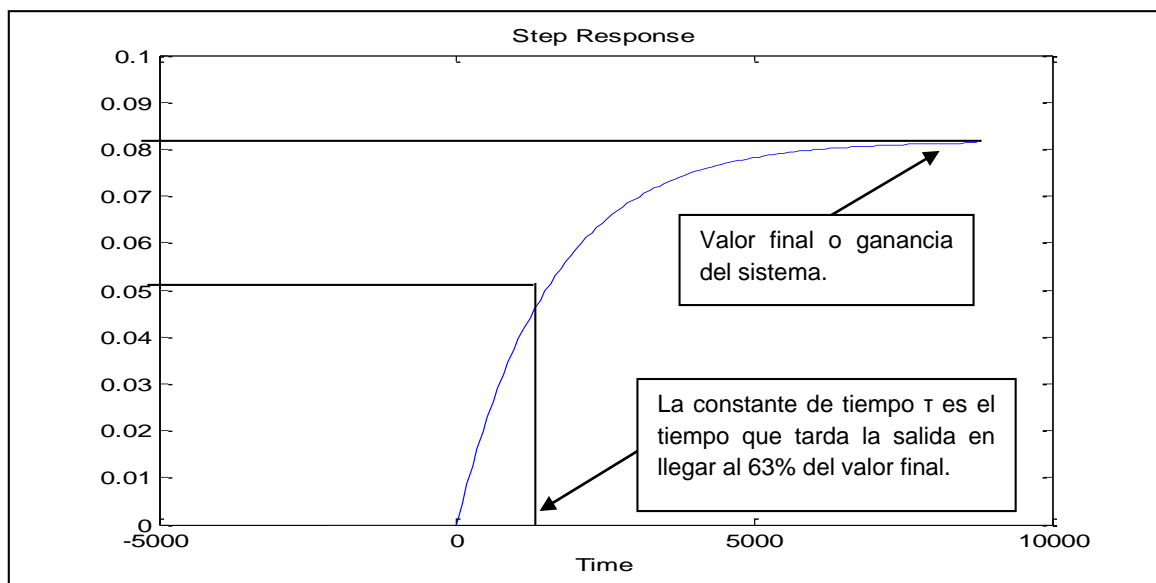


Figura 28. Respuesta del sistema al escalón unitario con $T=1580s$

Fuente: (Elaboración Autor)

La nueva función de transferencia obtenida experimentalmente se describe a continuación en la ecuación 14.

$$G(s) = \frac{0.08167}{1 + 1580s}$$

Ecuación 14. Función de transferencia del modelo

Con este nuevo valor de la constante τ se obtiene un valor de caudal de 1.25 ml/s o flujo másico de 1.25 g/s. Este valor todavía dista de los valores calculados en los estudios.

Una segunda iteración del modelo en una región más estable arroja un valor de τ equivalente a 582 segundos tal como se observa en la figura 29 de la respuesta al escalón unitario.

Reemplazando este nuevo valor de la constante de tiempo en la ecuación 14 se obtienen valores de caudal de 5.48 ml/s equivalente a un flujo másico 5.48 g/s en el colector. Estos valores de caudal están dentro de los valores estimados (Wenxian, 1991).

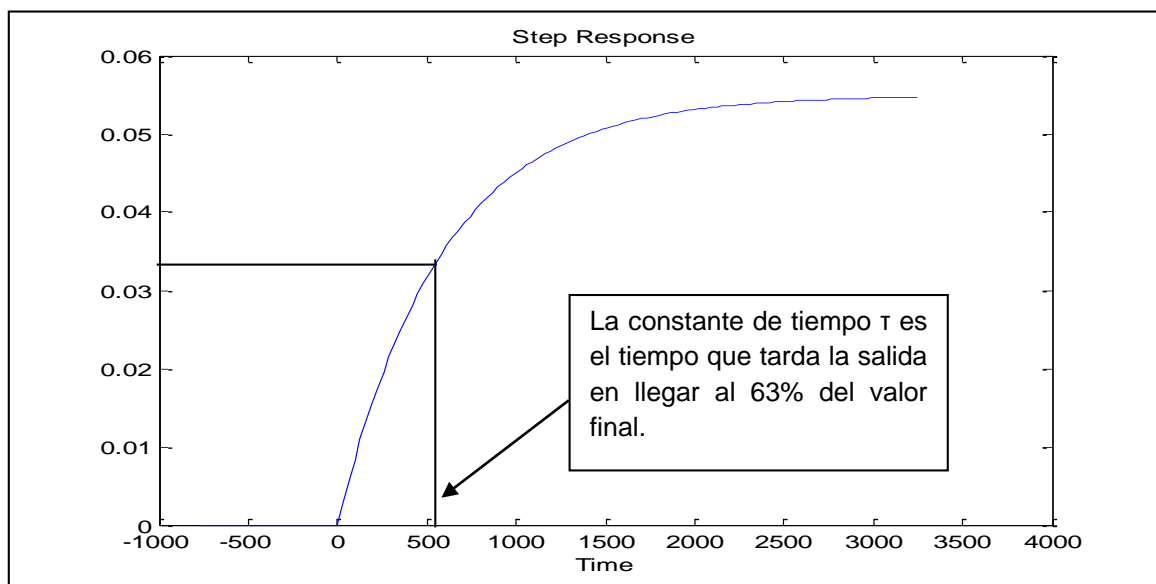


Figura 29. Respuesta al escalón unitario del sistema con $T=528s$

Fuente: (Elaboración Autor)

La función de transferencia recalculada con estos nuevos valores se muestra a continuación.

$$G(s) = \frac{0.054889}{1 + 582s}$$

Ecuación 15. Función de transferencia con $T=528 s$

El siguiente paso en el proceso de validación del modelo consiste en evaluar la eficiencia óptica del sistema que se puede obtener al comparar la ecuación 7 con la ecuación 15.

$$\frac{T_{co}(S)}{I_c(S)} = \frac{(\tau_c A_c \eta_0)}{C_c \tau_c S + 1}$$

$$G(s) = \frac{0.054889}{1 + 582s}$$

$$\frac{(\tau_c A_c \eta_0)}{C_c} = 0.054889$$

$$\eta_0 = \frac{0.054889 C_c}{\tau_c A_c}$$

$$\eta_0 = 1.048$$

Se observa que el valor de eficiencia obtenido por la simulación no concuerda con los valores reales observados en la práctica (Buzas J. , Solar Domestic Hot Water System Simulation using block oriented software, 2009).

4.2.1 FACTOR DE CORRECCION DE LA ECUACION DIFERENCIAL DEL COLECTOR SOLAR

La ecuación de estado usada para describir el sistema considera un colector solar de placa plana en el modelo (Buzas J. , Solar Domestic Hot Water System Simulation using block oriented software, 2009).

Sin embargo, la placa colectora del sistema construido no corresponde completamente a este modelo puesto que tiene espacios por donde deja pasar la

radiación solar permitiendo de esta manera que se refleje en una lámina reflectora nuevamente hacia el colector.

Por lo tanto, esta característica debe ser incorporada en el modelo a fin de ajustar los valores de las variables.

En la ecuación 7, que relaciona la temperatura de salida del colector con la radiación solar se incorpora un factor de ajuste de radiación sobre la base del área del colector debido a que la característica de construcción del panel descrita anteriormente influye directamente sobre el área posterior del colector. El factor de ajuste se ha denominado F_{arb} y afecta directamente al área del colector en la ecuación 6. Con ello se obtiene la ecuación modificada mostrada a continuación:

$$\frac{dT_{co}(t)}{dt} = \frac{F_{arb}A_c\eta_0}{C_c} I_c(t) - \frac{U_L F_{arb} A_c}{C_c} (T_{cav}(t) - T_{ca}(t)) + \frac{\dot{v}_c(t)}{V_c} (T_{ci}(t) - T_{co}(t))$$

Ecuación 16. Ajuste de ecuación 6 con factor F_{arb}

Siguiendo los pasos de la sección 3.1.4 se obtienen las ecuaciones 17, 18, 19 y 20 que incluyen al factor de ajuste F_{arb}

$$\tau_c = \frac{1}{\frac{U_L F_{arb} A_c}{2C_c} + \frac{v_c}{V_c}}$$

Ecuación 17. Constante de tiempo del sistema con factor ajuste F_{arb}

$$v_c = \frac{V_c}{\tau_c} - \frac{V_c U_L F_{arb} A_c}{2C_c}$$

Ecuación 18. Caudal en el colector con factor de ajuste F_{arb}

$$\eta_0 = \frac{0.054889C_c}{\tau_c F_{arb} A_c}$$

Ecuación 19. Eficiencia del colector con factor de ajuste F_{arb}

$$U_L = \frac{2C_c}{\tau_c F_{arb} A_c} - \frac{v_c 2C_c}{V_c F_{arb} A_c}$$

Ecuación 20. Coeficiente de transferencia de calor con factor de ajuste Farb

Se analiza a continuación el factor de ajuste Farb en función de las variables del colector como caudal, constante de tiempo y factor de transferencia de calor a fin de estimar el valor que más se ajusta a los datos experimentales.

4.2.1.1 Constante de tiempo en función del factor de corrección Farb

La relación entre la constante de tiempo T_c y el factor de ajuste Farb se muestra a continuación en la figura 30.

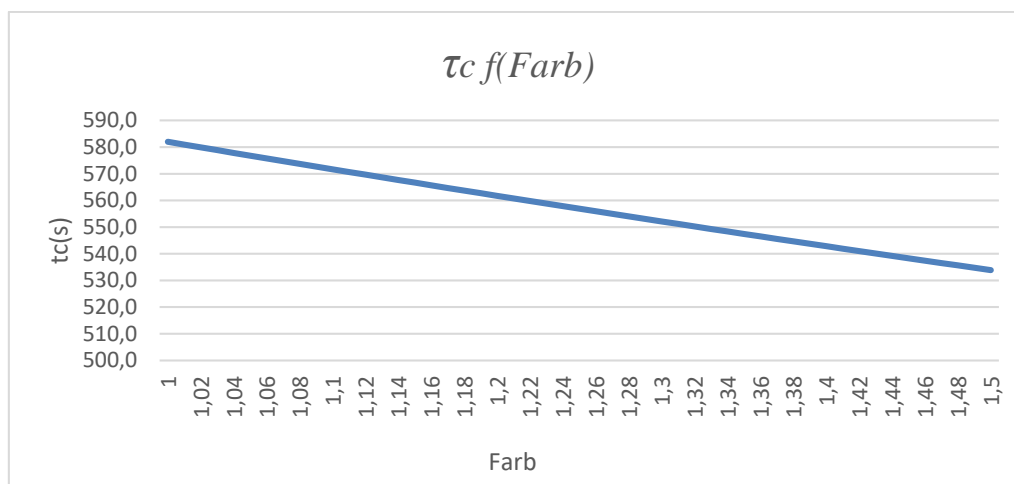


Figura 30. T_c en función de factor de ajuste Farb

Fuente: (Elaboración Autor)

Esta relación inversa se puede explicar debido a que se está incrementando el área de captación relativa pero el espacio se mantiene por lo que el colector absorbe mayor cantidad de radiación y llega a su estado estable en menor tiempo.

4.2.1.2 Caudal del colector en función del factor de corrección $Farb$

La relación entre la constante de tiempo T_c y el factor de ajuste $Farb$ se muestra a continuación en la figura 31.

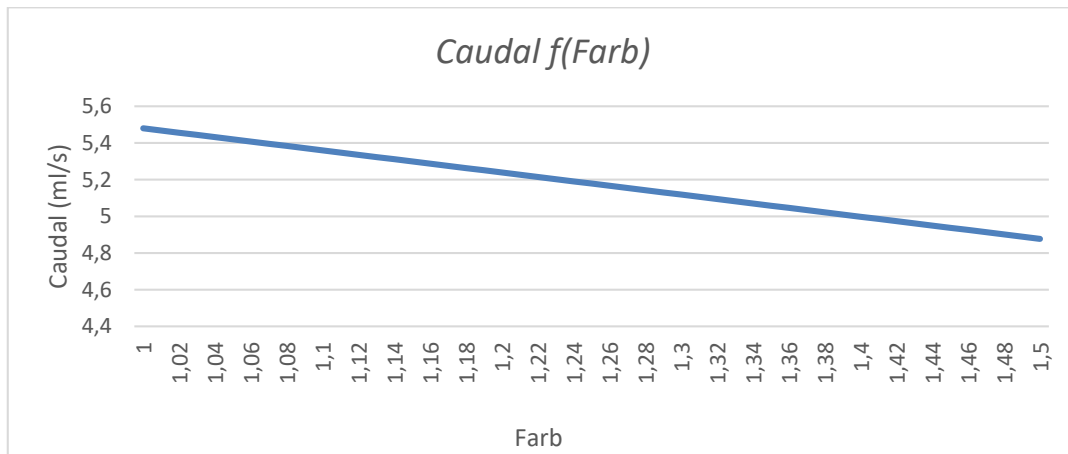


Figura 31. Caudal en función del factor de ajuste

Fuente: (Elaboración Autor)

Esta relación inversa se puede explicar por el aparente incremento del área a través de la que tiene que circular el fluido, aunque como se ve en la figura 32 la disminución de la constante de tiempo contrarresta este fenómeno.

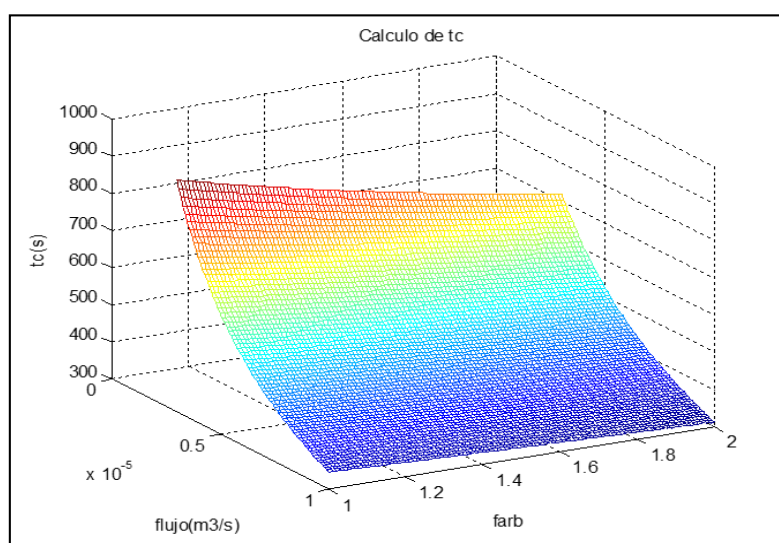


Figura 32. Constante de tiempo t_c en función del caudal y el factor $Farb$

Fuente: (Elaboración Autor)

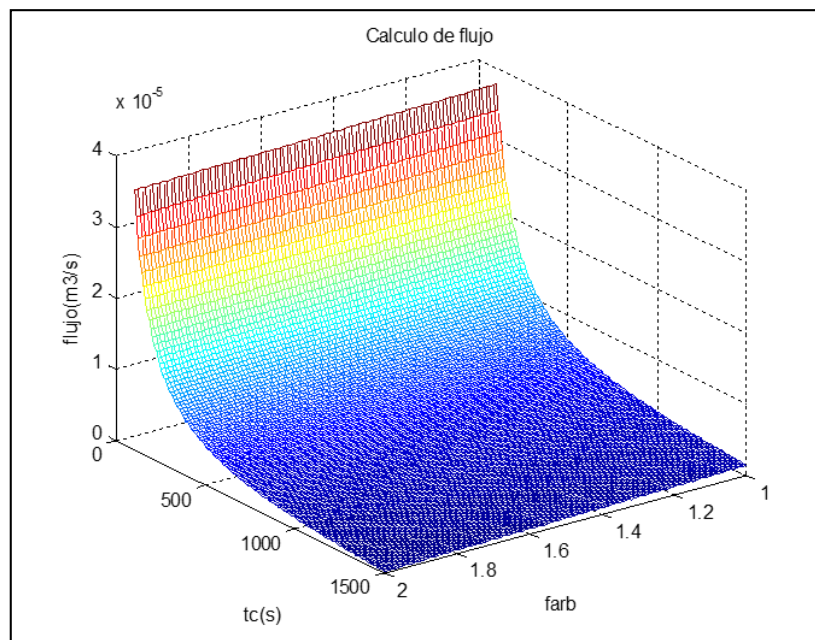


Figura 33. Flujo en función de la constante de tiempo y el factor F_{arb}

Fuente: (Elaboración Autor)

En las figuras 32 y 33 se observa que la variación del factor de ajuste F_{arb} tiene mayor influencia sobre la constante de tiempo que sobre el caudal, puesto que éste se ajusta en función de la primera.

4.2.1.3 Coeficiente de pérdidas térmicas en función del factor de corrección F_{arb}

La relación entre el coeficiente de pérdidas térmicas y el factor de ajuste F_{arb} se muestra a continuación en la figura 34.

Se aprecia que el valor del coeficiente de pérdidas tiene una relación inversa con el factor de ajuste F_{arb} .

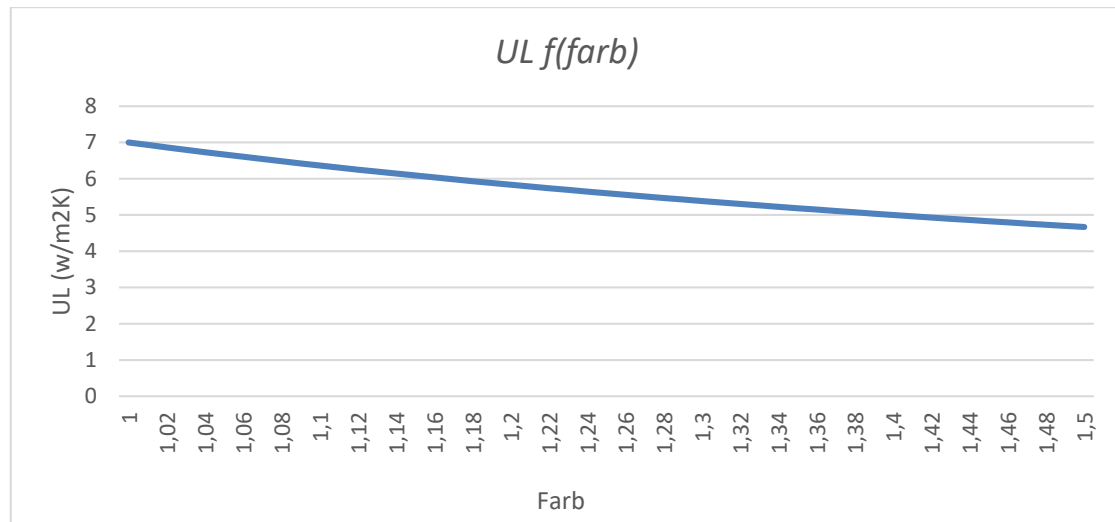


Figura 34. Pérdidas térmicas en función del coeficiente (*Farb*)

Fuente: (Elaboración Autor)

4.2.1.4 Eficiencia del sistema en función del factor de corrección *Farb*

Como se vio en la sección 4.2 la eficiencia obtenida mediante la simulación de Matlab no está dentro de los valores promedio de la tecnología (Buzas J. , Solar Domestic Hot Water System Simulation using block oriented software, 2009), (Buzas, Farkas, & Brio, 1998)

Por ello y a fin de validar las constantes obtenidas en el modelo se evalúa la eficiencia en función del factor de ajuste tal como se muestra en la figura 35.

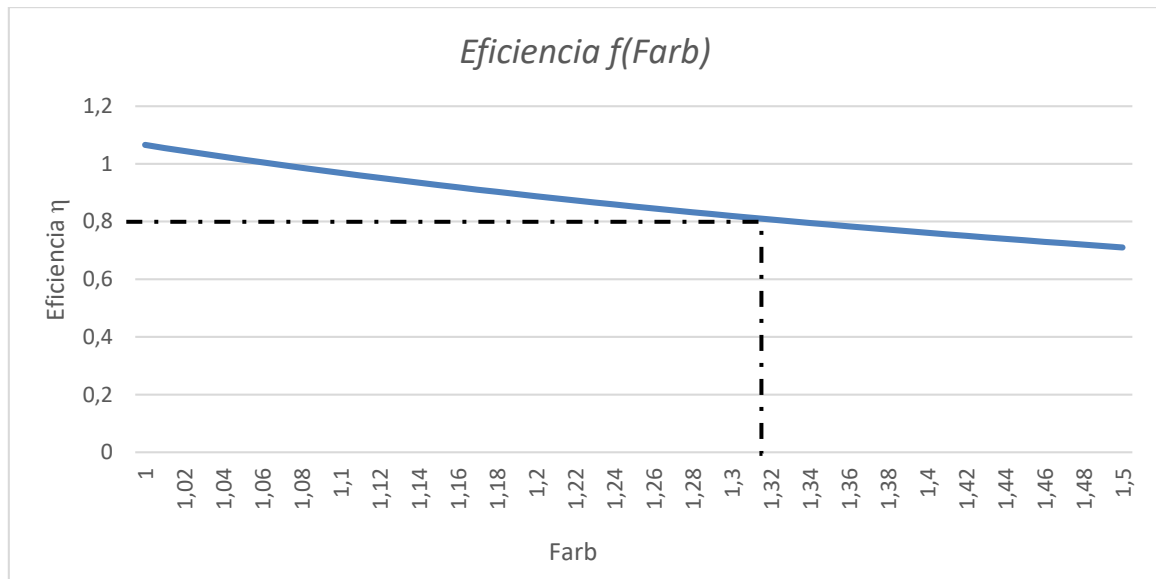


Figura 35. Ajuste de eficiencia en función de F_{arb}

Fuente: (Elaboración Autor)

A fin de que la eficiencia esté dentro de los valores esperados, es decir alrededor del 80% (Buzas, Farkas, & Brio, 1998) se debe tener un factor de ajuste F_{arb} de 1.33 lo que representaría un incremento del 33% del área del captador solar plano convencional.

Con este valor se obtienen las constantes del modelo mostradas a continuación usadas para obtener las funciones de transferencia.

$$A_c = 1.44 \text{ (m}^2\text{)}$$

$$\eta_o = 0.8 \text{ (adimensional)}$$

$$C_c = 16268 \text{ (JK}^{-1}\text{)}$$

$$U_L = 7 \text{ (W m}^{-2}\text{ °C}^{-1}\text{)}$$

$$V_c = 0.003891 \text{ (m}^3\text{)}$$

$$\dot{V}_c = 5.48 \times 10^{-3} \text{ (m}^3\text{s}^{-1}\text{)}$$

$$F_{arb} = 1.33 \text{ (adimensional)}$$

$$\tau_c = 582 \text{ (s)}$$

4.2.2 FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DEL COLECTOR SOLAR

Aplicando el principio de superposición mediante la suma de las funciones de transferencia individuales se obtiene la temperatura de salida del colector.

$$T_{co}(S) = W_0(s)T_{co}(0) + W_1(s)I_c(s) + W_2(s)T_{ci}(s) + W_3(s)T_{ca}(s)$$

Ecuación 21. Temperatura de salida del colector

$$W_1(s) = \frac{\frac{(\tau_c F_{arb} A_c \eta_0)}{C_c}}{\tau_c S + 1} = \frac{0.0548}{582s + 1}$$

Ecuación 22. Ecuación de transferencia en función de radiación solar

$$W_2(s) = \frac{\tau_c}{\tau_c S + 1} \left(\frac{v_c}{V_c} - \frac{U_L F_{arb} A_c}{2C_c} \right) = \frac{0.58}{582s + 1}$$

Ecuación 23. Ecuación de transferencia en función de temperatura de entrada del colector

$$W_3(s) = \frac{\tau_c}{\tau_c S + 1} \left(\frac{U_L F_{arb} A_c}{C_c} \right) = \frac{0.48}{582s + 1}$$

Ecuación 24. Ecuación de transferencia en función de temperatura ambiente

$$W_0(s) = \frac{\tau_c}{\tau_c S + 1} = \frac{582}{582s + 1}$$

Ecuación 25. Ecuación de transferencia en función de temperatura de salida inicial del colector

Mediante el software de simulación de diagramas de bloques Simulink (figura 36) se representan las funciones de transferencia usadas para obtener la temperatura de colector de salida mostradas en la ecuación 21.

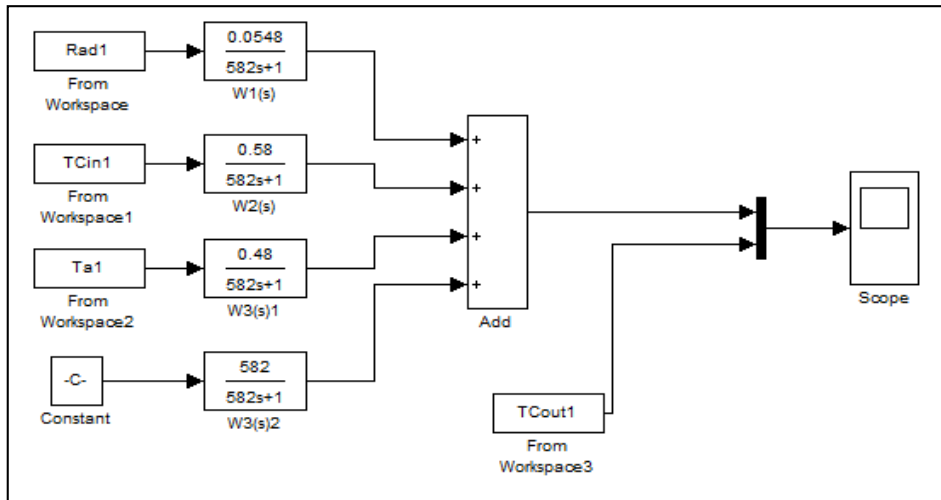


Figura 36. Simulación del modelo mediante Simulink

Fuente: (Elaboración Autor)

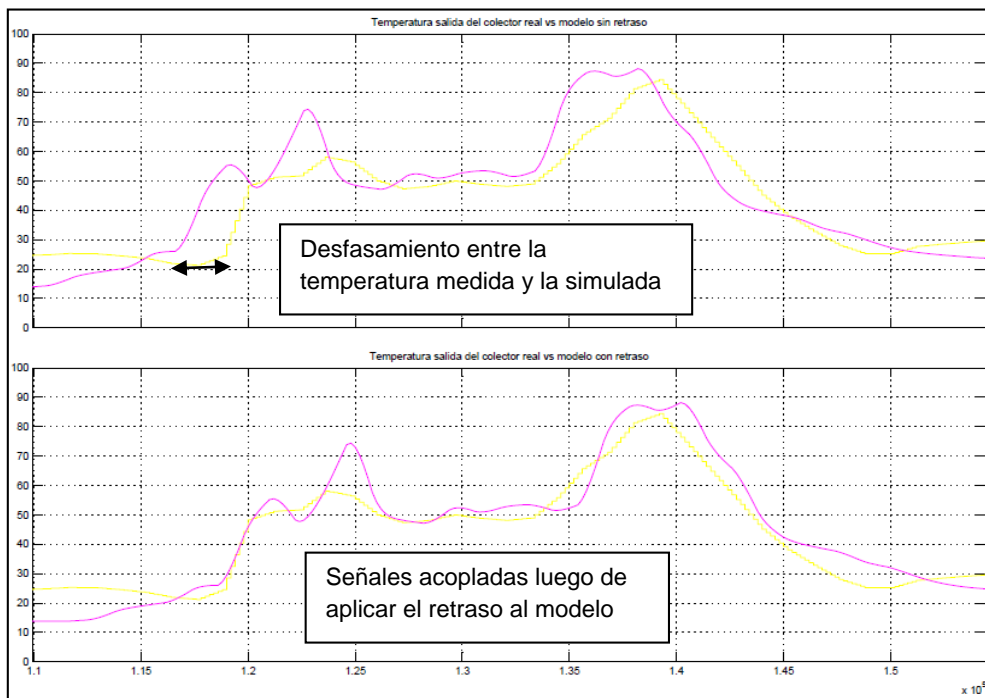


Figura 37. Comparación temperatura de salida medida y calculada por el modelo

Fuente: (Elaboración Autor)

En la figura 37 se observa en color rosa la temperatura de salida del colector simulada por el modelo y en color amarillo a la temperatura medida a la salida del colector.

En la parte superior de la figura la temperatura obtenida mediante la simulación del modelo se encuentra adelantada con respecto a la temperatura real. En la parte inferior de la figura se observan las dos señales luego de haber aplicado un retardo en las funciones de transferencia del modelo.

El retardo en el dominio de Laplace implica también un desplazamiento en el dominio del tiempo tal como se muestra en la tabla 8.

Tabla 8. Representación del retardo en Laplace

| Dominio del tiempo | Dominio de Laplace |
|---|-----------------------|
| $g(t) = \begin{cases} 0 & 0 \leq t \leq T \\ f(t - T) & t \geq T \end{cases}$ | $G(s) = e^{-st} F(s)$ |

Fuente: (Elaboración Autor)

Aplicando este retardo en las funciones de transferencia del sistema representadas en las ecuaciones 22, 23, 24 y 25 se obtiene finalmente la ecuación que describe el modelo del colector solar para este caso en particular, tal como se muestra en la ecuación 30.

$$W_1(s) = \frac{0.0548}{582s + 1} e^{-2000s}$$

Ecuación 26. Función transferencia radiación con retardo temporal

$$W_2(s) = \frac{0.58}{582s + 1} e^{-2000s}$$

Ecuación 27. Función transferencia temperatura entrada con retardo temporal

$$W_3(s) = \frac{0.48}{582s + 1} e^{-2000s}$$

Ecuación 28. Función transferencia temperatura ambiente con retardo temporal

$$W_0(s) = \frac{582}{582s + 1} e^{-2000s}$$

Ecuación 29. Función transferencia temperatura inicial con retardo temporal

$$T_{co}(S) = e^{-2000s} \left(\frac{582}{582s + 1} T_{co}(0) + \frac{0.0548}{582s + 1} I_c(S) + \frac{0.58}{582s + 1} T_{ci}(S) + \frac{0.48}{582s + 1} T_{ca}(S) \right)$$

Ecuación 30. Función transferencia temperatura salida del colector

4.2.3 REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA SOLUCIÓN DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DEL COLECTOR SOLAR

En la figura 38 se presentan las gráficas de la temperatura de salida obtenida mediante el modelo y la temperatura de salida medida en función de las entradas individuales que conforman la ecuación 30.

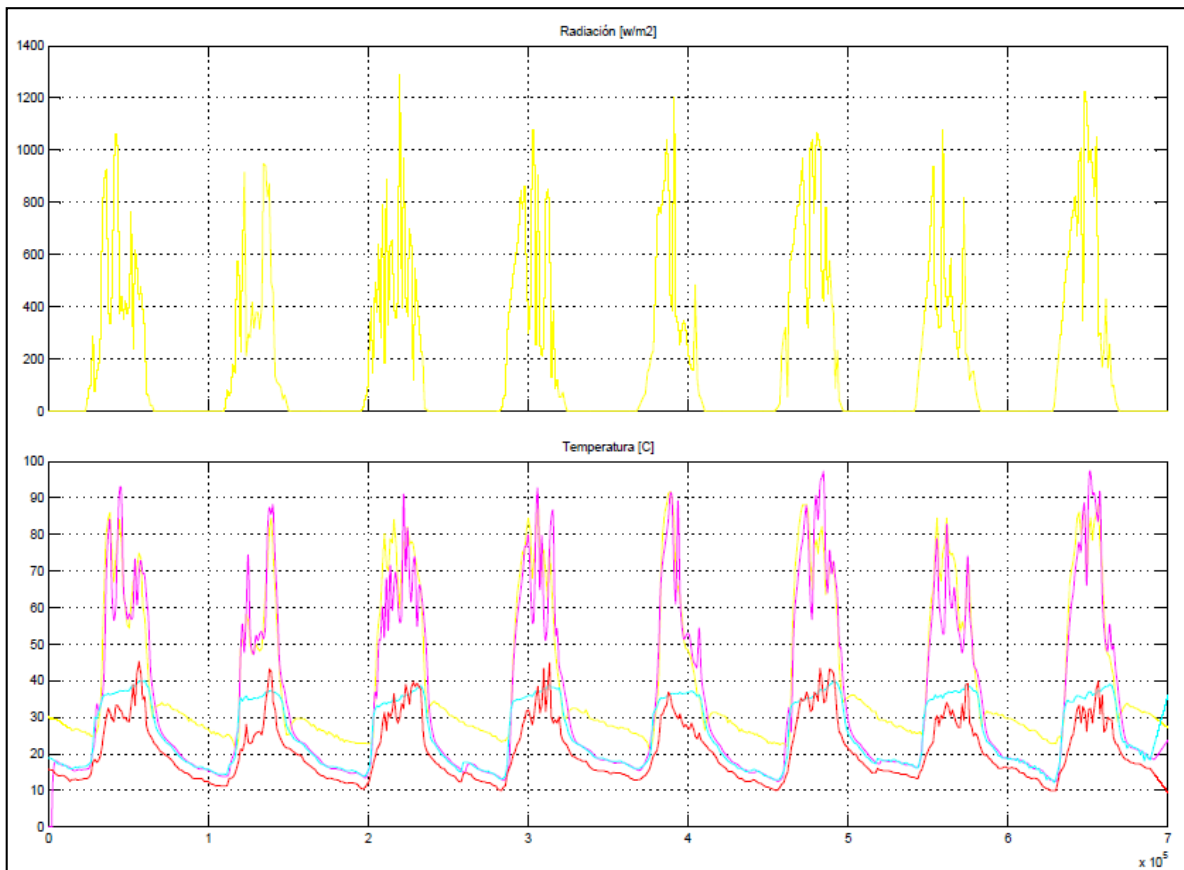


Figura 38. Gráficas de radiación y temperaturas

Fuente: (Elaboración Autor)

En la parte superior de la figura 38 se observa la gráfica de la radiación. En la parte inferior se muestran las temperaturas de entrada y salida del sistema. En la figura 39 se aprecia el detalle de las temperaturas tomadas durante el día 14 de junio 2014.

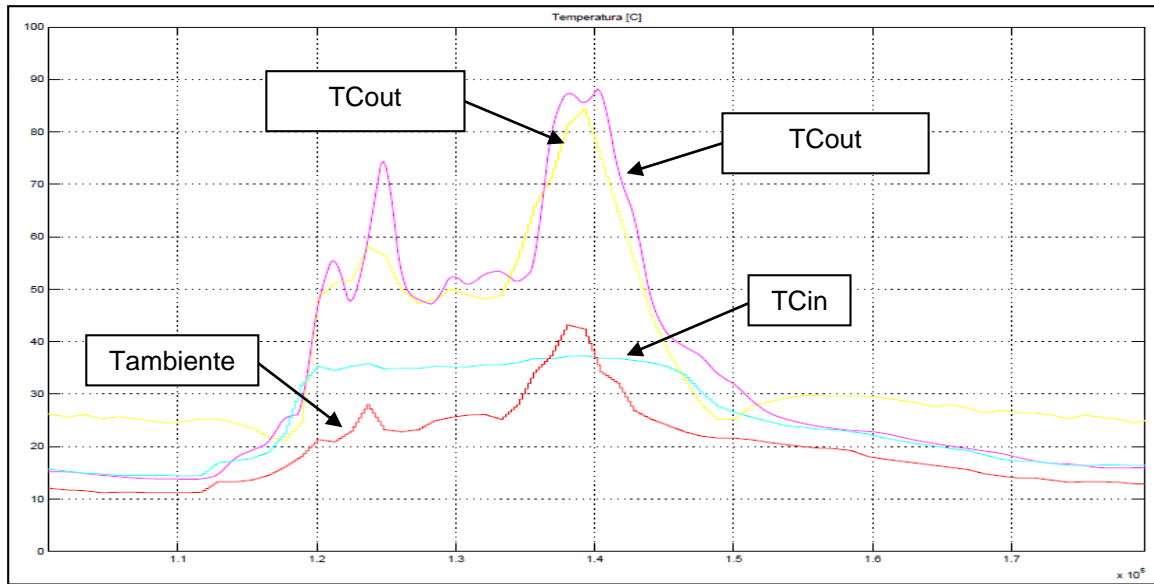


Figura 39. Temperaturas del colector teóricas y experimentales

Fuente: (Elaboración Autor)

La variación entre el promedio de la temperatura de salida calculada por el modelo y la temperatura de salida medida es de $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ sin tomar en cuenta el rango de tiempo en el que la radiación solar baja a cero puesto que el modelo no considera el tanque de almacenamiento térmico que permite que la temperatura del agua se mantenga en valores sobre los $21\text{ }^{\circ}\text{C}$ ya que el modelo estima que la temperatura del agua baja a los niveles de la temperatura de entrada T_{cin} .

CAPÍTULO 5

CONSTRUCCIÓN Y PUESTA EN MARCHA DEL PROTOTIPO

5.1 DESCRIPCIÓN DE LOS ELEMENTOS DEL SISTEMA

Una vez determinado el modelo matemático y las dimensiones físicas de los elementos se procedió a construir el sistema.

Durante la construcción y montaje del sistema de calentamiento solar híbrido se utilizaron los elementos mostrados a continuación

5.1.1 TUBOS DE COBRE

Los tubos de cobre permiten la circulación de agua mediante el efecto de termosifón a través del sistema



Figura 40. Tubos de cobre de media pulgada

Fuente: (Elaboración Autor)

5.1.2 PLACA COLECTORA

Los tubos de cobre fueron soldados a una lámina de cobre de manera intercalada a fin de dejar espacio en la placa por donde pueda ingresar la radiación solar y rebojar en la superficie reflectora.



Figura 41. Soldadura de placa de cobre

Fuente: (Elaboración Autor)

La placa colectora terminada se muestra en la figura 42.

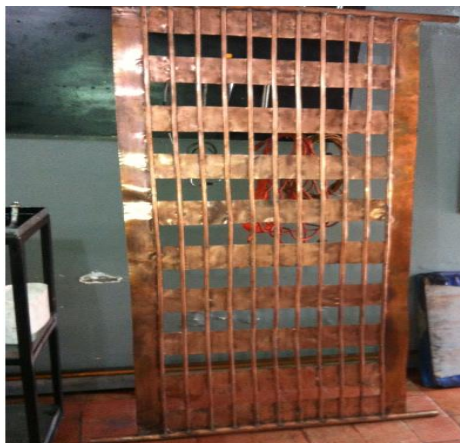


Figura 42. Placa colectora

Fuente: (Elaboración Autor)

5.1.3 CAJA COLECTORA

La placa colectora fue soldada a la caja colectora con el material aislante de fibra de vidrio en la base y vidrio reflector en la superficie. Se puede ver en la figura 43 la lámina reflectora que se encuentra instalada a continuación de la placa colectora. El propósito de esta lamina es reflejar la radiación incidente y así aumentar el efecto de recolección de calor por parte del captador.



Figura 43. Caja colectora con lamina reflectora en la base

Fuente: (Elaboración Autor)

5.1.4 TANQUE DE ALMACENAMIENTO

El tanque de almacenamiento construido tiene capacidad para 120 litros. En él se instalaron dos resistencias eléctricas de 1500 watts a fin de tener un sistema de respaldo en las noches o días de poca radiación cuando su temperatura se encuentre debajo de los límites requeridos.



Figura 44. Tanque de almacenamiento con orificios para resistencias eléctricas

Fuente: (Elaboración Autor)

5.1.5 SISTEMA DE RECOLECCIÓN, ALMACENAMIENTO DE DATOS y CONTROL DE TEMPERATURA (PLC)

Para almacenar los datos y controlar el encendido de las resistencias electricas se utilizo un PLC que fue montado en una caja hermetica para soportar las condiciones climaticas del exterior. El mismo se muestra en la figura 45.



Figura 45. PLC

Fuente: (Elaboración Autor)

5.1.6 SISTEMA COLECTOR SOLAR HIBRIDO

En la figura 46 se aprecia el Sistema colector solar hibrido completo.

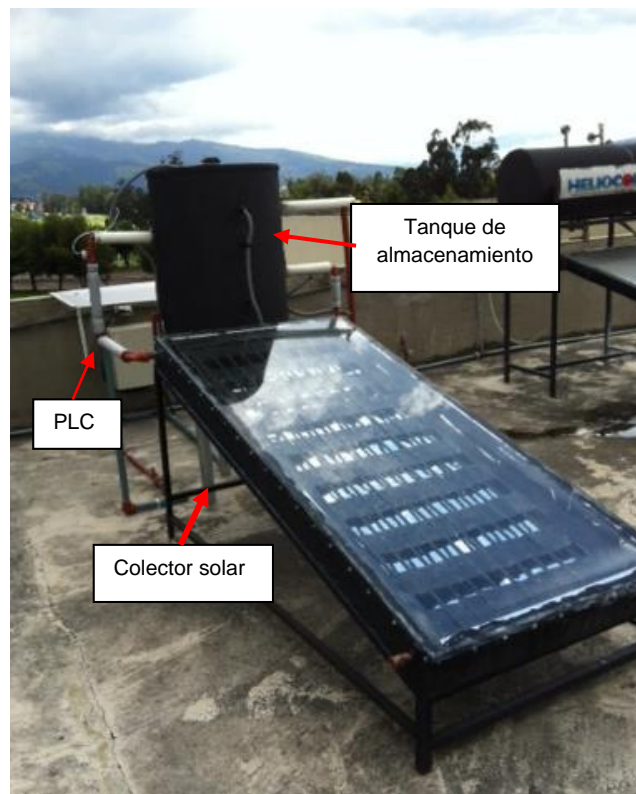


Figura 46. Sistema colector solar hibrido

Fuente: (Elaboración Autor)

5.2 PUESTA EN MARCHA DEL SISTEMA

Para recolectar las variables de medición mencionadas en la sección 3.1.4, mismos que se utilizaron para los cálculos de eficiencia del colector se procedió de la siguiente manera.

1. Revisar que la válvula de paso de agua esté siempre abierta.

NOTA. Si se vacía el tanque de almacenamiento y se dejan conectadas las resistencias de respaldo, éstas pueden verse afectadas, comprometiendo los resultados del proyecto.

2. Revisar que tanto el cable blanco como el cable azul estén conectados a la fuente de alimentación. El cable azul alimenta al PLC, el cable blanco alimenta las resistencias eléctricas de respaldo, tal como se observa en la figura 3.

NOTA. En caso de no requerir respaldo eléctrico se podrá desconectar el cable blanco que alimenta las resistencias eléctricas para calentamiento de agua.

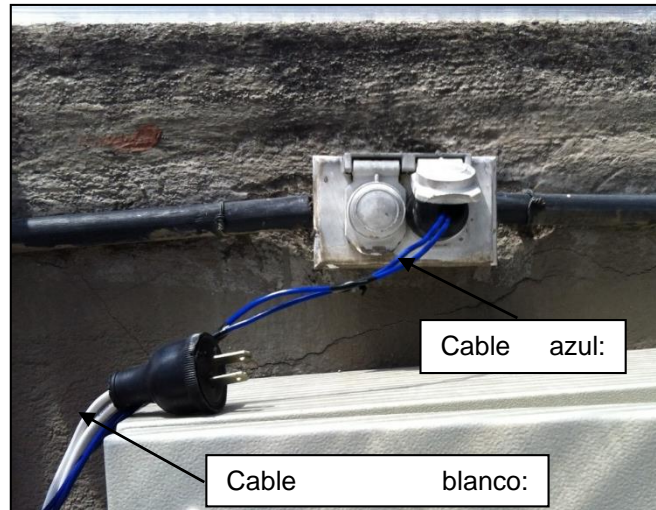


Figura 47. Cables de alimentación del sistema

Fuente: (Elaboración Autor)

3. Revisar periódicamente que el sensor de luminosidad ubicado en la parte superior del tanque de almacenamiento, mostrado en la figura 4, se encuentre limpio. Esto garantizará el correcto funcionamiento del sistema.



Figura 48. Sensor de luminosidad

Fuente: (Elaboración Autor)

4. Recircular el agua del tanque de almacenamiento. Para ello se debe abrir la válvula de consumo regularmente. Considerando una razón de consumo de 3 lt/min se estima recircular toda el agua del tanque con capacidad de 120 lt en 40 minutos aproximadamente.

Mediante el procedimiento de descarga de datos del PLC mostrado en la sección 5.3 se debe descargar la información almacenada en el PLC de las variables mencionadas en la sección 3.1.4 Los datos descargados del PLC se almacenarán en formato CSV y pueden ser abiertos usando el programa Microsoft Excel.

En la tabla 9 se muestra un ejemplo de los datos a ser obtenidos luego de la descarga.

Tabla 9. Datos obtenidos del PLC

| Temp Sup Tanque | Temp Int Tanque | Temp Inf Tanque | Temp Salida Col | Temp Entrada Col | Temp Amb | Caudal Col | Caudal Consumo | Lum | Tiempo Resis On | Día | Hora | Min |
|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|----------|------------|----------------|-----------|-----------------|--------|--------|--------|
| 38,900 | 32,500 | 28,300 | 22,500 | 21,300 | 18,400 | 0,000 | 0,000 | 8,889,000 | 10,795,000 | 16,000 | 18,000 | 40,000 |
| 40,100 | 35,200 | 28,700 | 24,700 | 20,900 | 17,600 | 0,000 | 0,000 | 9,251,000 | 2,138,000 | 16,000 | 19,000 | 0,000 |
| 40,000 | 34,800 | 30,000 | 24,300 | 20,700 | 17,600 | 0,000 | 0,000 | 9,264,000 | 0,000 | 16,000 | 19,000 | 20,000 |
| 40,000 | 34,400 | 31,700 | 23,900 | 21,000 | 16,800 | 0,000 | 0,000 | 9,311,000 | 0,000 | 16,000 | 19,000 | 40,000 |
| 40,100 | 35,200 | 28,000 | 24,800 | 19,700 | 16,500 | 0,000 | 0,000 | 9,307,000 | 1,076,000 | 16,000 | 20,000 | 0,000 |
| 40,000 | 34,800 | 31,000 | 24,900 | 20,700 | 16,500 | 0,000 | 0,000 | 9,407,000 | 0,000 | 16,000 | 20,000 | 20,000 |
| 40,000 | 34,500 | 29,300 | 24,600 | 19,700 | 16,400 | 0,000 | 0,000 | 9,349,000 | 0,000 | 16,000 | 20,000 | 40,000 |
| 40,000 | 34,400 | 28,000 | 25,200 | 19,300 | 16,100 | 0,000 | 0,000 | 9,330,000 | 0,000 | 16,000 | 21,000 | 0,000 |
| 40,100 | 35,200 | 29,400 | 25,600 | 19,700 | 16,100 | 0,000 | 0,000 | 9,316,000 | 1,069,000 | 16,000 | 21,000 | 20,000 |
| 40,000 | 34,800 | 30,300 | 25,200 | 20,200 | 16,500 | 0,000 | 0,000 | 9,347,000 | 0,000 | 16,000 | 21,000 | 40,000 |
| 40,000 | 34,800 | 27,300 | 25,300 | 19,300 | 16,400 | 0,000 | 0,000 | 9,381,000 | 0,000 | 16,000 | 22,000 | 0,000 |
| 40,400 | 35,300 | 27,200 | 24,900 | 18,900 | 16,000 | 0,000 | 0,000 | 9,458,000 | 1,049,000 | 16,000 | 22,000 | 20,000 |
| 40,100 | 35,200 | 27,400 | 25,300 | 18,800 | 15,600 | 0,000 | 0,000 | 9,472,000 | 0,000 | 16,000 | 22,000 | 40,000 |
| 40,000 | 34,800 | 31,000 | 24,500 | 19,600 | 15,600 | 0,000 | 0,000 | 9,508,000 | 0,000 | 16,000 | 23,000 | 0,000 |
| 40,000 | 34,400 | 27,200 | 24,900 | 18,300 | 15,300 | 0,000 | 0,000 | 9,534,000 | 0,000 | 16,000 | 23,000 | 20,000 |
| 40,400 | 35,200 | 27,200 | 25,700 | 18,300 | 15,200 | 0,000 | 0,000 | 9,449,000 | 1,053,000 | 16,000 | 23,000 | 40,000 |
| 40,000 | 34,900 | 27,900 | 25,600 | 18,500 | 15,200 | 0,000 | 0,000 | 9,466,000 | 0,000 | 17,000 | 0,000 | 0,000 |
| 40,000 | 34,800 | 28,700 | 25,000 | 18,600 | 15,200 | 0,000 | 0,000 | 9,484,000 | 0,000 | 17,000 | 0,000 | 20,000 |

Fuente: (Elaboración Autor)

La representación física de las variables medidas se muestra en la figura 49. Las mismas son muestreadas y almacenadas en la memoria del PLC en un período de 20 minutos continuamente.

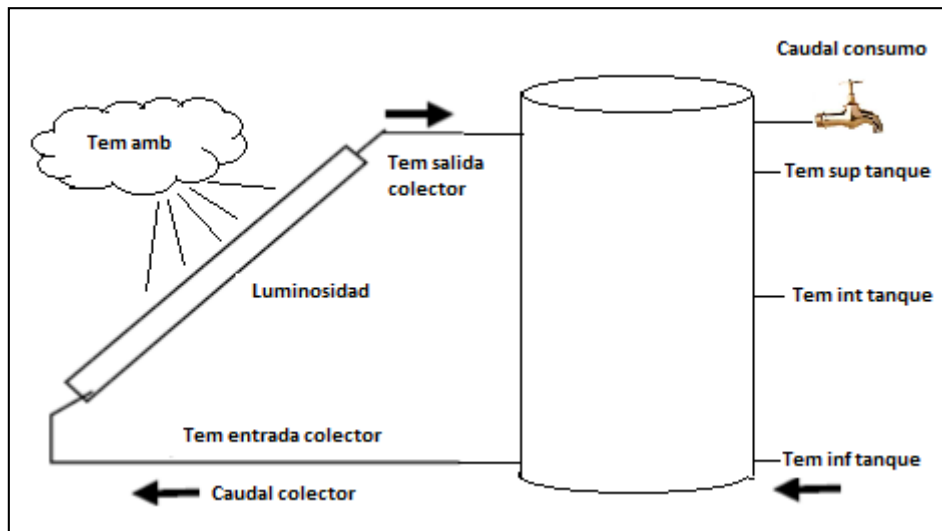


Figura 49. Variables recolectadas por el PLC

Fuente: (Elaboración Autor)

Para interpretar las variables almacenadas en la memoria del PLC una vez que éstas sean abiertas en un programa compatible con formato CSV tal como Microsoft Excel, se deberán dividir entre 1000 a fin de obtener las siguientes escalas de valores:

- Temperatura en grados Celsius.
- Caudal en litros/min.
- Luminosidad en Lux.
- Tiempo de encendido de resistencia en milisegundos.
- Día, hora y minuto en que fue almacenada la información.

Los datos deberán descargarse cada 5 días como máximo a fin de evitar desbordamientos en los registros de almacenamiento y pérdida de los mismos.

5.3 PROCEDIMIENTO DE OBTENCIÓN DE DATOS DEL CALENTADOR DE AGUA HÍBRIDO SOLAR-ELECTRICO

El procedimiento mostrado a continuación tiene como objetivo establecer los pasos a seguir para la obtención de los datos del sistema de calentamiento de agua híbrido solar y eléctrico con el fin de evaluar el desempeño del mismo.

5.3.1 CONEXIÓN DEL CABLE DE COMUNICACIÓN

Se debe conectar el cable de comunicaciones en el puerto izquierdo del PLC, tal como se observa en la figura 50. El otro extremo del cable debe ser conectado al computador.

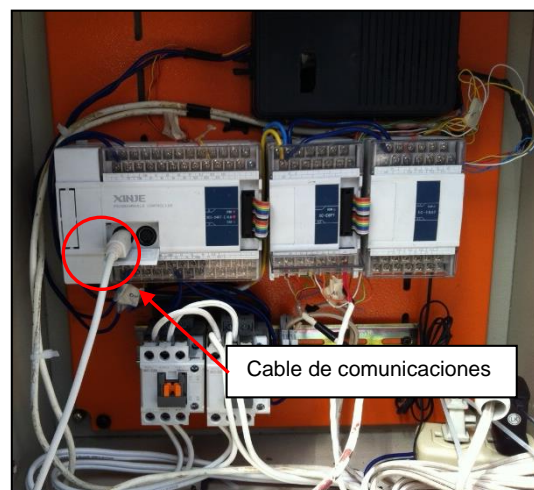


Figura 50. Conexión cable comunicaciones

Fuente: (Elaboración Autor)

5.3.2 INSTALACIÓN DE LA MÁQUINA VIRTUAL

A fin de ejecutar el programa de adquisición de datos de LabView en cualquier sistema operativo de Microsoft se debe instalar una máquina virtual en el ordenador. Para ello se debe copiar las carpetas “Maquina Virtual” y “vmware7” con todas las

subcarpetas y archivos que contienen en el disco duro del ordenador a ser usado para la descarga de datos tal como se muestra a continuación (fig 52 y 52).

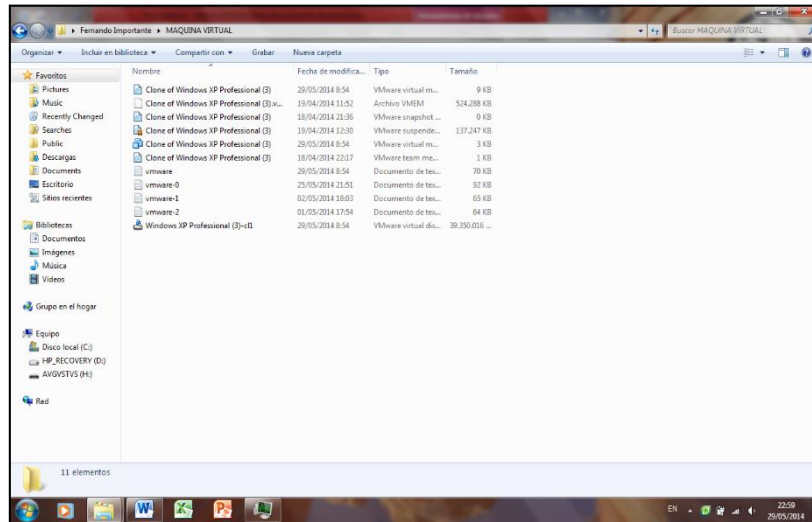


Figura 51. Contenido de la carpeta "MAQUINA VIRTUAL"

Fuente: (Elaboración Autor)

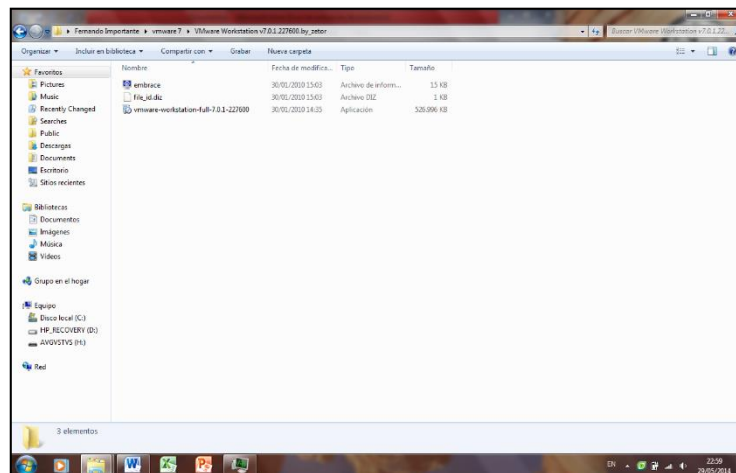


Figura 52. Contenido de la carpeta "vmware 7"

Fuente: (Elaboración Autor)

En la carpeta vmware 7\VMware Workstation v7.0.1.227600.by_zetor se debe dar click sobre el archivo ejecutable wmware-workstation-full-7.0.1-227600 e ingresar la clave: FY1EK-AEY1K-M8ECY-FPYQX-QU886 tal como se muestra en la figura 53.

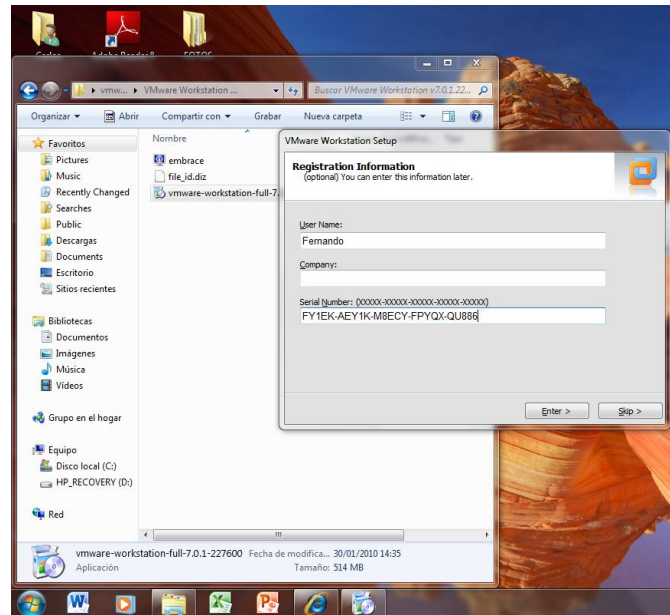


Figura 53. Archivo ejecutable *vmware*

Fuente: (Elaboración Autor)

En la siguiente ventana aparecerá un mensaje en donde se debe dar click sobre “Take Ownership” tal como se muestra en la figura 54.

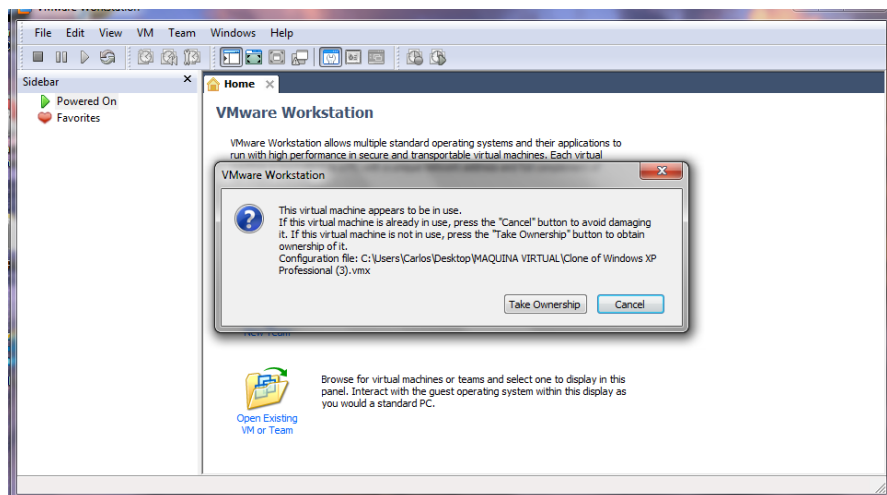


Figura 54. Mensaje de *vmware*

Fuente: (Elaboración Autor)

Aparecerá a continuación un mensaje que indica que esta máquina virtual ha sido movida o copiada. Se debe escoger la opción "I copied it" tal como se muestra en la figura 55.

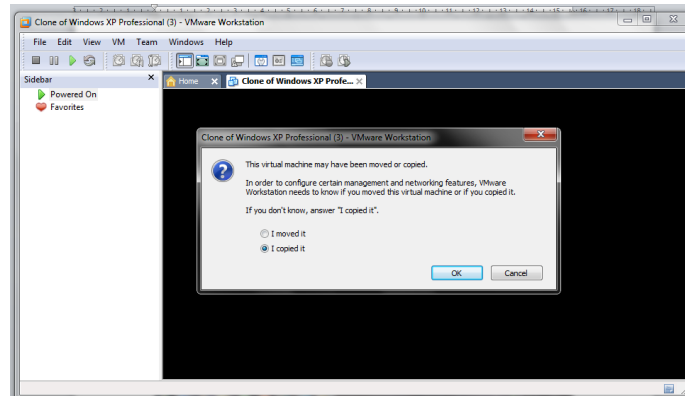


Figura 55. Instalación de la máquina virtual

Fuente: (Elaboración Autor)

En los siguientes mensajes que aparecerán en las ventanas mostradas en las figuras 56 y 57 se debe dar click en la opción "Yes" y "OK" a fin de completar el proceso de instalación de la máquina virtual.

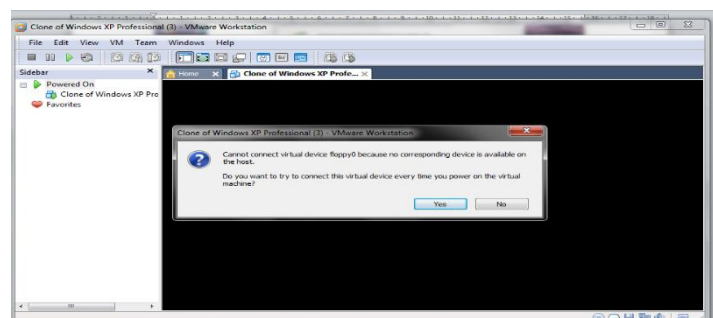


Figura 56. Mensaje de instalación "vmware"

Fuente: (Elaboración Autor)

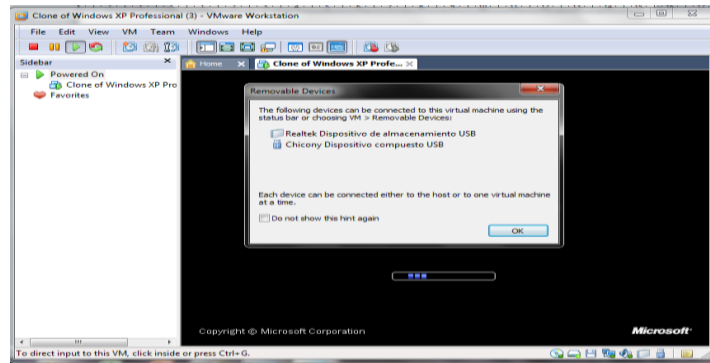


Figura 57. Mensaje de instalación "vmware"

Fuente: (Elaboración Autor)

La instalación habrá finalizado y aparecerá una ventana de inicio de la máquina virtual como la que se muestra en la figura 58.

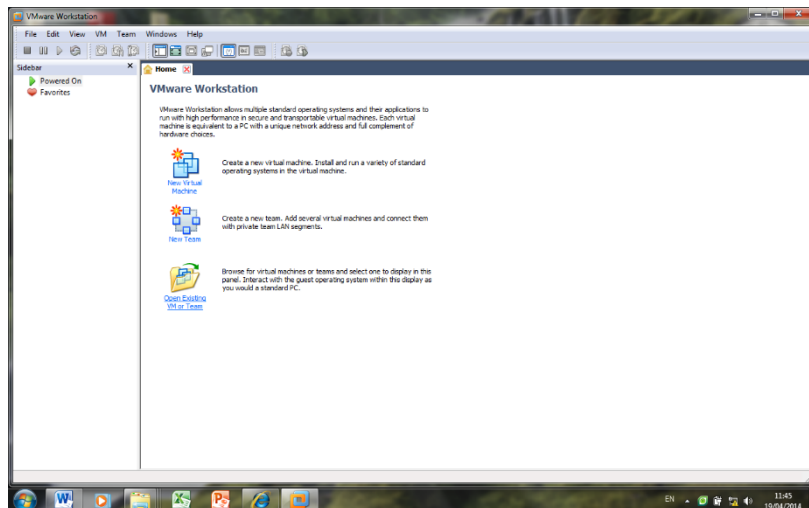


Figura 58. Ventana de inicio de la máquina virtual

Fuente: (Elaboración Autor)

La fecha en el sistema operativo de la máquina virtual deberá retrasarse hasta el 2011 a fin de que la aplicación de Labview instalada no tenga conflictos en el sistema tal como se indica en la figura 59.

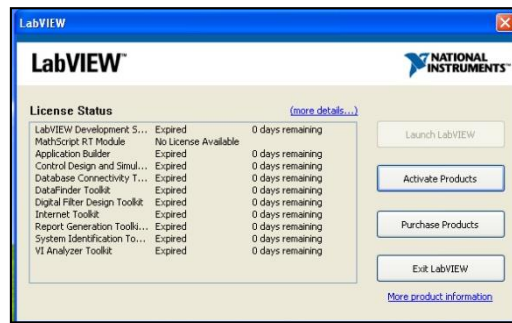


Figura 59. Conflicto de fecha de licencia de LabView

Fuente: (Elaboración Autor)

5.3.3 EJECUCIÓN DE LA MÁQUINA VIRTUAL EN EL SISTEMA

Para ejecutar la máquina virtual se deberá dar un click sobre el ícono del escritorio de acceso a la máquina virtual y seleccionar el archivo ejecutable “Clone of Windows XP Professional” tal como se muestra en la figura 60.

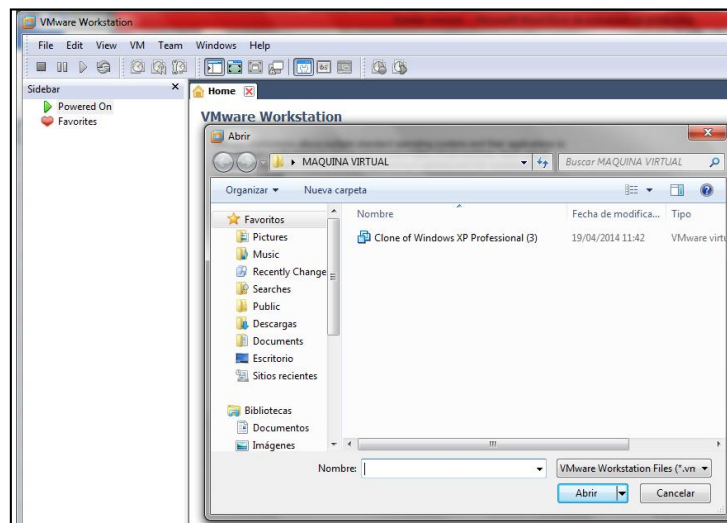


Figura 60. Archivo ejecutable de la máquina virtual

Fuente: (Elaboración Autor)

Se debe seleccionar la opción “Power on this virtual machine” a fin de iniciar la máquina virtual con el programa de LabView, tal como se muestra en la figura 19.

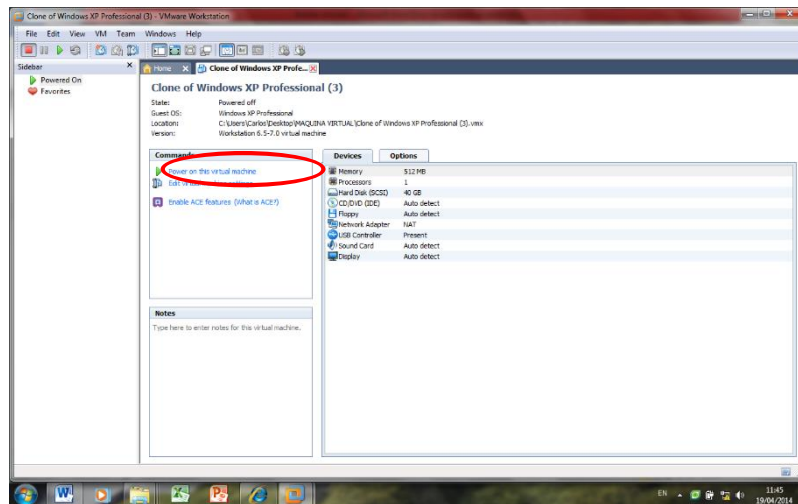


Figura 61. Inicio de la máquina virtual

Fuente: (Elaboración Autor)

5.3.4 IDENTIFICACIÓN DE PUERTO DE COMUNICACIONES EN EL SISTEMA

Una vez ejecutada la máquina virtual se debe verificar en que puerto serial de la computadora fue reconocido el PLC, para lo cual se deben seguir las siguientes instrucciones.

1. Clic en Inicio_Panel de control:

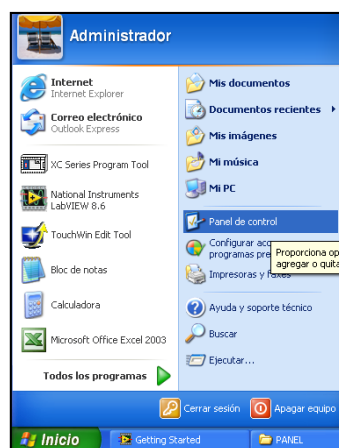


Figura 62. Inicio Windows XP

Fuente: (Elaboración Autor)

2. Clic en Sistema:

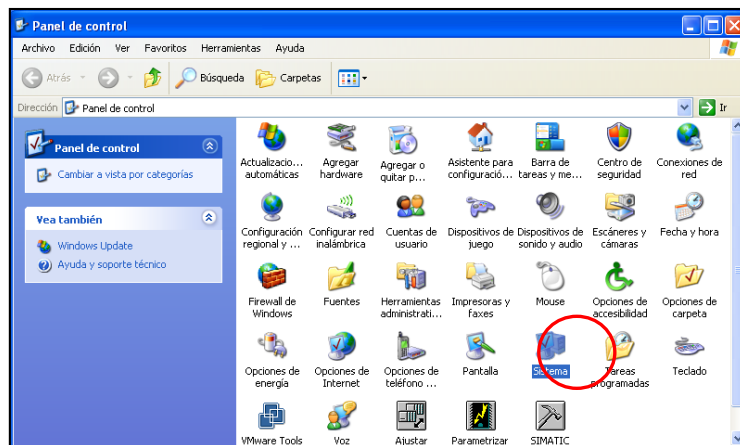


Figura 63. Panel de control Windows XP

Fuente: (Elaboración Autor)

3. Clic en Hardware:

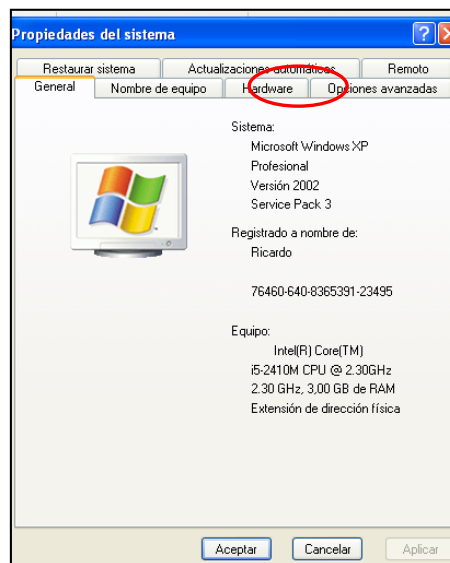


Figura 64. Propiedades del sistema

Fuente: (Elaboración Autor)

4. Clic en Administrador de dispositivos:

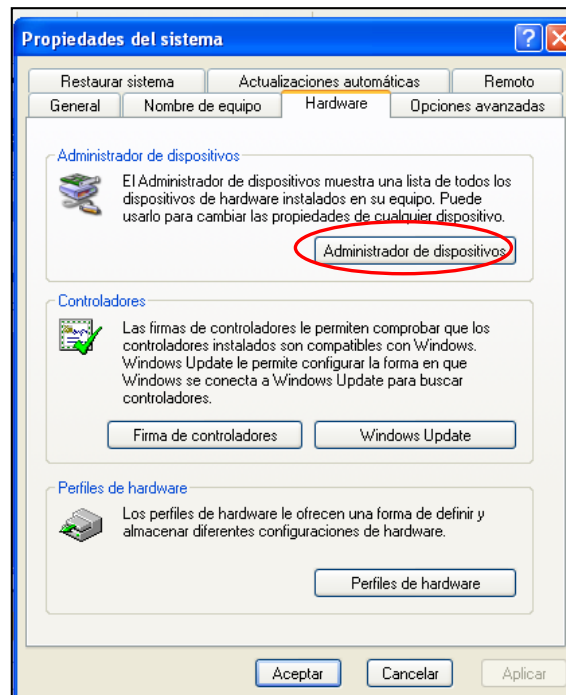


Figura 65. Propiedades del Sistema

Fuente: (Elaboración Autor)

Se despliega la ventana siguiente en Puertos COM & LPT:

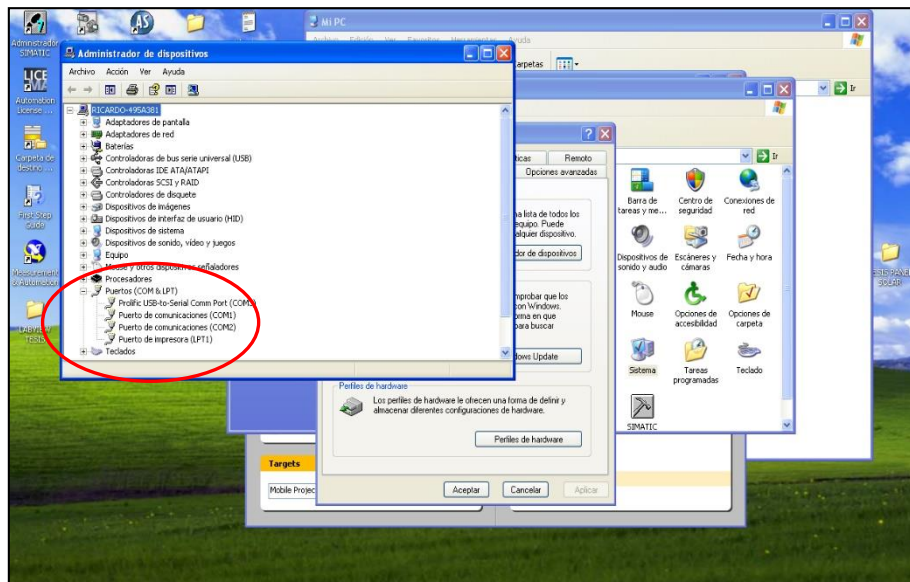


Figura 66. Ventana de puertos de comunicación

Fuente: (Elaboración Autor)

El puerto Prolific es el que fue reconocido para la comunicación con el PLC. Para este ejemplo es el puerto COM3, pero eso puede variar.

NOTA: *El puerto reconocido, en este caso el COM3, deberá ser seleccionado en la pantalla principal de Labview, tanto para visualizar los datos en tiempo real así como grabar los datos en un formato excel.*

5.3.5 INICIO DEL PROGRAMA DE TOMA DE DATOS EN TIEMPO REAL.

El programa realizado en Labview permite tomar los datos guardados por el PLC y exportarlos a un formato .csv el cual puede ser visualizado en excel, access, etc.

Para descargar la información primero se debe reestablecer el puerto de comunicaciones ejecutando el programa de lectura de datos en tiempo real, para lo cual se deben seguir los siguientes pasos:

Abrir el programa Labview. Al abrir el programa se mostrara una pantalla parecida a la siguiente:

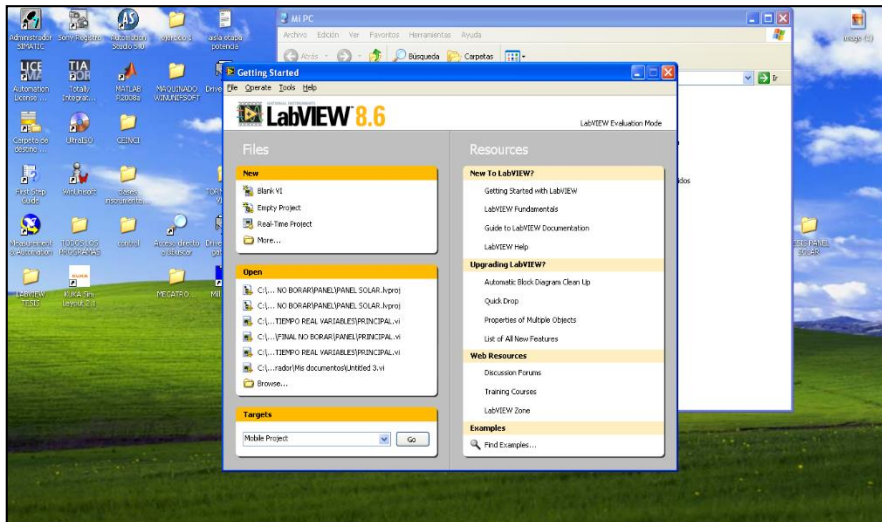


Figura 67. Ventana inicio Labveiv

Fuente: (Elaboración Autor)

NOTA. El programa de LabView fue desarrollado en la versión 8.6 por lo cual no se debería utilizar versiones menores a esta para la ejecución del programa.

Las versiones 8.10, 2009, 2010 y superiores si son compatibles.

En la ventana Open, opción Browse, buscar la carpeta DATOS COLECTOR HIBRIDO FR y abrirla.

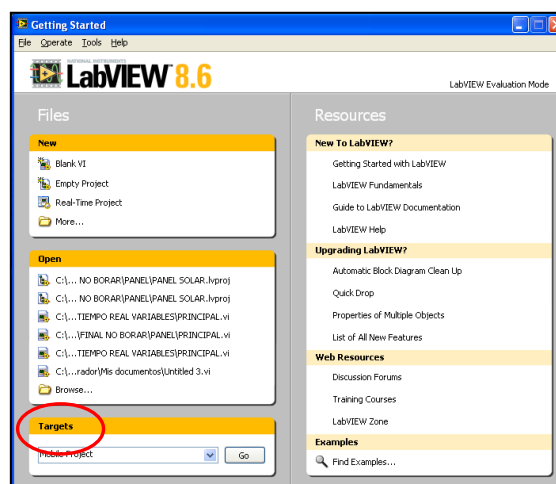


Figura 68. Buscar carpeta DATOS COLECTOR HIBRIDO FR

Fuente: (Elaboración Autor)

NOTA. La carpeta *DATOS COLECTOR HIBRIDO FR* deberá haber sido grabada previamente en la computadora usada para descargar la información.

Abrir la subcarpeta *PROGRAMAS EJECUCION*. En dicha carpeta existen dos subcarpetas. La carpeta *TIEMPO REAL VARIABLES* permite visualizar las variables del sistema en tiempo real.

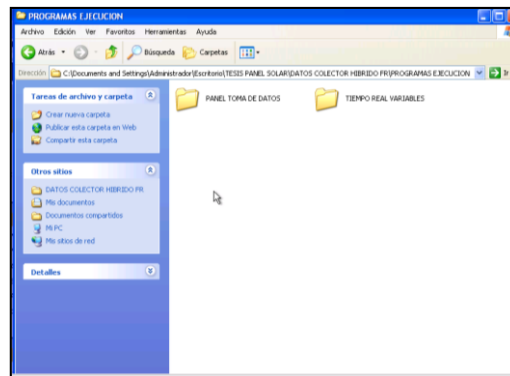


Figura 69. Carpeta *PROGRAMAS EJECUCION*

Fuente: (Elaboración Autor)

Abrir la carpeta *TIEMPO REAL VARIABLES*, en donde se observan los siguientes archivos:

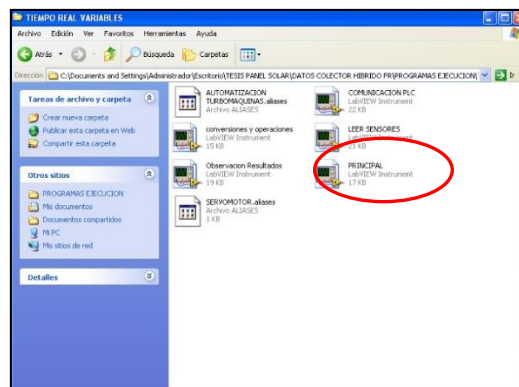


Figura 70. Archivos carpeta *PROGRAMAS EJECUCION*

Fuente: (Elaboración Autor)

NOTA: La carpeta *PROGRAMAS EJECUCION* contiene 7 archivos. No se debe alterar el contenido la carpeta.

Dar doble clic sobre el programa PRINCIPAL en donde se desplegará la ventana de ejecución del programa, tal como se muestra en la figura 71.

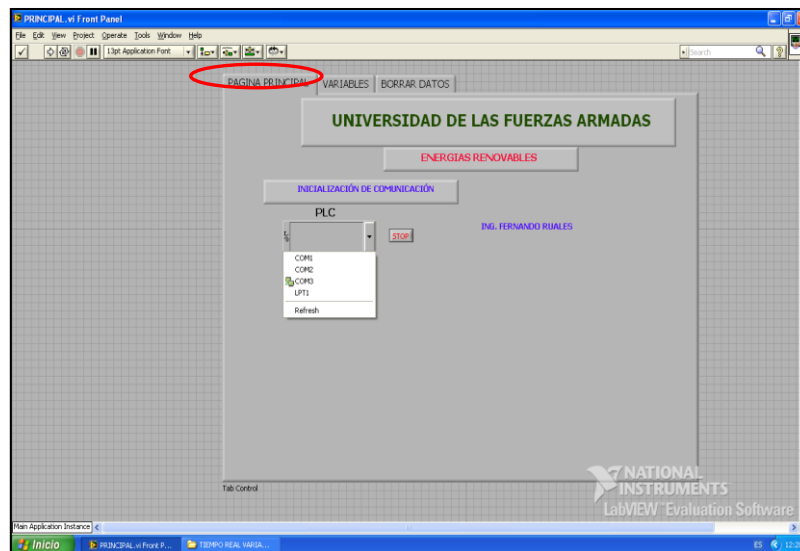


Figura 71. Programa de lectura datos tiempo real

Fuente: (Elaboración Autor)

En primera instancia se debe seleccionar el puerto al que está conectado el PLC, esta verificación se la hizo en el paso II. f). En este ejemplo el PLC fue detectado en el puerto COM3 por lo que se deberá seleccionar esta opción:

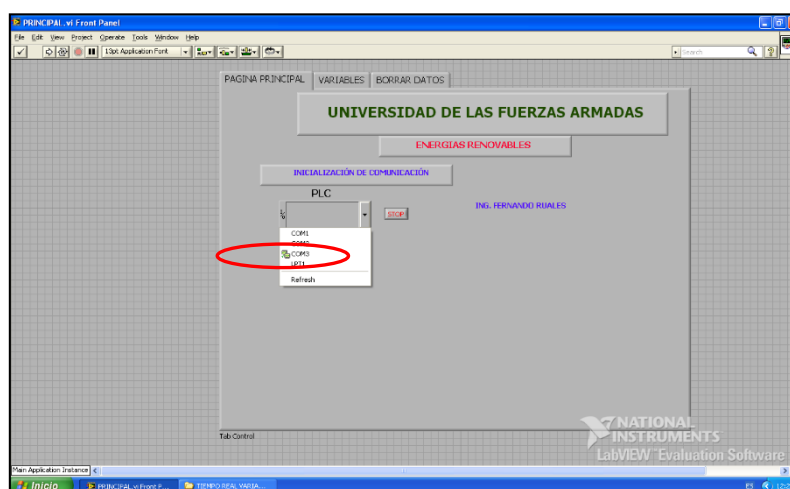


Figura 72. Selección del puerto de comunicación en Labview

Fuente: (Elaboración Autor)

Se debe verificar que a lado izquierdo del COM3 no aparezca ningún icono, con esto se garantiza la correcta inicialización del puerto.

NOTA. Si el puerto COM3 fue abierto por otro programa se visualizará un error de comunicación.

5.3.6 VISUALIZACIÓN DE VARIABLES EN TIEMPO REAL

Dar clic en el ícono de la flecha RUN, tal como se muestra en la figura 73.

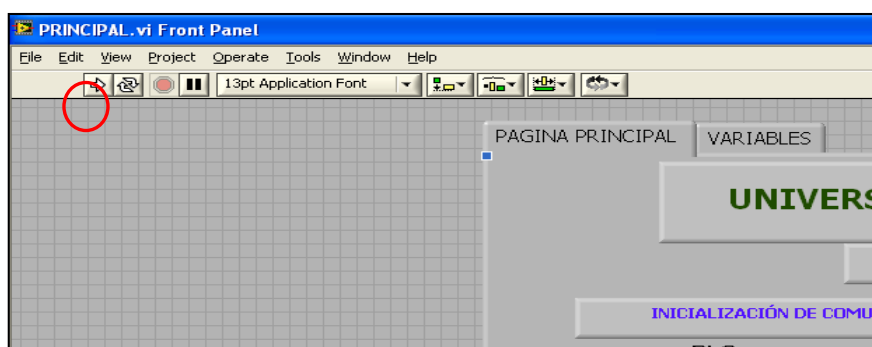


Figura 73. Icono de flecha RUN

Fuente: (Elaboración Autor)

NOTA. No correr el programa con el ícono de RUN CONTINUOUSLY ya que el puerto del PLC se estará abriendo y cerrando continuamente generando problemas de comunicación.

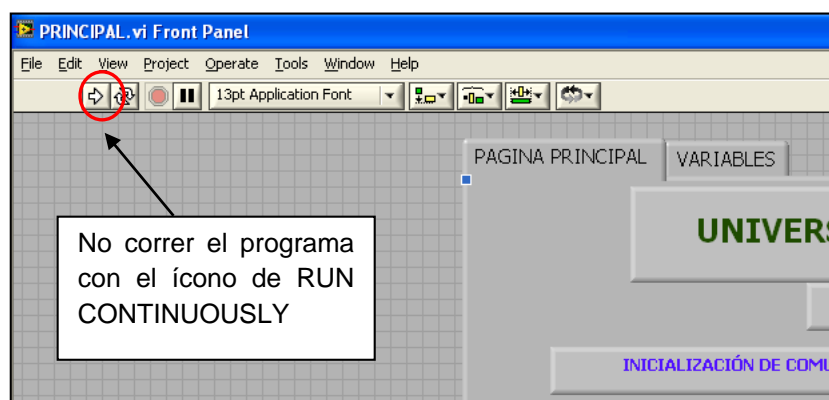


Figura 74. Icono de flecha RUN CONTINUOUSLY

Fuente: (Elaboración Autor)

Para visualizar las variables monitoreadas dar clic sobre la pestaña VARIABLES. Aparecerá una ventana como la que se muestra en la figura 36 en donde se observan las temperaturas, caudales y radiación tomados en tiempo real.

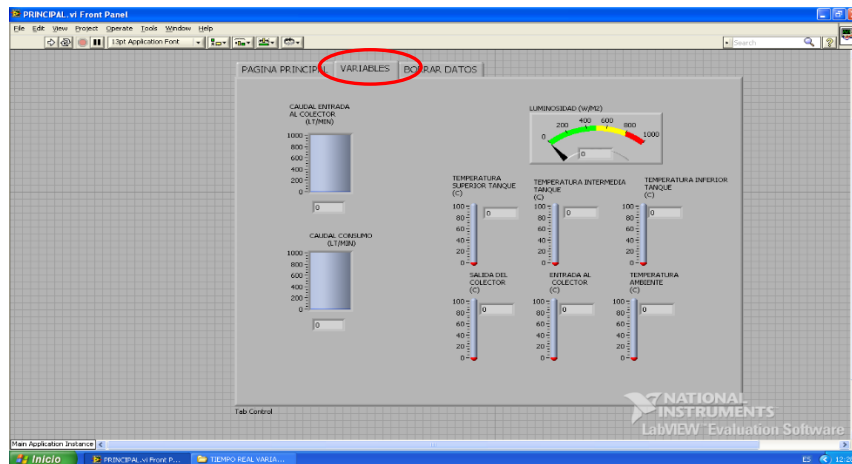


Figura 75. Variables de monitoreo

Fuente: (Elaboración Autor)

Para cerrar la visualización dar clic sobre la pestaña PAGINA PRINCIPAL y dar clic en STOP, tal como se muestra en la figura 76.



Figura 76. Parar el programa de monitoreo

Fuente: (Elaboración Autor)

Nota: No parar el programa con el STOP DE LABVIEW. Los algoritmos internos del programa de adquisición de datos podrían generar conflictos.



Figura 77. Botón de STOP de LabView no debe ser usado

Fuente: (Elaboración Autor)

5.4 LECTURA DE DATOS

Una vez ejecutados los pasos descritos en las secciones I – V se podrá iniciar con la adquisición de datos del PLC.

Abrir la carpeta DATOS COLECTOR HIBRIDO FR.

Abrir la subcarpeta PROGRAMAS EJECUCION.

En dicha carpeta se visualizan dos subcarpetas, tal como se muestra en la figura 44.

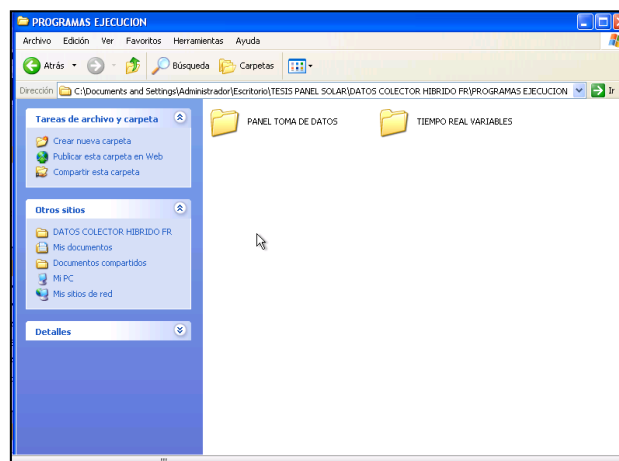


Figura 78. Carpeta PROGRAMAS EJECUCION

Fuente: (Elaboración Autor)

Abrir la carpeta PANEL TOMA DE DATOS. La carpeta PANEL TOMA DE DATOS contiene el programa que permite guardar los datos tomados por el PLC. Los datos en el PLC se podrán almacenar en un lapso de 5 días como máximo, luego de lo cual deberán ser descargados para no perderlos.

NOTA: La carpeta PANEL TOMA DE DATOS contiene 9 archivos. No se debe alterar el contenido la carpeta.

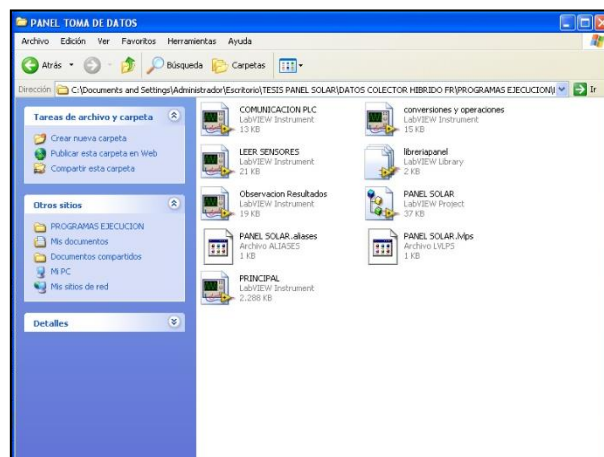


Figura 79. Contenido carpeta PANEL TOMA DATOS

Fuente: (Elaboración Autor)

Dar doble clic sobre el archivo "PANEL SOLAR", como se muestra en la figura 80

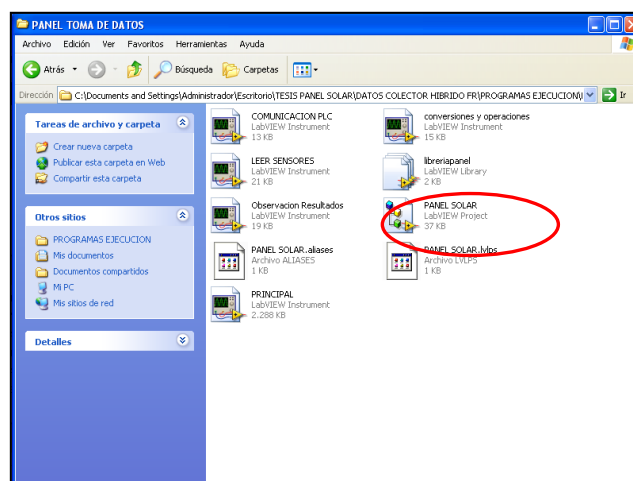


Figura 80. Archivo PANEL SOLAR

Fuente: (Elaboración Autor)

A continuación, se visualizará la ventana de proyectos que se muestra en la figura 81. Dar doble clic sobre “PRINCIPAL.vi”.

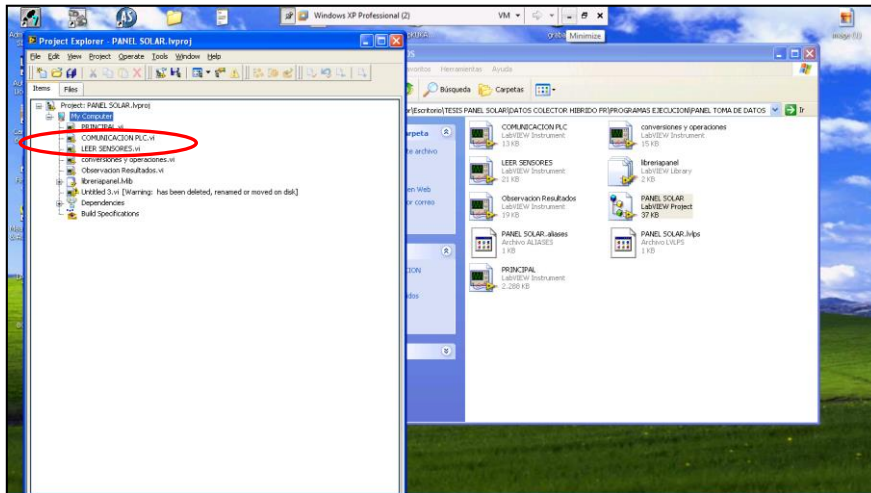


Figura 81. Ventana de proyectos de LabView

Fuente: (Elaboración Autor)

NOTA. Si se da doble clic sobre archivo, se despliegan otros subprogramas del programa principal, los cuales deben ser cerrados sin ser modificados.

Se debe seleccionar nuevamente el puerto COM3 o el que fuera asignado para el PLC, tal como se indica en la sección II de identificación del puerto en este manual. Dar click en ícono RUN de LabView tal como se muestra en la figura 82.

A continuación, se debe dar clic sobre la pestaña de PARÁMETROS según se muestra en la figura 50.

Dar clic sobre botón TOMAR DATOS, tal como se muestra en la figura 84. El botón se visualizará en verde. Dar nuevamente clic sobre el botón TOMAR DATOS. El color del botón volverá a ser gris según se muestra en la figura 84.

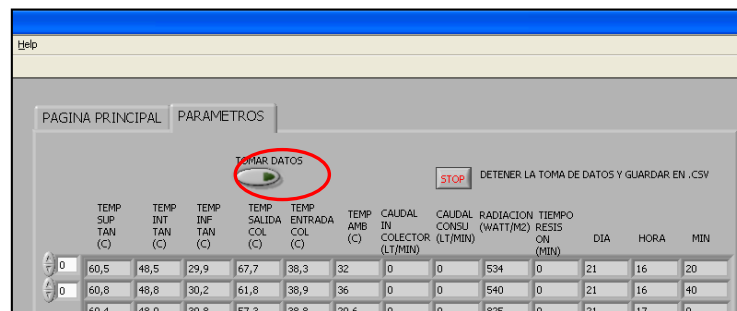


Figura 84. Botón TOMAR DATOS en verde

Fuente: (Elaboración Autor)

NOTA. Es importante dar dos veces clic sobre el botón “TOMAR DATOS”. La primera vez en la que su color cambia a verde y la segunda en la que vuelve a ser gris. Esto con el fin de asegurar que el PLC comience el envío de la información hacia la computadora.

Se debe Esperar hasta que se actualice la información descargada de la memoria del PLC con la fecha de la última descarga de datos, tal como se muestra en le figura 85. Este proceso suele tomar de 5 a 10 minutos dependiendo de la velocidad del procesador.



Figura 85. Fecha última descarga

Fuente: (Elaboración Autor)

Después de verificar la fecha se debe dar clic sobre el ícono de STOP, tal como se muestra en la figura 86.

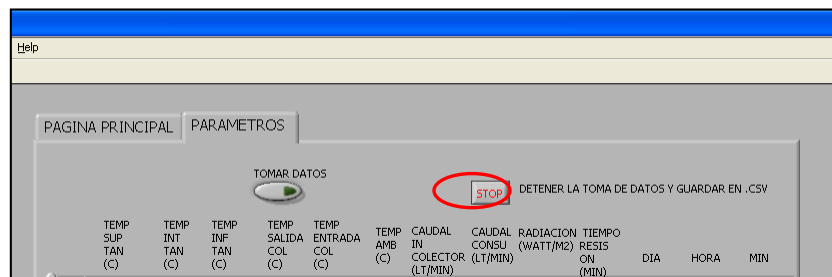


Figura 86. Botón STOP para detener la descarga de datos

Fuente: (Elaboración Autor)

Nota: No detener el programa con el botón STOP DE LABVIEW. Los algoritmos internos del programa de adquisición de datos generarán problemas.

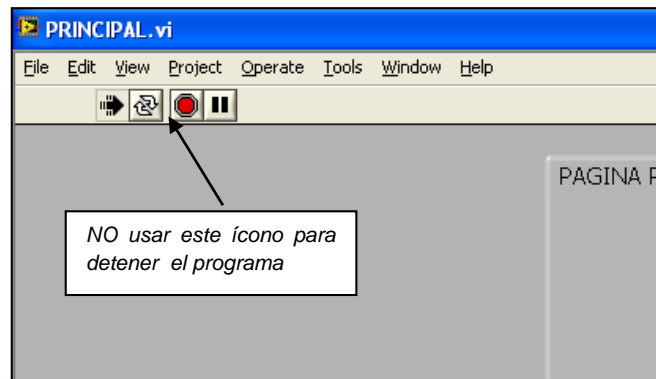


Figura 87. Botón de STOP de LabView

Fuente: (Elaboración Autor)

Guardar los datos en la carpeta de preferencia con el nombre y formato DATOS FR_MM-DD-YY. Ejemplo: DATOS FR_04-15-2014.

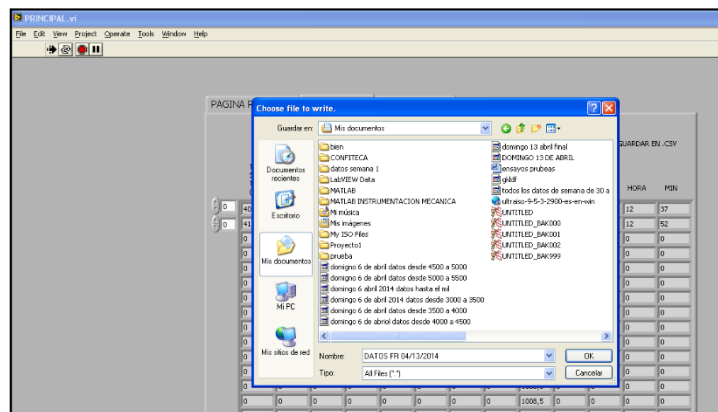


Figura 88. Almacenamiento de datos en el disco

Fuente: (Elaboración Autor)

Verificar que los datos se guardaron en la ruta adecuada. Los datos se guardan en formato csv, mismo que puede ser abierto desde Excel para su verificación.

CAPÍTULO 6

PRUEBAS DEL SISTEMA

6.1 PRUEBAS Y PUESTA EN MARCHA

Las pruebas del sistema se realizaron entre los meses de abril y agosto del 2014. Las variables de monitoreo se obtuvieron del PLC instalado en el sistema mediante el software Labview, tal como se muestra en la figura 89.

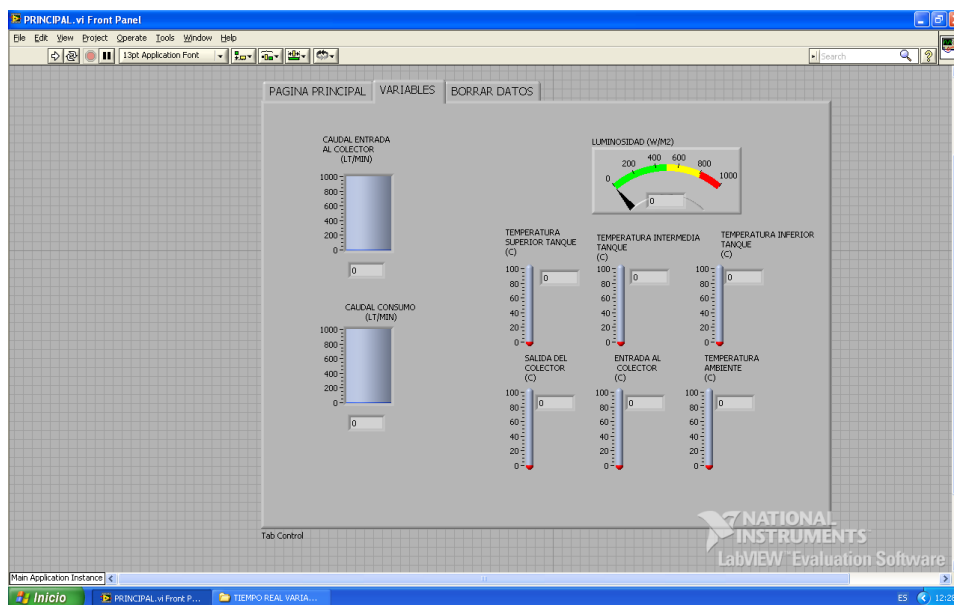


Figura 89. Variables de monitoreo del sistema

Fuente: (Elaboración Autor)

Las variables que se registran cada 20 minutos en el programa se muestran a continuación:

1. Temperatura superior del tanque de almacenamiento.
2. Temperatura intermedia del tanque de almacenamiento.
3. Temperatura inferior del tanque de almacenamiento.
4. Temperatura de entrada de agua al colector.

5. Temperatura de salida de agua del colector.
6. Temperatura ambiente.
7. Caudal de consumo.
8. Resistencia de sensor de luminosidad.
9. Tiempo de encendido de la resistencia de calentamiento.

En la tabla 10 se muestra un ejemplo de los datos obtenidos mediante el PLC de todos los sensores instalados en el sistema.

Tabla 10. Datos obtenidos mediante el PLC

| Fecha & Hora | Temp Superior Tanque | Temp Intermedia Tanque | Temp Inferior Tanque | Temp Colector Salida | Temp Colector Entrada | Temp Ambier | Caudal Consum | Caudal Colec | Resistencia (Lum) x 100 | Tiempo Resis C |
|----------------|----------------------|------------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|-------------|---------------|--------------|-------------------------|----------------|
| 6/13/2014 0:10 | 49,200 | 41,600 | 32,800 | 30,100 | 18,800 | 15,700 | 0,000 | 0,000 | 9,537,000 | 0,000 |
| 6/13/2014 0:30 | 49,200 | 41,200 | 32,800 | 29,600 | 18,800 | 15,600 | 0,000 | 0,000 | 9,532,000 | 0,000 |
| 6/13/2014 0:50 | 48,800 | 41,200 | 32,500 | 29,700 | 18,500 | 15,600 | 0,000 | 0,000 | 9,577,000 | 0,000 |
| 6/13/2014 1:10 | 48,500 | 40,800 | 32,500 | 29,600 | 18,100 | 14,800 | 0,000 | 0,000 | 9,541,000 | 0,000 |
| 6/13/2014 1:30 | 48,100 | 40,700 | 32,400 | 29,300 | 17,700 | 14,400 | 0,000 | 0,000 | 9,601,000 | 0,000 |
| 6/13/2014 1:50 | 48,000 | 40,400 | 32,400 | 29,200 | 17,200 | 14,000 | 0,000 | 0,000 | 9,538,000 | 0,000 |
| 6/13/2014 2:10 | 47,600 | 40,400 | 32,400 | 28,800 | 17,300 | 14,000 | 0,000 | 0,000 | 9,551,000 | 0,000 |
| 6/13/2014 2:30 | 47,300 | 40,000 | 32,100 | 28,500 | 17,300 | 14,100 | 0,000 | 0,000 | 9,581,000 | 0,000 |
| 6/13/2014 2:50 | 47,200 | 39,700 | 32,000 | 28,000 | 16,800 | 14,000 | 0,000 | 0,000 | 9,566,000 | 0,000 |
| 6/13/2014 3:10 | 46,800 | 39,600 | 32,000 | 27,700 | 16,800 | 13,600 | 0,000 | 0,000 | 9,572,000 | 0,000 |
| 6/13/2014 3:30 | 46,400 | 39,200 | 32,000 | 27,200 | 16,100 | 13,200 | 0,000 | 0,000 | 9,610,000 | 0,000 |
| 6/13/2014 3:50 | 46,400 | 39,200 | 31,700 | 27,300 | 16,000 | 12,500 | 0,000 | 0,000 | 9,572,000 | 0,000 |
| 6/13/2014 4:10 | 46,000 | 38,900 | 31,700 | 26,400 | 15,900 | 12,900 | 0,000 | 0,000 | 9,578,000 | 0,000 |
| 6/13/2014 4:30 | 45,600 | 38,800 | 31,600 | 26,500 | 16,100 | 12,900 | 0,000 | 0,000 | 9,613,000 | 0,000 |
| 6/13/2014 4:50 | 45,200 | 38,400 | 31,400 | 26,800 | 16,400 | 13,100 | 0,000 | 0,000 | 9,570,000 | 0,000 |
| 6/13/2014 5:10 | 45,200 | 38,400 | 31,300 | 26,800 | 16,100 | 12,800 | 0,000 | 0,000 | 9,579,000 | 0,000 |
| 6/13/2014 5:30 | 44,800 | 38,100 | 31,300 | 26,500 | 16,500 | 12,900 | 0,000 | 0,000 | 9,597,000 | 0,000 |

Fuente: (Elaboración Autor)

Mediante estos datos se o las curvas que relacionan temperaturas de entrada de agua y de almacenamiento en el colector usados para el cálculo del rendimiento del sistema.

En la figura 90 se presenta la relación entre temperatura ambiente y temperatura de almacenamiento del tanque en donde se puede observar los intervalos de tiempo en que la resistencia de calentamiento estuvo activada.

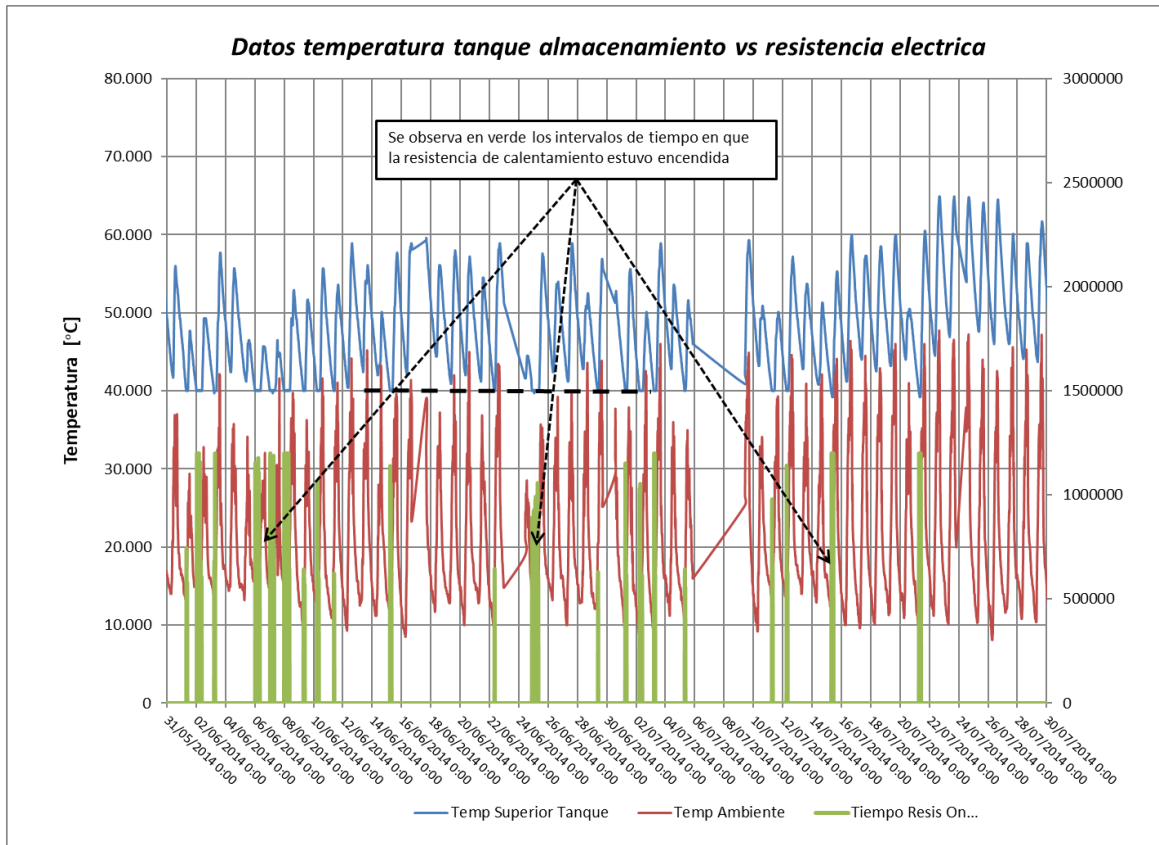


Figura 90. Temperatura ambiente vs tanque almacenamiento

Fuente: (Elaboración Autor)

Adicional a la información obtenida mediante el PLC también se obtuvieron datos de la estación de medición de radiación solar instalados en el laboratorio de energías renovables de la ESPE.

En la figura 91 se muestra la relación entre las temperaturas de agua de entrada y salida del colector solar. Se aprecia que en días con bastante radiación solar la temperatura de salida del colector puede alcanzar valores superiores a los 80 grados centígrados.

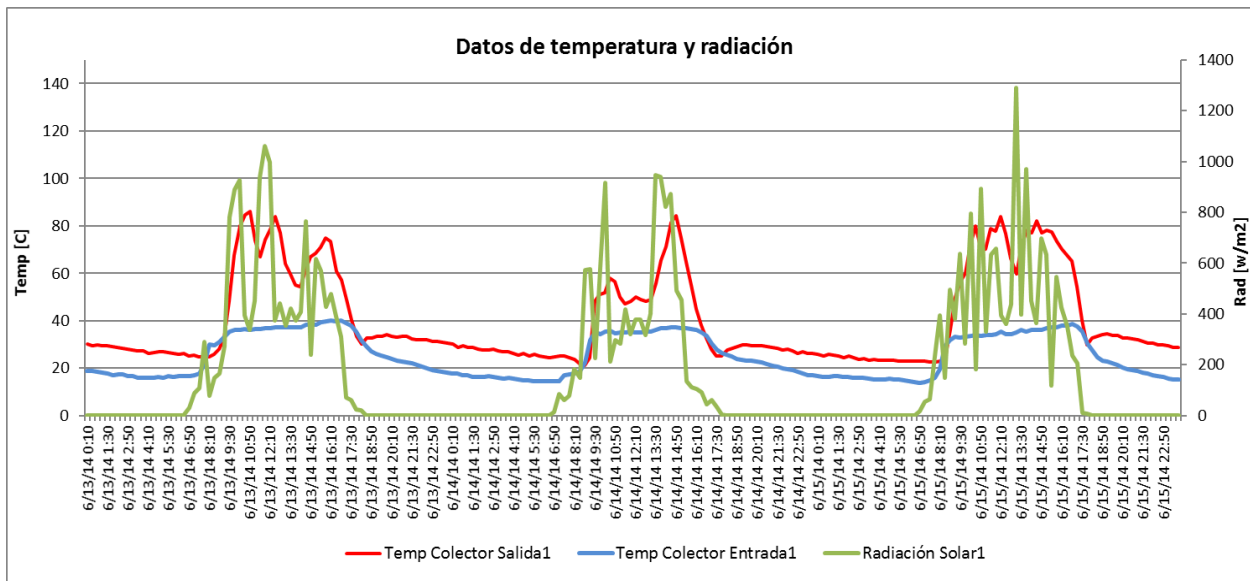


Figura 91. Temperatura de entrada y salida colector

Fuente: (Elaboración Autor)

6.2 RESULTADOS Y VALIDACIÓN DEL SISTEMA

Con estos datos obtenidos en las mediciones se puede cuantificar la eficiencia del colector solar híbrido.

6.2.1 EFICIENCIA MODELOS DE COMPORTAMIENTO

Esta eficiencia es teórica y se la obtiene determinando la absorción de calor por radiación menos las pérdidas térmicas mediante la ecuación 31, mostrada a continuación:

$$\eta = \frac{Q_u}{A_c G} = \frac{\dot{m} C_p (T_o - T_i)}{A_c G}$$

Ecuación 31. Eficiencia experimental

6.2.1.1 Eficiencia experimental

Esta eficiencia se la obtiene mediante ensayos experimentales exponiendo al colector a la radiación solar a fin de medir las temperaturas de entrada, salida del colector y la variación de temperatura en el tanque de almacenamiento.

La eficiencia se la calcula mediante la ecuación 31 descrita anteriormente.

$$\eta = \frac{Q_u}{A_c G} = \frac{\dot{m} C_p (T_o - T_i)}{A_c G}$$

En donde:

Q_u = Calor útil del colector [kJ]

A_c = Area útil (efectiva) del colector = 1.44 [m²]

G = Irradiancia o radiación solar [w/m²]

\dot{m} = flujo másico [g/s]

m = masa de agua del tanque de almacenamiento = 120 [kg]

C_p = calor específico del agua = 4.1813[J/g*°C]

T_o = temperatura de salida del agua en el colector

T_i = temperatura de entrada de agua en el colector

T_{mi} = temperatura media inicial del tanque de almacenamiento

T_{mf} = temperatura media final del tanque de almacenamiento

Para calcular la eficiencia del colector se debe primero determinar el flujo másico del agua dentro del sistema tanque-colector mediante los datos experimentales.

Para ello primero se va a calcular la cantidad de energía o calor usada para calentar el volumen de tanque de almacenamiento de 120lt en un día típico de exposición a la radiación del colector mediante la ecuación 32.

$$E = m C_p (T_o - T_i)$$

Ecuación 32. Energía necesaria para calentamiento de agua

Se debe tener en cuenta que en este caso m representa a la masa de agua contenida en el tanque de almacenamiento y no al flujo másico.

Tabla 11. Datos experimentales de temperaturas

| Fecha & Hora | Temp Superior Tanque | Temp Media Tanque | Temp Inferior Tanque | Temp Colector Salida | Temp Colector Entrada |
|------------------|----------------------|-------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|
| 15/04/2014 6:10 | 41.200 | 34.800 | 28.400 | 24.700 | 14.500 |
| 15/04/2014 7:10 | 40.400 | 32.850 | 25.300 | 24.700 | 15.600 |
| 15/04/2014 8:10 | 40.000 | 34.200 | 28.400 | 24.200 | 27.300 |
| 15/04/2014 9:10 | 40.100 | 33.750 | 27.400 | 58.400 | 31.300 |
| 15/04/2014 10:10 | 43.700 | 35.950 | 28.200 | 79.600 | 32.100 |
| 15/04/2014 11:10 | 48.800 | 37.900 | 27.000 | 89.400 | 32.400 |

Fuente: (Elaboración Autor)

Reemplazando datos experimentales mostrados en la tabla 11 obtenidos durante el periodo de estudio se tiene:

$$E = 120 [kg] * 4.1813 \left[\frac{J}{g^{\circ}C} \right] (T_{mf} - T_{mi})$$

$$E = 120 [kg] * 4.1813 \left[\frac{J}{g^{\circ}C} \right] (37.9 - 34.8)^{\circ}C$$

$$E = 120 [kg] * 4.1813 \left[\frac{J}{g^{\circ}C} \right] (3.1)^{\circ}C$$

$$E = 1552.46 [kJ]$$

Dividiendo los dos términos de la ecuación 32 para el tiempo transcurrido en elevar la temperatura media de los 120 kg de agua del tanque de almacenamiento se tiene:

$$\frac{E}{t} = \frac{m C_p (T_{mf} - T_{mi})}{t}$$

$$\frac{E}{t} = \dot{m} C_p \Delta T$$

$$\dot{m} = \frac{E}{t C_p \Delta T}$$

Para este caso se toma el intervalo en el que la temperatura media del tanque de almacenamiento incrementó su temperatura en 3.1 °C.

Dicho intervalo equivale a 18,000 segundos que es el tiempo transcurrido entre las 06h10 y las 11h10 según se muestra en la tabla 11.

$$\dot{m} = \frac{1'552,460 [J]}{18,000 [s] 4.1813 \left[\frac{J}{g^{\circ}C} \right] (3.1)^{\circ}C}$$

Con estos valores se obtiene el valor de flujo másico mostrado a continuación:

$$\dot{m} = 6.65 \frac{g}{s}$$

En la sección 4.2 se obtuvo un valor teórico de flujo másico equivalente a 5.48 g/s que es muy cercano al valor experimental de 6.65 g/s obtenido en las mediciones. Esto nos permite validar el modelo teórico mediante los ensayos prácticos realizados con el colector.

Para los cálculos siguientes de potencia y eficiencia se va a tomar un valor medio entre el valor teórico y el experimental, es decir se considerará un valor de 6.065 g/s.

La ecuación 33 relaciona la potencia útil obtenida del colector solar sobre la potencia o irradiancia disponible.

$$\eta = \frac{\text{Potencia util}}{\text{Potencia disponible}} = \frac{Q_u}{A_c G}$$

Ecuación 33. Eficiencia experimental del colector

Los datos mostrados en la tabla 12 tabulan la potencia útil del colector durante intervalos de tiempo en horas de sol pico (HSP), es decir, no consideran datos durante la ausencia de radiación solar

Tabla 12. Cálculos de potencia y eficiencia experimentales

| Fecha | Temp Colector Salida | Temp Colector Entrada | Radiación Solar [W/m ²] | Potencia útil W [J/s] | Potencia Disponible [W] | Eficiencia |
|--------------|----------------------|-----------------------|-------------------------------------|-----------------------|-------------------------|------------|
| 6/9/14 14:10 | 61,3 | 34,5 | 764,0 | 679,64 | 1.100,16 | 61,8% |
| 6/9/14 14:30 | 57,2 | 34,4 | 764,0 | 578,20 | 1.100,16 | 52,6% |
| 6/9/14 14:50 | 54,5 | 34,9 | 753,0 | 497,05 | 1.084,32 | 45,8% |
| 6/9/14 15:10 | 55,7 | 34,5 | 192,0 | 537,62 | 568,68 | 94,5% |
| 6/9/14 15:30 | 63,2 | 34,5 | 198,0 | 727,82 | 764,56 | 95,2% |

| | | | | | | |
|---------------|------|------|--------|----------|----------|-------|
| 6/9/14 15:50 | 53,2 | 34,9 | 709,0 | 464,08 | 1.020,96 | 45,5% |
| 6/9/14 16:10 | 48,5 | 36,0 | 209,0 | 316,99 | 341,46 | 92,8% |
| 6/9/14 16:30 | 46,4 | 34,8 | 165,0 | 294,17 | 317,96 | 92,5% |
| 6/9/14 16:50 | 41,6 | 34,5 | 275,0 | 180,05 | 396,00 | 45,5% |
| 6/9/14 17:10 | 36,8 | 34,0 | 99,0 | 71,01 | 142,56 | 49,8% |
| 6/10/14 10:50 | 51,6 | 31,9 | 613,0 | 499,58 | 882,72 | 56,6% |
| 6/10/14 11:10 | 68,1 | 33,0 | 192,0 | 890,12 | 931,71 | 95,5% |
| 6/10/14 11:30 | 69,6 | 32,7 | 198,0 | 935,77 | 978,72 | 95,6% |
| 6/10/14 11:50 | 73,7 | 34,1 | 709,0 | 1.004,24 | 1.020,96 | 98,4% |
| 6/10/14 12:10 | 86,9 | 34,3 | 1160,0 | 1.333,91 | 1.670,40 | 79,9% |
| 6/10/14 12:30 | 89,6 | 34,4 | 731,0 | 1.399,85 | 1.456,66 | 96,1% |
| 6/10/14 12:50 | 96,5 | 34,8 | 530,0 | 1.564,69 | 1.626,42 | 96,2% |
| 6/10/14 13:10 | 78,4 | 33,7 | 712,0 | 1.133,57 | 1.182,43 | 95,9% |
| 6/10/14 13:30 | 77,7 | 34,5 | 327,0 | 1.095,53 | 1.143,25 | 95,8% |
| 6/10/14 13:50 | 74,8 | 34,2 | 913,0 | 1.029,60 | 1.314,72 | 78,3% |
| 6/10/14 14:10 | 74,5 | 35,1 | 665,0 | 999,17 | 1.044,01 | 95,7% |
| 6/10/14 14:30 | 82,5 | 35,5 | 880,0 | 1.191,90 | 1.267,20 | 94,1% |
| 6/10/14 14:50 | 76,1 | 35,6 | 203,0 | 1.027,06 | 1.072,74 | 95,7% |
| 6/10/14 15:10 | 70,8 | 35,5 | 178,0 | 895,19 | 936,93 | 95,5% |
| 6/10/14 15:30 | 58,0 | 35,4 | 684,0 | 573,13 | 984,96 | 58,2% |
| 6/10/14 15:50 | 62,9 | 36,2 | 200,0 | 677,10 | 712,32 | 95,1% |
| 6/10/14 16:10 | 62,6 | 36,0 | 220,0 | 674,56 | 709,71 | 95,0% |
| 6/10/14 16:30 | 55,6 | 36,2 | 220,0 | 491,98 | 521,67 | 94,3% |
| 6/10/14 17:10 | 38,0 | 34,9 | 100,0 | 78,61 | 144,00 | 54,6% |

Fuente: (Elaboración Autor)

Ejemplo de cálculos con los valores de temperaturas de colector obtenidos durante el 9 de junio a las 14h10:

$$\eta = \frac{Q_u}{A_c G} = \frac{\dot{m} C_p (T_o - T_i)}{A_c G}$$

$$\eta = \frac{6.065 \frac{g}{s} * 4.1813 \left[\frac{J}{g^{\circ}C} \right] * (61.3 - 34.5)^{\circ}C}{1.44 m^2 * 764 \frac{W}{m^2}}$$

$$\eta = 61.8\%$$

El promedio de eficiencia experimental del colector solar durante el periodo de estudio mostrado en la tabla 12 es de 80.8%.

Este valor de eficiencia concuerda con los datos teóricos expuestos en la sección 4.2.1.4 lo que valida nuevamente el modelo del colector solar planteado.

6.3 COMPARACIÓN DE UN SISTEMA HÍBRIDO VS UN SISTEMA CONVENCIONAL ELÉCTRICO

Para realizar el cálculo comparativo entre el sistema híbrido (solar + eléctrico) y un sistema eléctrico convencional se compara la cantidad de energía generada mediante el calentador solar versus la proveniente de las dos resistencias eléctricas de 1500 watts instaladas como sistema de respaldo.

Un ejemplo del valor de la energía generada mediante los dos sistemas se muestra en la tabla 13.

Tabla 13. Cálculos de energía térmica solar vs energía eléctrica

| Fecha & Hora | Temp Colector Salida | Temp Colector Entrada | Tiempo Res On [min] | Potencia W [J/s] | Energía sistema [kJ] | Resistencia Eléctrica |
|-----------------|----------------------|-----------------------|---------------------|------------------|----------------------|-----------------------|
| 11/05/2014 5:10 | 23.600 | 16.100 | 16,0667 | 190,20 | 2892,00 | ON |
| 11/05/2014 5:50 | 23.600 | 16.000 | 15,1833 | 192,73 | 2733,00 | ON |
| 11/05/2014 6:10 | 23.500 | 15.700 | 0,0000 | 197,80 | 237,37 | OFF |
| 11/05/2014 6:30 | 23.200 | 16.100 | 16,1167 | 180,05 | 2901,00 | ON |
| 11/05/2014 6:50 | 23.400 | 15.800 | 0,0000 | 192,73 | 231,28 | OFF |

| | | | | | | |
|------------------|--------|--------|--------|---------|---------|-----|
| 11/05/2014 7:10 | 22.000 | 16.500 | 4,5000 | 139,48 | 810,00 | ON |
| 11/05/2014 7:30 | 20.600 | 17.000 | 5,6500 | 91,29 | 1017,00 | ON |
| 11/05/2014 7:50 | 19.400 | 16.900 | 0,0000 | 63,40 | 76,08 | OFF |
| 11/05/2014 8:10 | 16.900 | 17.300 | 9,8667 | 0,00 | 1776,00 | ON |
| 11/05/2014 8:50 | 30.500 | 29.600 | 0,0000 | 22,82 | 27,39 | OFF |
| 11/05/2014 9:10 | 37.900 | 30.300 | 0,0000 | 192,73 | 231,28 | OFF |
| 11/05/2014 9:30 | 42.800 | 30.200 | 0,0000 | 319,53 | 383,44 | OFF |
| 11/05/2014 9:50 | 43.600 | 31.300 | 0,0000 | 311,92 | 374,31 | OFF |
| 11/05/2014 10:10 | 65.200 | 31.800 | 0,0000 | 847,01 | 1016,41 | OFF |
| 11/05/2014 10:30 | 80.000 | 32.200 | 0,0000 | 1212,19 | 1454,63 | OFF |
| 11/05/2014 10:50 | 82.800 | 32.400 | 0,0000 | 1278,12 | 1533,75 | OFF |
| 11/05/2014 11:10 | 87.500 | 32.900 | 0,0000 | 1384,63 | 1661,56 | OFF |
| 11/05/2014 11:30 | 80.700 | 32.800 | 0,0000 | 1214,72 | 1457,67 | OFF |
| 11/05/2014 11:50 | 82.600 | 32.900 | 0,0000 | 1260,37 | 1512,45 | OFF |
| 11/05/2014 12:10 | 87.900 | 33.200 | 0,0000 | 1387,17 | 1664,60 | OFF |
| 11/05/2014 12:30 | 89.000 | 33.200 | 0,0000 | 1415,06 | 1698,08 | OFF |
| 11/05/2014 12:50 | 84.600 | 33.700 | 0,0000 | 1290,80 | 1548,96 | OFF |
| 11/05/2014 13:10 | 83.200 | 34.500 | 0,0000 | 1235,01 | 1482,01 | OFF |

Fuente: (Elaboración Autor)

6.3.1 CÁLCULO DE ENERGÍA GENERADA POR EL COLECTOR

Mediante la ecuación 34 de potencia mostrada a continuación se calcula el valor de energía para un intervalo de tiempo de 20 minutos que es el tiempo de muestreo del PLC para cada dato de la tabla 13.

$$P = \dot{m} C_p (T_o - T_i)$$

Ecuación 34. Potencia calentamiento de agua

En el ejemplo de cálculo mostrado a continuación se toman los valores de temperatura de entrada y salida del colector del 11 de mayo del 2014 a las 06h10.

$$P = 6.065 \frac{g}{s} * 4.1813 \left[\frac{J}{g^{\circ}C} \right] * (23.5 - 15.7)^{\circ}C$$

$$P = 197.8 W$$

$$E = P * t$$

$$E = \frac{197.8W * 20min * 60seg}{1000} [kJ]$$

El consumo de energía en un lapso de 20 minutos fue de:

$$E = 237.37[kJ]$$

6.3.2 CÁLCULO DE ENERGÍA GENERADA POR LAS RESISTENCIAS ELÉCTRICAS

En caso de poca o nula radiación solar y a fin de mantener la temperatura del tanque de almacenamiento de agua sobre los 40°C se programó el sistema mediante el PLC para que entren en funcionamiento las dos resistencias de 1500 watts.

El cálculo de la energía generada por las resistencias se lo realiza en un intervalo de 20 minutos, que es el tiempo de muestreo del PLC tal como se muestra a continuación.

Se muestra a continuación un ejemplo de cálculo para el 11 de mayo del 2014 a las 06h30 en donde se verifica en la tabla 13 que la resistencia estuvo encendida.

$$E = P * t$$

$$E = 2 * 1500 [w] * 16.1167min/60min$$

$$E = 0.80333 [kwh] = 2892 [kJ]$$

6.3.3 COMPARACIÓN TOTAL DE ENERGÍA GENERADA POR DEL COLECTOR VS ENERGÍA ELÉCTRICA

Las tablas 14 y 15 muestran los valores de energía generada por el colector solar y por las resistencias eléctricas durante el periodo total de almacenamiento de datos equivalente aproximadamente a 2515 horas.

Tabla 14. Comparación energía colector vs energía eléctrica

| Meses | Energía colector solar [kJ] | Energía eléctrica [kJ] | Total Energia Sistema [kJ] |
|--------------|-----------------------------|------------------------|----------------------------|
| Abril 2014 | 99.505,74 | 16.311,00 | 115.816,74 |
| Mayo 2014 | 586.001,08 | 497.481,00 | 1.083.482,08 |
| Jun 2014 | 651.356,56 | 172.566,00 | 823.922,56 |
| Julio 2014 | 824.563,73 | 110.601,00 | 935.164,73 |
| Agosto 2014 | 369.104,01 | 387,00 | 369.491,01 |
| Total | 2.530.531,12 | 797.346,00 | 3.327.877,12 |

Fuente: (Elaboración Autor)

Tabla 15. Energía total del colector vs eléctrica

| Tipo de Sistema | Energía total sistema [kJ] | Porcentaje Energía sistema |
|------------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Colector solar | 2.530.531,12 | 76,04% |
| Resistencia eléctrica | 797.346,00 | 23,96% |
| Total general | 3.327.877,12 | 100,00% |

Fuente: (Elaboración Autor)

Se puede observar que el colector solar generó cerca del 76% de toda la energía consumida por el sistema para mantener el agua caliente sobre los 40 °C.

CAPÍTULO 7

EVALUACIÓN ECONÓMICA Y FINANCIERA

7.1 AHORRO ENERGÉTICO DEL SISTEMA HÍBRIDO

Se muestra a continuación, en la tabla 16 una comparación de la energía total usada durante el periodo de estudio del sistema y las fuentes de suministro de la misma.

Tabla 16. Fuentes de energía usadas para el calentamiento de agua

| FUENTE | ENERGÍA [kJ] | ENERGÍA [kWH] | ENERGÍA [%] |
|--|---------------------|---------------|-------------|
| ENERGÍA PROVISTA POR EL CALENTADOR SOLAR | 2,530,531.12 | 702.93 | 76% |
| ENERGÍA PROVISTA POR EL SISTEMA RESPALDO ELÉCTRICO | 797,346.00 | 221.49 | 24% |
| TOTAL ENERGÍA CALENTAMIENTO DE AGUA | 3,327,877.12 | 924.41 | 100% |

Fuente: (Elaboración Autor)

Tal como se menciona en la sección 6.3.3 y tomando como base el tiempo de encendido y apagado de las resistencias eléctricas se calcula que, del total de energía usada para el calentamiento de agua durante el periodo de estudio, la energía suministrada por el calentador solar equivale aproximadamente al 76% de la energía total y la energía suministrada por el respaldo eléctrico corresponde al 24% del total de la energía requerida para el calentamiento de agua.

Es decir, el sistema híbrido solar – eléctrico generaría un ahorro en consumo energético equivalente al 76% del consumo eléctrico al compararlo con un sistema puramente eléctrico.

7.2 ANÁLISIS DE COSTOS DEL SISTEMA HÍBRIDO

Los costos del proyecto se desglosan entre materiales, equipos, construcción y montaje tal como se muestra a continuación.

7.2.1 MATERIALES Y EQUIPOS

En la tabla 17 se muestran los valores estimados de los materiales utilizados para la construcción del sistema de calentamiento de agua híbrido solar - eléctrico.

Tabla 17. Costos de materiales y equipos para el sistema solar híbrido

| MATERIALES Y EQUIPOS | | | | |
|---|-----------------|-----------------|--------------------------|-----------------------|
| DESCRIPCIÓN | CANTIDAD | UNIDADES | C. UNITARIO [USD] | C. TOTAL [USD] |
| PLANCHA DE ALUMINIO | 12 | KG | \$ 2.00 | \$ 24.00 |
| TUBERÍA DE COBRE | 5 | KG | \$ 2.50 | \$ 12.50 |
| AISLAMIENTO TÉRMICO | 5 | KG | \$ 1.00 | \$ 5.00 |
| MATERIAL TANQUE DE ACERO AL CARBONO | 30 | KG | \$ 2.00 | \$ 60.00 |
| ESTRUCTURA METÁLICA | 24 | KG | \$ 1.70 | \$ 40.80 |
| FUNGIBLES Y CONSUMIBLES | 2 | KG | \$ 10.00 | \$ 20.00 |
| RESISTENCIAS ELÉCTRICAS | 3 | EA | \$ 10.00 | \$ 30.00 |
| PLC | 1 | EA | \$ 450.00 | \$ 350.00 |
| COSTO TOTAL MATERIALES Y EQUIPOS | | | | \$ 542.00 |

Fuente: (Elaboración Autor)

7.2.2 CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE

En la tabla 18 se muestran los valores estimados de construcción y montaje del sistema híbrido solar – eléctrico.

Tabla 18. Costos de construcción y montaje para el sistema solar híbrido

| CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE | | | | |
|-------------------------|----------|----------|-------------------|----------------|
| DESCRIPCIÓN | CANTIDAD | UNIDADES | C. UNITARIO [USD] | C. TOTAL [USD] |
| MONTAJE INSTRUMENTACIÓN | 1 | EA | \$ 150.00 | \$ 150.00 |
| CONSTRUCCION COLECTOR | 1 | EA | \$ 1,250.00 | \$ 1,150.00 |
| CONSTRUCCION TANQUE | 1 | EA | \$ 575.00 | \$ 575.00 |

Fuente: (Elaboración Autor)

7.2.3 RESUMEN DE COSTOS

Tomando en cuenta los valores de los materiales y construcción se presenta a continuación, en la tabla 19, un resumen de los costos totales de construcción y montaje del sistema híbrido solar – eléctrico.

Tabla 19. Resumen de costos del proyecto

| RESUMEN DE COSTOS | |
|------------------------|--------------------|
| MATERIALES Y EQUIPOS | \$ 542.30 |
| CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE | \$ 1,875.00 |
| TOTAL | \$ 2,417.30 |

Fuente: (Elaboración Autor)

7.2.4 ANÁLISIS DE RENTABILIDAD DEL SISTEMA HÍBRIDO VS SISTEMA ELÉCTRICO

Considerando que el valor promedio eléctrico de la energía eléctrica el sector residencial en el Ecuador es de 0.09 USD / kWh; el costo total equivalente de la

energía usada durante el periodo de investigación hubiera sido aproximadamente de 83.20 USD, tal como se muestra en la tabla 20.

De acuerdo a lo mostrado anteriormente en la tabla 16 referente al origen del suministro de energía se puede calcular que el costo del consumo energético real fue alrededor de 19.93 USD.

Es decir, el ahorro en consumo eléctrico durante los 104.8 días acumulados del estudio fue de aproximadamente 63.26 USD.

Los cálculos de energía usada para el calentamiento de agua y costos equivalentes durante el periodo de estudio se muestran continuación, en la tabla 20.

Tabla 20. Costos de consumo de energía

| Sistema | Energía sistema [kJ] | Energía sistema [kWh] | Costo energía [USD] |
|--------------------------------|----------------------|-----------------------|---------------------|
| Colector solar | 2.530.531,12 | 702,93 | 63,26 |
| Resistencias eléctricas | 797.346,00 | 221,49 | 19,93 |
| Total general | 3.327.877,12 | 924,41 | 83,20 |

Fuente: (Elaboración Autor)

La tabla 21 muestra el consumo energético mensual de una familia tipo de 4 miembros, mismo que es de aproximadamente 350 kWh / mes.

Tabla 21. Consumo energético mensual familia tipo

| Mes | kWh |
|------------------|--------|
| Diciembre | 319.00 |
| Enero | 404.00 |
| Febrero | 319.00 |
| Marzo | 347.00 |
| Abril | 358.00 |
| Promedio | 349.40 |

Fuente: (Elaboración Autor)

Tomando en cuenta lo expuesto en la Figura 7 de la sección 2.1.3 se estima que el porcentaje de consumo energético para calentamiento de agua de uso sanitario es alrededor del 30% del consumo total de energía usada en las residencias, es decir, para una familia tipo de 4 miembros se tendría un consumo mensual energético asociado a calentamiento de agua equivalente a 105 kWh.

Con esta información se puede obtener un resumen comparativo del consumo eléctrico mensual para calentamiento de agua sanitaria (ACS) mediante un sistema híbrido, que usa tan solo el 24% de energía eléctrica versus un sistema eléctrico convencional, tal como se muestra en la tabla 22 a continuación.

Tabla 22. Consumo energía sistema híbrido vs sistema eléctrico

| Sistema | Energía usada ACS [kWh] | Costo energético / mes [USD] |
|-----------|-------------------------|------------------------------|
| Eléctrico | 105 | \$9.45 |
| Híbrido | 25.2 | \$2.27 |

Fuente: (Elaboración Autor)

Al sumar los costos totales del proyecto con el ahorro anual generado se obtienen los resultados mostrados en la tabla 23.

Tabla 23. Costos totales del sistema

| Tipo de calentador | Costo total sistema [usd] | Costo energía anual [usd] |
|--------------------|---------------------------|---------------------------|
| Eléctrico | \$380.00 | \$113.40 |
| Híbrido | \$2,417.00 | \$27.24 |

Fuente: (Elaboración Autor)

Anualizando los costos para periodos de 10, 15 y 20 años se puede concluir que el proyecto no es financieramente rentable puesto que el mismo cubriría los costos

de fabricación, instalación y mantenimiento en un período de por lo menos 15 años, tal como se muestra en la figura 92.

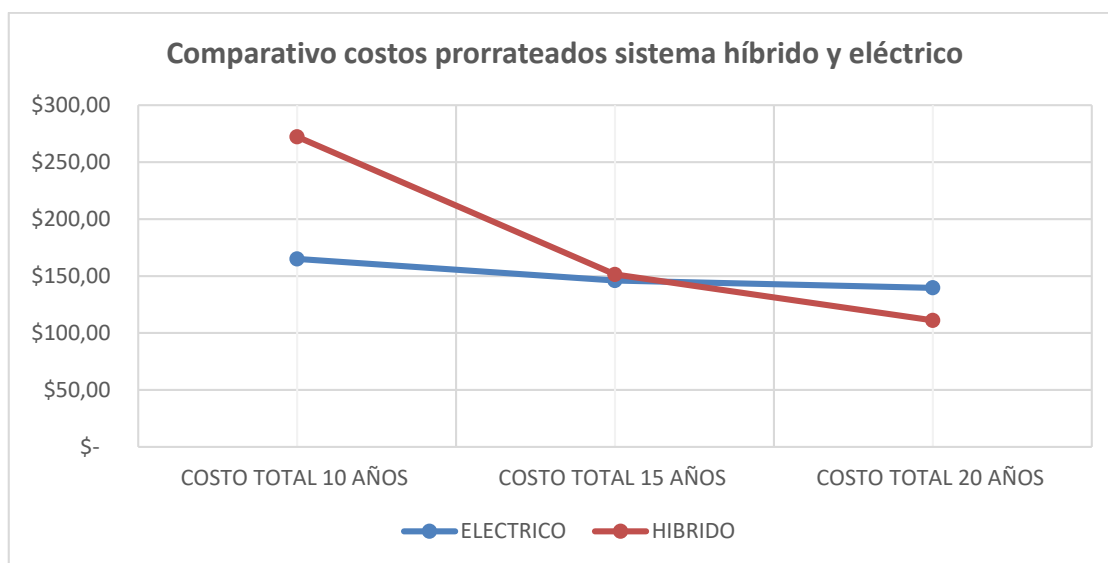


Figura 92. Costos totales anualizados sistema eléctrico vs híbrido

Fuente: (Elaboración Autor)

7.2.5 ANÁLISIS DE RENTABILIDAD DEL SISTEMA HÍBRIDO VS SISTEMA A GAS.

Usando la misma metodología que en la sección anterior se compara el sistema híbrido con un sistema convencional a gas para lo cual se toma en cuenta que un cilindro de 15 kg de uso doméstico en el Ecuador contiene aproximadamente 190 kWh, es decir para cubrir los 105 kWh necesarios para el consumo de agua caliente sanitaria (ACS) estimados anteriormente se debería usar el 55% de un cilindro de 15 kg. Si se considera que el costo de un cilindro está alrededor 3.5 USD, se obtienen los resultados mostrados a continuación en la tablas 24 y 25.

Tabla 24. Consumo energía sistema híbrido vs sistema gas

| Sistema | Energía usada ACS [kWh] | Costo energético / mes [USD] |
|---------|-------------------------|------------------------------|
| Gas | 105 | \$1.75 |
| Híbrido | 25.2 | \$2.27 |

Fuente: (Elaboración Autor)

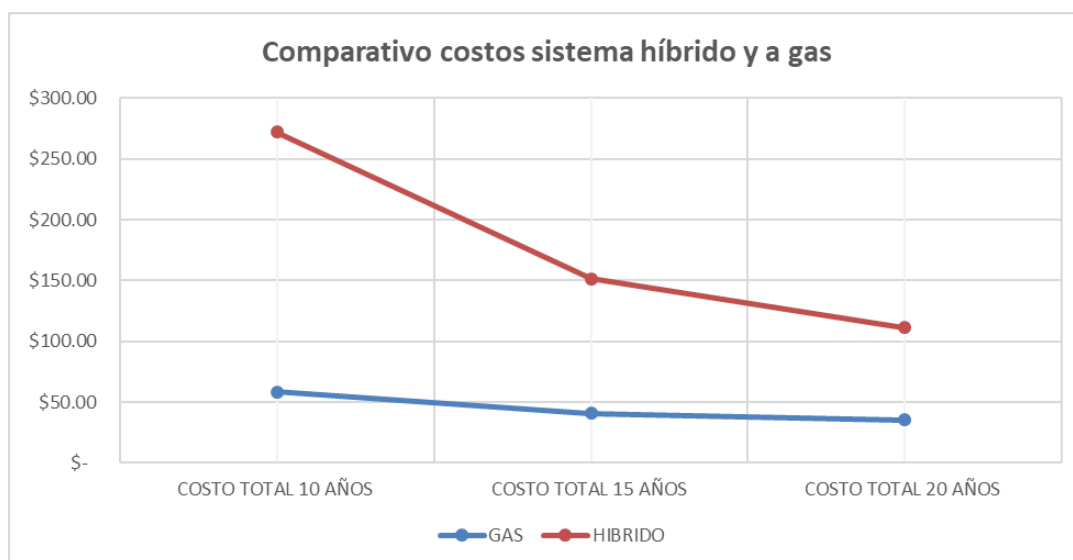
Tabla 25. Costos totales del sistema

| Tipo de calentador | Costo total sistema [usd] | Costo energía anual [usd] |
|--------------------|---------------------------|---------------------------|
| Gas | \$350.00 | \$21.00 |
| Híbrido | \$2,417.00 | \$27.24 |

Fuente: (Elaboración Autor)

Anualizando los costos para periodos de 10, 15 y 20 años se puede concluir que el sistema híbrido es aún menos favorable comparado con el sistema a gas debido al subsidio energético que actualmente mantiene el Ecuador con el GLP.

A continuación, se muestra el comparativo en la figura 93.

**Figura 93.** Costos totales anualizados sistema gas vs híbrido

Fuente: (Elaboración Autor)

A menos que se elaboren planes de incentivos por parte del Estado para fomentar el desarrollo de estas tecnologías limpias con el fin de abaratar los costos de la materia prima tales como la reducción de aranceles de materiales de importación o a su vez implementando subsidios para este tipo de tecnologías, los mismos no podrán competir con la oferta actual del mercado en el país.

CAPÍTULO 8

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1 CONCLUSIONES

- Debido a que el modelo matemático generado mediante las simulaciones en Matlab se ajusta a los datos experimentales, se lo puede usar como referencia para modelar este tipo de sistemas con el fin de optimizar los parámetros de fabricación.
- Tanto los valores de flujo másico como los de eficiencia se ajustan adecuadamente al modelo experimental y pueden ser usados de manera confiable con el fin de calcular los parámetros de diseño.
- Al tener un incremento en la eficiencia de al menos un 25% mediante el diseño del colector con lamina reflectiva en la base y placa de absorción cuadrículada con respecto a los colectores solares convencionales, es factible continuar analizando mejoras en el diseño que incrementen la eficiencia del calentamiento con el fin de que los sistemas híbridos se vuelvan más atractivos para la comercialización.
- El ahorro de energía eléctrica que proporciona el colector solar híbrido con respaldo eléctrico vs un sistema eléctrico convencional llega a un 76% por lo que se puede continuar incentivando su uso mediante políticas ambientales y subsidios a este tipo de nuevas tecnologías.
- Los costos de construcción local del proyecto son bastante elevados comparados con el ahorro energético en términos monetarios, lo que vuelve al proyecto poco rentable desde el punto de vista financiero.
- Los subsidios energéticos que mantiene el Ecuador tanto en combustibles fósiles como el GLP y en electricidad dificultan que la eficiencia de los sistemas híbridos

como el estudiado puedan potenciarse localmente debido a los altos costos de manufactura y bajo diferencial en ahorro energético.

8.2 RECOMENDACIONES

- Se recomienda ampliar el estudio en lo referente a la lámina reflectiva y la configuración de la placa de absorción a fin de mejorar la eficiencia del sistema y volverlo más atractivo para la comercialización.
- Se recomienda continuar con la elaboración y simulación de modelos matemáticos mediante el uso de software de desarrollo como Matlab a fin de entender adecuadamente la interacción entre las variables que intervienen en la elaboración del sistema.
- Se recomienda socializar este tipo de proyectos con los fabricantes locales y usuarios finales a fin de incentivar el uso de estas nuevas tecnologías para abaratar los costos de fabricación.
- Se recomienda analizar las políticas de subsidios energéticos a fin de que sean focalizadas en este tipo de proyectos de bajas emisiones de CO₂ que podrían generar un alto impacto local al masificar su producción.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Altomonte, H., Coviello, M., & Cuevas, F. (2004). *Fuentes renovables de energía en América Latina y el Caribe*. México: CEPAL-GTZ.

Buzas, J. (2009). *Solar Domestic Hot Water System Simulation using block oriented software*. Godollo, HUNgary: SZENT University.

Buzas, J. (2009). *Thesis of the doctoral Ph.D.* Godollo, HUNgary: SZENT UNiversity .

Buzas, J., Farkas, A., & Brio, R. (1998). *Modeling and Simulation of a thermal system*. Godollo, HUNgary: University of Agricultural Sciences.

Cámara de la construcción de Quito. (2009). *Norma NEC-10 Parte 14-1*. Quito: Cámara de la construcción de Quito.

Castro, M. (2011). *Hacia una Matriz Energética diversificada en Ecuador*. Quito: CEDA.

CONELEC. (2008). *Atlas solar del Ecuador*. Quito: CIE.

Herrera, J., Lopes, J., & Arias, K. (2012). *Introducción a la matriz energética*. Quito: Grupo FARO.

IDAE. (2013). *Análisis del consumo residencial en España*. Madrid, España: Secretaría General Departamento Planificación y Estudios.

INAMHI. (2013). *Anuarios meteorológicos*. Quito: INAMHI.

International Energy Agency (IEA). (2015). *World Energy Outlook*. Paris: IEA.

International Energy Agency. (2012). *World Energy Statistics*. PARIS: IEA.

- Klein, S. (1973). *The effect of thermal capacitance upon the performance of flat plate solar collectors*. Wisconsin, USD: University of Wisconsin.
- Major Economies Forum on Energy and Climate. (2009). Buildings Sector Energy Efficiency. *Technology Action Plan*, 50.
- Ministerio de Coordinación de la Producción. (2013). *Agenda para la transformación productiva*. Quito: MCPEC.
- MIPRO. (2013). Dotación equipos fotovoltaicos. *MIPRO en línea*, 1-2.
- Orozco, C. (2006). *Dimensionamiento óptimo de instalaciones solares de calentamiento*. Pereira, Colombia: Scientia et Technica.
- Pillajo, J., & Castillo, L. (2007). *Diseño y construcción de un calentador solar de agua con capacidad de 200 litros*. Sangolquí, Ecuador: ESPE.
- SASI Group. (2006). *Agua para consumo doméstico*. Sheffield, USA: University of Sheffield.
- SENPLADES. (2013). *Cambio de la matriz energética*. Quito: SENPLADES.
- UE. (2006). *Thermal solar systems and components, part 1*. Paris: EN-12975-2.
- Wenxian, L. (1991). *Parametric Studies of Thermosyphon solar water systems with electric heaters*. Kunming, China: Yunnan University.
- Herrera Juan, López Julio, Arias Karla, Introducción a la matriz energética y el nuevo proceso de licitación petrolera, Grupo FARO, Quito, agosto 2012.
- Burbano Carlos, Restrepo Hernán, Sabogal Oscar, Diseño y construcción de un

- calentador solar de agua operando por termosifón, revista Scientia et Technica No 31, Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia, 2006.
- Orozco Hincapie Carlos A., "Elementos de Ingeniería Solar", Publicaciones U.T.P., Pereira, Colombia, 1993.
- Logie William, Elimar Frank, Haller Michel, Matthias Rommel, Investigation of Immersed Coil Heat Exchangers in Regard to Heat Transfer and Storage Stratification, Institute fur Solartechnik SPF, Rapperswil, Switzerland, 2010.
- CABIROL, Thierry. "El Colector Plano de Efecto de Invernadero y el Calentador Solar de Agua". España: Editorial Continental, 1978.
- DUFFIE, Jhon A. y William Beckman. "Solar Engineering of Thermal Process". New York: Jhon Wiley, 1980.
- MARGEVICIUS, Jose. "La Energía Solar y su Aplicación en Calentadores Solares". República Dominicana : Universidad Catolica, 1981.
- Tabor H, "Radiation Convection and Conduction Coefficients in Solar Colectors". Bull. Res Coun, Israel, 1958.
- Klein S, M.S. Thesis, The effect of thermal capacitance upon the performance of flat plate solar collectors, University of Wisconsin, USA, 1973.
- Cora Placco, Saravia Luis, Cadena Carlos, Colectores solares para agua caliente, INENCO, UNSa, Salta.
- ASHRAE, Active Solar Heating Systems Design Manual, American Society of Heating,

Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Inc, Atlanta, USA, 1988.

Kreider Jan, Mechanical Engineers Handbook, Solar Energy Applications, University of Colorado, Boulder, Colorado, 1998.

Weinstock Dan, Optimal Solar Field Design of Stationary Collectors, Journal of Solar Energy Engineering, Tel-Aviv University, Israel, August 2004.

Quaschnig, V., and Hanitsch, R., 1998, "Increased Energy Yield of 50% at Flat Roof and Field Installations With Optimized Module Structures," 2nd World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion, Vienna, Austria, pp. 1993–1996.

Appelbaum, J., and Erlicki, M. S., 1964, "A Problem of Economic Optimization of Electric Equipment Design," IEEE Trans. Commun. Electron., 83, No. 75, pp. 773–776.

S. Kalogirou, Solar energy engineering, processes and systems, Academic Press 2009.

Koo Jae-Mo, M.S. Thesis, Development of a flat-plate solar Collector design program, University of Wisconsin, USA, 1999. Incropera F, Dewitt D, "Fundamentos de transferencia de Calor", Mexico, Prentice Hall, Edición 4ta.

Beckman, W.A., Klein, S.A. and Duffie, J.A. (1977), Solar Heating Design by the f-Chart Method, 1st ed., New York, John Wiley.

Klein, S.A., Beckman, W.A. and Duffie, J.A. (1975), A Design Procedure for Solar Heating Systems, Solar Energy, Vol. 18, pp. 113-127.

Bliss, R.W. Jr. (1959), The Derivations of Several "Plate-Efficiency Factors" Useful in the Design of Flat-Plate Solar Heat Collectors, Solar Energy, Vol. 3, no. 4, pp. 55-64.

Mesa, Fernando, 1999, Colector solar de Placa Plana.

Holger Barriga, Gonzalo Sánchez, (2015), COMPENDIUM, ISSN 1390-8391, Vol 2, No 4, ESPOL, Guayaquil, Ecuador.