

SYSTEM FOR MONITORING AND CONTROL OF A SOLAR HYBRID HEAT PUMP THROUGH HARDWARE AND FREE SOFTWARE

SISTEMA PARA MONITOREO Y CONTROL DE UNA BOMBA DE CALOR HIBRIDA SOLAR MEDIANTE HARDWARE Y SOFTWARE LIBRE

**Dr. IE. Francisco Ernesto Moreno Garcia, IE. Edwin Leonardo Perez Buitrago,
IE. Numael Limas Rodriguez, IE. John Jairo Ramirez Mateus**

Universidad Francisco de Paula Santander

Facultad de Ingeniería, Ingeniería Electrónica, Grupo de Investigación y desarrollo en microelectrónica aplicada y control GIDMAC

Av. Gran Colombia No 12E-96 Barrio Colsag, San José de Cúcuta, Colombia.

Tel.: 057-7-5776655, Ext. 837

E-mail: {femgarcia, edwinperez, numaelr, jhonjairorm}@ufps.edu.co

Abstract: This work presents the development of a monitoring and control system for an experimental prototype of a hybrid heat pump with solar and conventional energy assistance. Its electronic system is based on hardware in circuit arduino and python free interface developed in the energy and control research laboratory (LIEC) of the Francisco Paula Santander University (UFPS). This heat pump prototype takes advantage of a 1.6 m² area through a concentric solar collector and complemented by with a thermal machine incorporating a hermetic compressor Samsung brand of 0.874 kW. The theoretical basis, calculations, guidelines and the construction of a shield for Arduino that contains the instrumentation circuits for sensors and actuators are exposed, thus, as the design and algorithms that describe the operation of the interface developed to monitor the processes in which the system is located, and from which the system can be manipulated, manually or automatically for the respective analysis of the module behavior at different working conditions.

Keywords: Heat Pump, Solar Collector, Supervision.

Resumen: Este trabajo presenta el desarrollo de un sistema de monitoreo y control para un prototipo experimental de bomba de calor híbrida con asistencia de energía solar y convencional. Su sistema electrónico está basado con hardware in circuit e interfaz libre python desarrollado en el laboratorio de investigación de energía y control (LIEC) de la universidad francisco de paula Santander (UFPS). Este prototipo de bomba de calor aprovecha un área de captación de 1,6 m² a través de un colector solar con tubos concéntricos complementado con una maquina térmica incorporando un compresor hermético marca Samsung de 0,874 kW. Se expone la base teórica, cálculos realizados, pautas y la construcción de una shield para arduino que contiene los circuitos de instrumentación para sensores y actuadores, así, como el diseño y algoritmos que describen el funcionamiento de la interfaz desarrollada para monitorear los procesos en los que se encuentra el sistema, y desde la cual se puede manipular el sistema, de manera manual o automática para el respectivo análisis del comportamiento del módulo a distintas condiciones de trabajo.

Palabras clave: Bomba de calor, Colector Solar, Supervisión

1. INTRODUCCION

Los captadores o colectores solares aprovechan la energía solar-térmica, R. K. Musunuri, D. Sánchez y R. Rodriguez (2007), funcionan

empleando el efecto invernadero; el cual su película frontal de vidrio actúa como filtro para ciertas longitudes de onda de la luz solar y deja pasar fundamentalmente la luz visible con la mayor parte de la energía. Ésta calienta la placa

colectora que, a su vez, se convierte en emisora de radiación. Bajo ese concepto, según autores Sedano, Vallín, Luna, Sedano, & Morán (2011) destacan el incremento de la aplicabilidad de colectores solares a nivel residencial, por su gran interés para posibles trabajos donde se precise buenos rangos de temperatura en los diferentes fluidos de trabajo a intercambiar calor. Nuestro prototipo desarrollado fue sustentado bajo el principio fundamental de una bomba de calor con asistencia solar aprovechando el uso de este tipo colectores anteriormente mencionado. La facultad de poder reorientar la energía proveniente de la radiación solar más la energía de una máquina térmica adicional tuvo como éxito el incremento y almacenamiento de agua a temperaturas en el orden de los 60°C para su uso doméstico. Por ello en este documento se presenta el diseño inicial, el modelo matemático, los sensores y actuadores, la adquisición de datos y la construcción de la interfaz como herramienta de seguimiento y control a este tipo de tecnología desarrollada.

2. DISEÑO DEL PROTOTIPO HIBRIDO

2.1. Diseño de la bomba de calor híbrida

La bomba de calor es una máquina térmica en ciclo reversible soportado por un compresor modelo UR4A092HUAEP para 9000 BTUs de refrigeración, un colector solar de ancho 0.86 m y largo de 1.89 m lo cual nos permite manejar un área captación de aproximadamente 1.6 m²; un tanque reservorio de 30 litros con recirculación de agua por medio una bomba periférica de ½ Hp a través de tuberías en pvc de ½ pulgada. En la figura 1 de puede apreciar el sistema de bomba de calor híbrido desarrollado, D. Jaimes y R. Bueno (2018).



Fig. 1. Módulo prototipo calentador de agua

En la figura 2, se puede apreciar la información necesaria a medir dentro del ciclo termodinámico interno y externo de la bomba de calor como lo son la temperatura en T2 y T3 (Puntos antes y después del colector-evaporador), la temperatura

del agua de entrada (T_{w_in}) y temperatura del agua de salida (T_{w_out}), también la data de la radiación solar, entre otros, como información para adquirir necesaria y así permitirnos estudiar posteriormente la eficiencia de dicho prototipo.

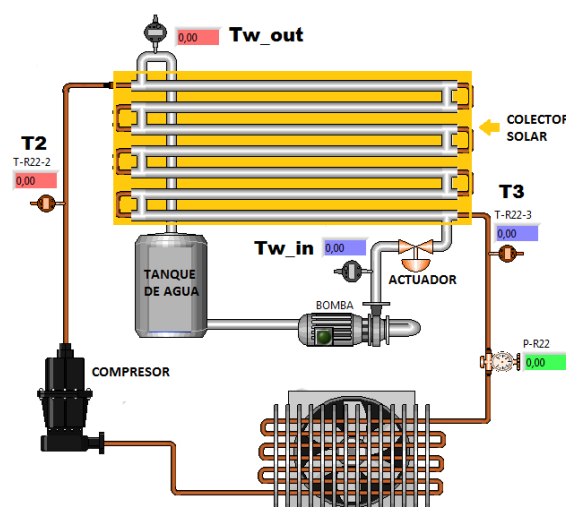


Fig. 2. Puntos de medición de variables

2.2. Modelo matemático estático

Como primera fase, según figura 3, se presenta un diagrama de flujo, donde se representan los flujos de calor que intervienen en el sistema de bomba de calor híbrida, como es la flujo de calor (Q_{solar}) recibido en el colector a través de la radiación solar incidente (Q_{solar}); el flujo de calor adicionado por la máquina térmica de refrigeración (Q_{cd}) en la que intervienen las entalpías del gas refrigerante del R22 a la entrada y salida del colector intercambiador (H2 y H3), además el flujo del refrigerante (m_{R22}); y el flujo de calor neto transferido hacia el agua (Q_w) dependiente de la efectividad en el proceso de transferencia de calor de la bomba de calor híbrida.

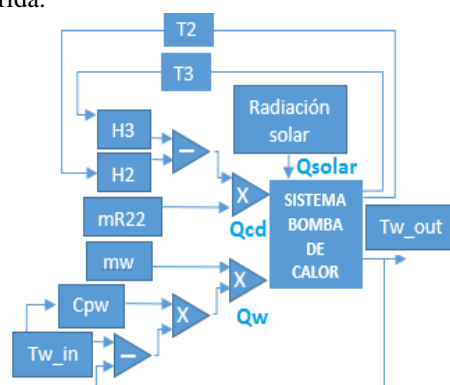


Fig. 2. Diagrama modelo estático bomba de Calor híbrida

Al hacer el balance de energía del sistema se obtuvo que:

$$Q_w = Q_{solar} + Q_{cd} \quad (1)$$

Donde:

Q_w : Flujo de calor transferido al agua (J/seg).

Q_{solar} : Flujo de calor solar incidente en el colector (J/seg).

Q_{cd} : flujo de calor adicionado por la maquina térmica (J/seg).

Sabiendo que el flujo de calor transferido al agua final está definido por la siguiente ecuación:

$$Q_w = mw(T_{w_{out}} - T_{w_{in}})C_{pw} \quad (2)$$

Donde:

mw : Flujo del agua constante (Kg/seg).

$T_{w_{in}}$: Temperatura de entrada del agua (°C).

$T_{w_{out}}$: Temperatura de salida del agua (°C).

C_{pw} : Calor específico del agua constante de 4.186 (KJ/Kg°C).

La radiación solar presente por el área del colector, nos permite calcular el flujo de calor solar que recibe el colector

$$Q_{solar} = R_{solar} * A_c \quad (3)$$

Donde:

R_{solar} : Radiación solar presente (w/ m²).

A_c : Área del colector constante de 1.6 (m²).

El flujo de calor generado desde la maquina térmica está definido por

$$Q_{cd} = mR22(H2 - H3) \quad (4)$$

Donde:

$mR22$: Flujo del refrigerante R22 (Kg/h).

$H2$: Entalpia hallada por T_2 (KJ/Kg).

$H3$: Entalpia hallada por T_3 (KJ/Kg).

El flujo del refrigerante que es constante dependiendo si esta encendido el compresor o no, pero las entalpias $H2$ y $H3$ se calcularon mediante una técnica de regresión desde T_2 y T_3 , de los resultados se obtuvo las ecuaciones 5 y 6:

$$H2 = 416.591 - 0.453618 T_2 + 0.0170735 T_2^2 - 0.000152374 T_2^3 \quad (5)$$

$$H3 = 189.465 + 1.51038 T_3 \quad (6)$$

Mediante tratamiento matemático y apoyado por referencias tales como R. T. Giacomo Braida (2016), se pudo despejar la temperatura de salida

del agua de la ecuación (2), que es el dato que se requiere calcular, se obtuvo:

$$T_{w_{out}} = T_{w_{in}} + \left(\frac{(R_{solar} * A_c) + mR22(H2 - H3)}{mw * C_{pw}} \right)$$

Esta ecuación final, nos permitió entender el comportamiento de la bomba de calor para sus dos modos de uso, cuando esta encendido el compresor y cuando no está encendido, esto quiere decir que, si el compresor está apagado ($mR22=0$), la única energía térmica que se transfiere al fluido de trabajo es proveniente por colector solar a través de la radiación solar, ahora, si el compresor esta encendido, se asegura un una aporte de energía adicional que se consigue por la transferencia de la maquina térmica de refrigeración.

3. INSTRUMENTACIÓN

3.1. Sensores y actuadores

Hasta el momento según modelo teórico estudiado, es importante resaltar la importancia de conocer qué tipo de herramienta nos favorece para hacer una medición correcta de estas variables, a continuación, conoceremos cuales fueron los sensores y actuadores que se utilizaron:

- *Sensor de temperatura Pt 100*: Los sensores Pt100, como se aprecia en la figura 3, son un tipo específico de detector de temperatura RTD (detector de temperatura por resistencia). La característica más importante de los elementos Pt100 es que están fabricados con platino con una resistencia eléctrica de 100 ohmios a una temperatura de 0 °C y es con diferencia el tipo más común de sensor RTD.



Fig. 3. Sensor Pt100 de dos hilos. Schneider electric (2020)

- *Electroválvula TCN-02T de TCrystal*: TCrystal fabrica la serie de electroválvulas TCN-02, que opera con un rango de torque de 15 Nm a 20 Nm, un ángulo de rotación de 90° a 270°, tiempo de arranques de 1 segundo, 10 segundos o 15 segundos, según las necesidades del proyecto, la alimentación es de 12 V a 24V DC. Además, cuenta con un panel en la parte superior de la electroválvula en el que se le pueden modificar ciertos parámetros de operación. Se puede observar en la figura 4.



Fig. 4. Electroválvula TCN-02T

- *Sensor de presión SPT25-10-0300a:* Transmisor de presión ProSense, rango de medición desde 0 a 300 psi, figura 5, sensor de acero inoxidable, salida analógica lineal de 0-10 VDC, o de 4 a 20 mA, según se quiera, conexión de proceso NPT macho de 1/4", Voltaje de operación de 14 a 36 Vdc.



Fig. 5. Sensor de presión SPT25-10-0300A. Automation direct (2020)

- *Medidor de radiación solar Davis 6450:* El Davis 6450 [17], es sensor de radiación solar o piranómetro de precisión, como se ve en la figura 6, detecta radiación solar global, en longitudes de onda de 400 a 1100 nanómetros, La señal de salida de este dispositivo es un voltaje análogo, entre 0 V y 3 V, con una equivalencia de 1.67 mV por W/m^2 y precisión de $\pm 5\%$.

3.2. Adquisición de datos y circuitos de acondicionamiento

La adquisición de datos consistió en tomar muestras en tiempo real del comportamiento de fenómenos que estaban presentes en nuestro sistema, como en este caso, muestras de presión, temperatura, y radiación las cuales se llevaron a un ordenador para luego ser procesadas para futuros análisis termodinámicos.



Fig. 6. Sensor de radiación Davis 6450. Davis Instruments (2018).

Se utilizó arduino mega 2560, la cual es una placa de desarrollo, de software libre basada en el microcontrolador ATmega2560.

Cada elemento que se conectó tiene un proceso de adecuación de la señal que este emite, esto es con el fin de proteger el sistema de adquisición de datos y lograr una buena medición de cada uno de los sensores que se usaron, por ello se tuvo en cuenta las especificaciones en los datasheet de cada uno.

En el caso de la RTD PT100 de dos hilos, se usó el módulo transmisor MAX31865 conectado en cascada como se aprecia en la figura 7, que permitió obtener las mediciones de temperatura, éste se encargó de realizar la lectura de resistencia del sensor PT100 y convirtió esta señal analógica en un dato digital para ser interpretado por un arduino, el protocolo de comunicación que usa este módulo es de tipo SPI, en la figura también se observa su conexión, los pines usados para la comunicación de datos y alimentación

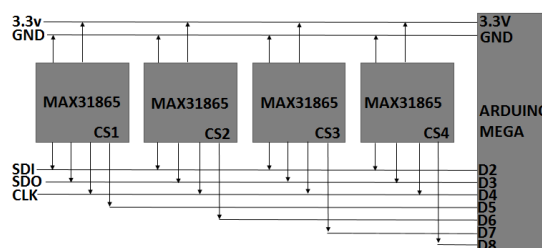


Fig. 7. Conexión de las MAX31865 para las PT100

Para el sensor SPT-25-10-0300A en su rango de trabajo de 0 a 300 Psig, nos permitió hacer la lectura de la variable de presión del refrigerante R22 que generó el compresor, este sensor tiene una salida de 0 a +10v que para poder ser leída desde el arduino mega fue necesario diseñar un divisor de tensión que redujo este voltaje a un rango de 0 a +5v, la conexión de este sensor

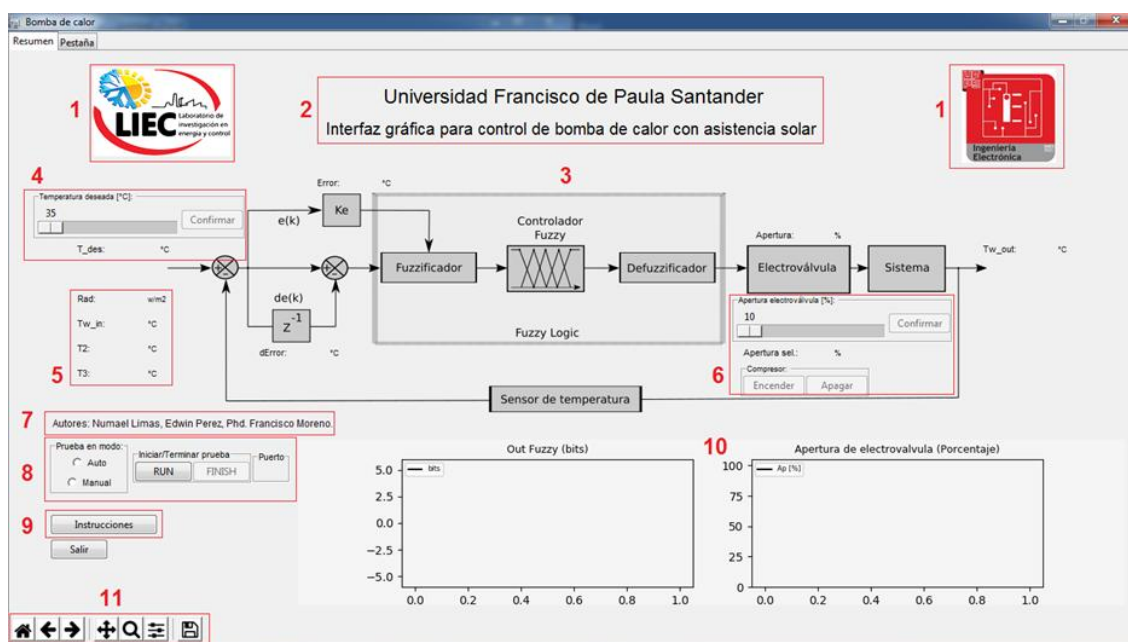


Fig. 12. Pestaña principal de interfaz de usuario.

La segunda pestaña, figura 12, nos permite visualizar el comportamiento de las variables del proceso en tiempo real, estas son temperaturas de entrada y salida del agua, temperaturas del refrigerante R22, presión y radiación solar

5. RESULTADOS

Las pruebas se realizaron con el fin de comprobar que el modelo matemático corresponda con el comportamiento de la máquina, además la supervisión de las variables de manera correcta ante los diferentes cambios presentes en el ambiente desde las 7am hasta 6pm para dos días de pruebas experimentales, a continuación, se detalla cada una de las pruebas realizadas:

4.1. Graficas con compresor OFF con la presencia de la radiación solar

La prueba con el compresor apagado se realizó con apertura de la electroválvula en 10% y 100%, a su vez en presencia de radiación solar, para observar cual era el rango de trabajo.

La grafica de la figura 13 nos muestra cuales fueron los rangos de trabajo alcanzados en estas condiciones; para apertura en 100% se logran temperaturas bajas, en un rango de 35°C a 45°C aproximadamente, mientras que con apertura en 10% se logró rangos de temperatura entre 37°C y 60°C aproximadamente, esto debido a la radiación presente en el momento y al porcentaje de apertura de la electroválvula al regular el flujo másico del agua proveniente del reservorio a un

mínimo posible que forma que absorba la mayor cantidad de energía solar.

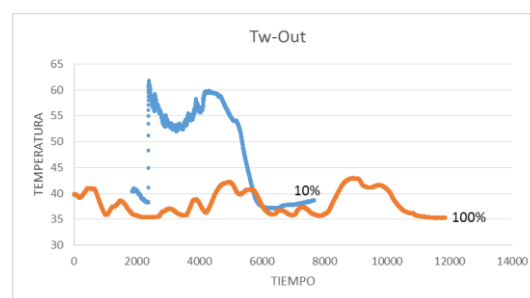


Fig. 13. Grafica de la temperatura de salida

La radiación presente el día de la prueba (figura 14), demostró que entre 4000 y 6000 segundos (entre las 10 am y 1pm) fue alta y allí se obtuvo el rango mayor de temperatura de la máquina debido a picos de radiación en el orden de los 1200 w/m²

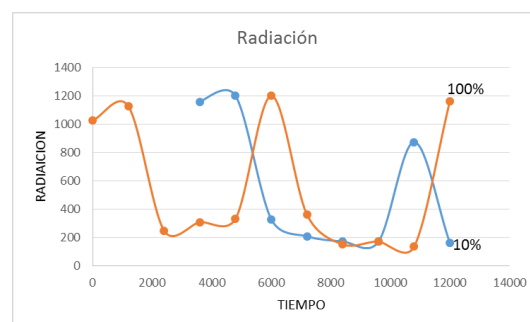


Fig. 14. Radiación solar presente en la prueba

El flujo neto transferido al agua constatado por ecuación (2), nos permitió validar experimentalmente la influencia de las variaciones de la radiación solar al transcurso del día, donde Q_w se hizo mayor en el orden de los 800 watts cuando el caudal era alto, es decir en 100% de apertura de la electroválvula y bajo 500 watts para un 10% de apertura, en la gráfica de la figura 15 se aprecia esta conducta.

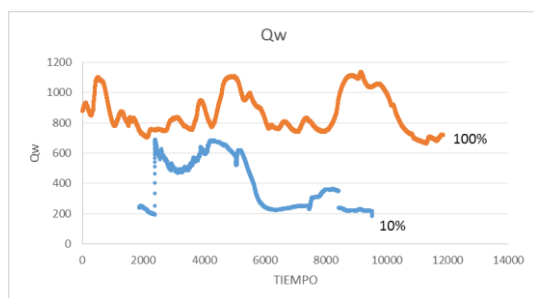


Fig. 15. Gráfica de Q_w

4.2. Gráficas con compresor ON sin radiación solar

Esta prueba realizada en condiciones de apertura de electroválvula de 10%, 50% y 100% y bajo una radiación nula, nos permitió apreciar su rango de trabajo en. En la gráfica de la figura 16, se logra percibir que el comportamiento de la temperatura de salida del agua va en aumento, esto quiere decir que el porcentaje de apertura es inversamente proporcional a T_{w-Out} .

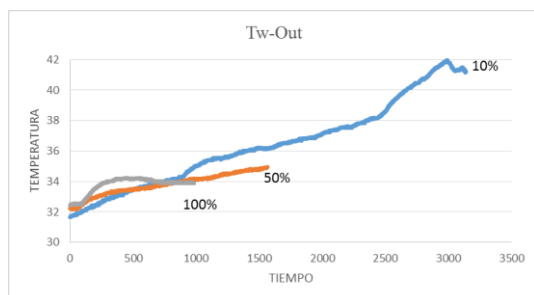


Fig. 16. Gráfica de la temperatura de salida

La presión del refrigerante (figura 17), nos indicó los KPa a los cuales trabajó el compresor y su tendencia a estabilizarse en 1000 KPa, independiente del porcentaje de apertura, esto nos ayudó también a comprender la viabilidad y aprovechamiento del efecto en el calentamiento del agua solamente por la energía adicionada desde la máquina térmica de refrigeración.

El flujo de calor neto absorbido por el agua en esta condición de compresor ON, ratificó la validez del modelo estático anteriormente obtenido según ecuación (2). Flujos de calor en el orden de los 650 watts como máximo y 200 watts como mínimos permiten rangos de

operatividad ante ajustes en la electroválvula manteniendo el compresor ON.

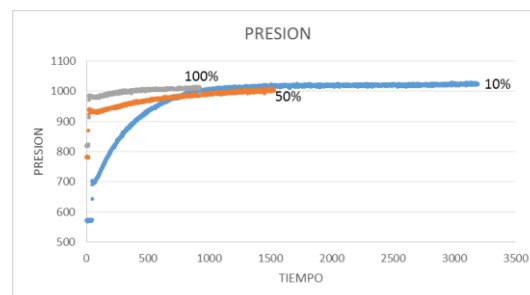


Fig. 17. Gráfica de presión

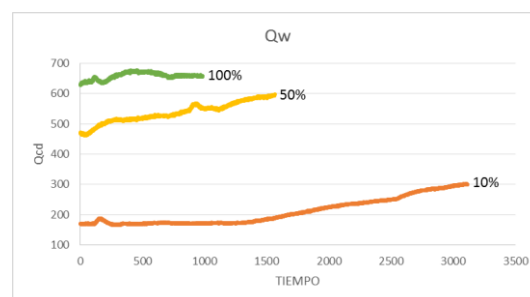


Fig. 18. Gráfica de Q_w

El rango de trabajo en esta condición de compresor encendido es de 32°C a 42°C aproximadamente.

6. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos experimentalmente nos permitieron establecer en un rango de operación satisfactorio entre los 32°C a 60°C para futuros usos con bombas de calor híbrida asistidas solarmente en comparación con los sistemas clásicos de calentamiento como duchas eléctricas residenciales.

Adicionalmente el poder desarrollar sistemas de monitoreo con software y hardware libre nos permitió la facultad de decidir cuál es el porcentaje de apertura indicado para una temperatura solicitada.

El modelo matemático estático que se obtuvo, correspondió al comportamiento del sistema experimental permitiéndonos entender como funciona en diferentes condiciones, es decir bajo los cambios de radiación y temperatura de entrada del agua que son variables naturales independiente.

Para futuros trabajos a nivel de control, se prevé la capacidad de toma de decisiones por parte del controlador ante las diferentes condiciones

ambientales diarias que son susceptibles a este tipo de sistemas.

REFERENCIAS

- R. K. Musunuri, D. Sánchez y R. Rodriguez, *Solar Thermal Energy*, Gävle, 2007
- Sedano, C., Vallín, D., Luna, A., Sedano, J., & Morán, J. (2011). *Diseño y evaluación de un colector solar con parámetros de insolación para la Costa Sur de Jalisco, México*. 9th Latin American and Caribbean Conference. Medellín, Colombia.
- D. Jaimes y R. Bueno, *Estudio experimental de una bomba de calor incorporando material PCM*, Cúcuta: Universidad Francisco de Paula Santander, 2017.
- R. T. Giacomo Braida, *Preliminary analysis of the potential energy saving achievable with a predictive control strategy of a heat pump for a single family house*, 2016.

SITIOS WEB

Davis Instruments (2018). *Sensor de radiación solar Davis 6450*. [En línea]. Available: https://www.davisinstruments.com/product_documents/weather/spec_sheets/6450_SS.pdf.

Schneider electric (2020). Sensor de temperatura pt100, [En línea]. Available: http://www.se.com/ww/resources/sites/SCHNEIDER_ELECTRIC/content/live/FAQS/239000/FA239836/ru_RU/5pt100sensoren_e.pdf

Automation direct (2020). *Sensor de presión SPT25-10-0300A*. [En línea]. Available: <https://cdn.automationdirect.com/static/specs/prosensespt25transmitters.pdf>