

DISEÑO DE LA INFRAESTRUCTURA DE CONTROL PARA UN BANCO DE PRUEBAS PARA SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN DOMÉSTICA

Maribel CARRASQUILLA; Carlos A. ZULUAGA

*Cir. 1 #70-01, Medellín, Colombia
Maribel.carrasquilla@upb.edu.co*

Resumen: En este artículo se presenta el desarrollo y puesta a punto de la infraestructura de control diseñada para los bancos de ensayos de carga de refrigerante, caracterización de la válvula y túnel de viento, del proyecto “Desarrollo de un Banco de Ensayos para Refrigeración Doméstica en la Empresa Industrias Haceb S.A.” Cada banco cuenta con tareas específicas permitiendo encontrar la combinación óptima de cada uno de los parámetros para los cuales fueron desarrollados, esto es, encontrar la combinación óptima de carga de refrigerante y longitud de tubo capilar, realizar la calibración y caracterización de las válvulas solenoides y realizar pruebas de eficiencia a los ventiladores usados en los procesos de refrigeración, respectivamente, todo esto con el fin de entregar los mejores resultados durante las pruebas de consumo energético. Para darle solución a estos requerimientos se realizará el desarrollo del *Software*, *Hardware* y *Firmware* para cada uno de los bancos de pruebas, con el fin de realizar las tareas de monitoreo durante las pruebas de eficiencia. *Copyright © 2014 UPB*

Palabras clave: Carga refrigerante; Refrigeración doméstica; Tubo capilar; túnel de viento; Consumo de energía

Abstract: The aim of this paper is to describes the development and tuning of the control infrastructure designed for test benches refrigerant charge, characterization of the valve and wind tunnel project “Desarrollo de un Banco de Ensayos para Refrigeración Doméstica en la Empresa Industrias Haceb S.A.” each bank has specific tasks allowing to find the optimal combination of each of the parameters for which they were developed, ie, finding the optimal combination of refrigerant charge and length of capillary, calibrating and characterization of the solenoid and efficiency testing the fans used in the processes of cooling, respectively valves, all this in order to deliver the best results for the energy consumption tests. To provide solutions to these requirements, the development of Software, Hardware and Firmware will be performed for each test benches to perform the tasks of monitoring during testing efficiency.

Keywords: Refrigerant charge; Domestic refrigeration; Capillary tube; wind tunnel; Power Consumption

1. INTRODUCCIÓN

El consumo energético de la población mundial se encuentra en constante crecimiento, trayendo como consecuencia la escasez de los recursos naturales, además de crear inconvenientes en el medio ambiente, como el adelgazamiento de la capa de ozono y el efecto invernadero. Estos efectos generan un impacto ambiental que difícilmente tiene solución, por esta razón se convierte en un asunto de gran preocupación para los gobiernos de muchos países y de la sociedad. Dentro de esta realidad, las industrias están perfeccionando sus procesos con el fin de atender las demandas de equipos energéticamente eficientes, ambientalmente amigables y más competitivos.

El uso del frío se popularizó a partir de los descubrimientos de la termodinámica y de la síntesis de los clorofluorocarbonados (CFC), llegándose a producir más de un millón de toneladas anuales de estas sustancias hacia los años 70. Estas sustancias, cuyo impacto inmediato a nivel de la salud y medio ambiente no podía ser previsto, se dispersaron por la atmósfera terrestre generando lo que posteriormente constituiría la primera señal de alarma sobre el sistema vivo del planeta(1).

La problemática a la cual se expone el planeta debido a los gases emitidos por estos refrigerantes dio inicio a investigaciones que permitieran el uso de nuevos refrigerantes y la optimización de las técnicas de refrigeración para lograr la reducción del consumo energético y la no emisión de gases. Nuevas técnicas de refrigeración están siendo propuestas por el grupo de termodinámica de la Universidad Pontificia Bolivariana para el proyecto “Desarrollo de un Banco de Ensayos para Refrigeración Doméstica en la Empresa Industrias

Tabla 1. Nomenclatura

AU	conductancia global de transferencia de calor, W/K
AU_{cs}	conductancia global de transferencia de calor cs, W/K
AU_{cg}	conductancia global de transferencia de calor cg, W/K
W_{Rcs}	trabajo realizado por la resistencia del Cs, W
W_{Rcg}	trabajo realizado por la resistencia del Cg, W
W_v	trabajo realizado por el motor del ventilador, W
W	potencia, W
T_a	temperatura ambiente, °C
T_{cs}	temperatura del conservador, °C
T_{cg}	temperatura del congelador, °C
ρ	densidad del aire, kg/m^3
ν	volumen específico, m^3/kg
Q_e	calor en el evaporador, W
H	energía, J
m_a	masa de aire seco, kg
h_a	entalpía del vapor de aire kJ/kg
m_v	masa del vapor de aire, kg
h_v	entalpía del vapor de aire kJ/kg
ρ_a	densidad del aire, kg/m^3
w	humedad específica, $kgH_2O/kgAire$
p_a	presión de aire, kpa
p_g	presión de saturación, kpa
ϕ	humedad relativa, %
C_p	calor específico, kJ/kgK
cs	conservador
cg	congelador

Haceb S.A.". Esto hace necesario la implementación de una infraestructura de control para los bancos de ensayo de carga de refrigerante, calibración de la válvula y túnel de viento. Cada uno de los bancos contará con dispositivos de medición y control que ayudará a mejorar el tiempo de las pruebas de consumo energético.

Los beneficios asociados a este trabajo de grado se verán reflejados en los resultados del proyecto "Desarrollo de un Banco de Ensayos para Refrigeración Doméstica en la Empresa Industrias Haceb S.A.", los cuales estarán enfocados en la posibilidad de contar con dos bancos de ensayos totalmente automatizados en los que sea posible la evaluación de cada componente de los sistemas de refrigeración de una manera efectiva y científicamente adecuada.

2. INGENIERÍA CONCEPTUAL-DISEÑO DE LA INFRAESTRUCTURA DE CONTROL

El Grupo de Energía y Termodinámica (GET) en conjunto con el Grupo de Automática y Diseño (A+D) de la Universidad Pontificia Bolivariana, ejecutaron el proyecto "Desarrollo de un Banco de Ensayos para Refrigeración Doméstica en la Empresa Industrias Haceb S.A.". Este proyecto tenía como objetivo optimizar los procesos en los sistemas de refrigeración doméstica y para tal propósito requirió la implementación de la infraestructura de control en los bancos de prueba de carga de refrigerante, caracterización de la válvula y túnel de viento, que ayudaran a disminuir el consumo energético, mejorando los tiempos de ejecución durante las pruebas.

Partiendo de los requerimientos del proyecto "Desarrollo de un Banco de Ensayos para Refrigeración Doméstica en la Empresa Industrias Haceb S.A.", se realizó el diseño y montaje las infraestructuras de control en los bancos de prueba de carga de refrigerante, calibración de la válvula y túnel de viento. Para este fin, se seleccionaron los equipos apropiados en los procesos de refrigeración de cada banco y se seleccionaron los equipos necesarios para el desarrollo las infraestructuras de control. Los equipos de refrigeración fueron elegidos para que cumplieran con las características de presión, humedad y temperatura especificadas en el proyecto de Industrias Haceb S.A. La selección de la instrumentación de la infraestructura de control se hizo de la mano con la selección de los equipos de refrigeración para que se diera cumplimiento a las especificaciones técnicas correspondientes a rangos de corriente, voltaje y potencia, evitando así que se generaran inconvenientes de sobredimensionamiento e incompatibilidad de los equipos.

2.1. *Diseño de la infraestructura del Banco de Carga de Refrigerante*

Este dispositivo está diseñado para controlar la carga y descarga de refrigerante en los procesos de refrigeración durante las pruebas de consumo energético. Cuenta con una celda de carga, un tanque de refrigerante, dos válvulas solenoide, dos válvulas de bola, un compresor, un evaporador, un condensador, un tubo capilar, 16 termopares tipo T y dos resistencias térmicas como dispositivos de refrigeración. La celda de carga tiene la tarea de realizar la medición de la cantidad de refrigerante que se encuentra en el tanque, y así el controlador tomará la decisión de la cantidad de refrigerante que debe ser

restringido por la válvula solenoide hacia evaporador en cada prueba.

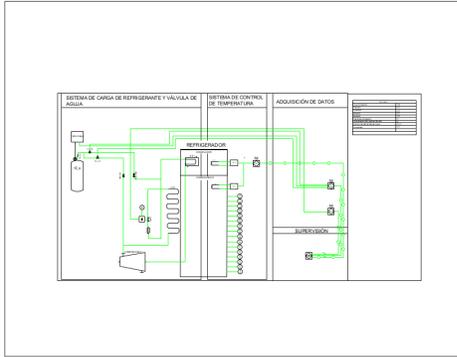


Figura 1. Dispositivo de carga de refrigerante

2.2. Diseño de la infraestructura Banco Túnel de Viento

Este dispositivo está diseñado para seleccionar adecuadamente el ventilador que se adapte a una nevera específica, buscando el menor consumo de energía, los requerimientos de flujo y velocidad de aire que no genere ruido en su funcionamiento. En el diagrama de bloques del banco Túnel de Viento Fig. 2,

se puede observar la disposición final de los dispositivos de refrigeración, las características técnicas de cada dispositivo y la infraestructura del sistema de control diseñado. Las señales de temperatura, presión absoluta y diferencial que requieren monitoreo, son enviadas a la tarjeta interfaz o de acoplamiento de señal, para luego ser llevadas a la tarjeta de desarrollo Leonardo de Arduino.

2.3. Diseño de la infraestructura Banco de Caracterización de la Válvula

Este dispositivo tiene como objetivo encontrar la mejor configuración de motor-válvula respecto a la longitud del tubo capilar, para luego ser acoplada al banco de carga de refrigerante. Este banco está conformado por un regulador electrónico de presión, dos transmisores de presión, un transmisor de flujo y un tanque de Nitrógeno. Por medio del motor paso a paso se realiza la respectiva apertura de la válvula que es relacionada con cierta longitud de tubo capilar requerida para las pruebas. La relación de apertura válvula y longitud del tubo capilar es verificada por medio de tablas.

En el diagrama de bloques del banco de caracterización de la válvula Fig. 3, se observa la disposición final de los dispositivos de refrigeración, las descripciones técnicas de voltaje y corriente para cada uno de ellos y se verifican las señales enviadas al sistema de adquisición de datos.

de Eagle®, software de diseño tarjetas PCB. Esta tarjeta es acoplada a una tarjeta de desarrollo Leonardo de Arduino, en la que se realiza la lectura y escritura de señales de control y las comunicaciones con LabVIEW® en PC.

Del banco de calibración se tomaron siete señales provenientes del regulador electrónico: ABZ, PRESS, SETPT, VCOM, VTEST, PNR IN, SIG COM. Dos del motor paso a paso provenientes de las bobinas que debieron ser llevadas a un puente H para su acondicionamiento y dos señales de 4-20 mA para los transmisores de presión y otra para el transmisor de caudal.

Del banco túnel de viento se extrajeron 3 señales de 4-20 mA, dos para los transmisores de presión y la última para el transmisor de flujo. El motor del ventilador extractor requería una fuente de alimentación de 12 V_{DC}, un control de velocidad de 0 a 10 V_{DC} por PWM, una señal para medir la velocidad angular, y GND. Para el motor de 110 V_{AC} se usó una señal controlada por un micro relé.

3. INGENIERÍA DE DETALLE Y PUESTA A PUNTO

3.1. Desarrollo del hardware, firmware y software para el sistema de adquisición de datos

Después del diseño y desarrollo de la tarjeta interfaz se procedió a ejecutar la etapa de desarrollo del firmware y el software de adquisición de datos. Este último se implementó en el entorno de programación de Arduino (IDE) Fig. 6, en el cual fueron creadas un listado de tareas de lectura y escritura que debían ser ejecutadas de manera simultánea sin interferir en

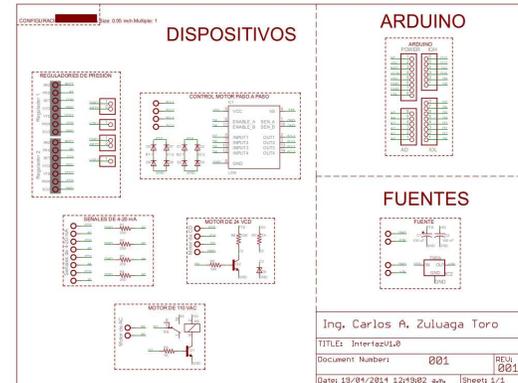


Figura 4. Diseño de la tarjeta interfaz

las demás tareas. Para el procesamiento de datos se desarrolló una máquina de estados basada en dos funciones principales, envía y recibe Fig. 8 en la plataforma de LabVIEW y para el monitoreo de las variables fue creada una interfaz gráfica Fig. 7 de la misma plataforma.

INGENIERÍA DE DETALLE



Figura 1

Figura 5. Etapas de implementación de la infraestructura de control

```

FirmwareTarjetaInterfazV1_0

/**** DEFINICION DE PINES *****/
/**** ENTRADAS DIGITALES ****/
const byte p_nc1=0; //Pin no conectado
const byte p_nc2=1; //Pin no conectado
const byte p_tac=3; //Pin del tacometro
const byte p_nc3=12; //Pin no conectado
/**** SALIDAS DIGITALES ****/
const byte p_mac=2; //Pin del motor de AC
const byte p_en4=4; //Pin 4 de control del motor paso a paso
const byte p_en3=5; //Pin 5 de control del motor paso a paso
const byte p_en2=6; //Pin 2 de control del motor paso a paso
const byte p_en1=7; //Pin 1 de control del motor paso a paso
const byte p_hmp=8; //Pin de habilitacion del motor paso a paso
const byte p_m24=9; //Pin de control de velocidad motor 24Vdc (PW
const byte p_srB=10; //Pin de control de setpoint de regulador de
const byte p_srA=11; //Pin de control de setpoint de regulador de
const byte p_lee=13; //Pin led de estado
/**** ENTRADAS ANALÓGICAS ****/
  
```

Figura 6. Entorno de desarrollo de Arduino



Figura 7. Interfaz gráfica del Túnel de Viento

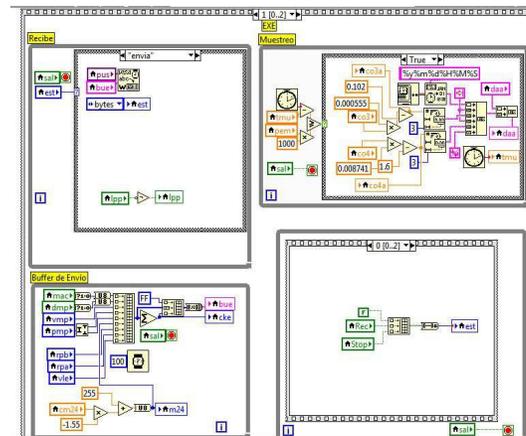


Figura 8. Adquisición de datos en la plataforma de LabVIEW

3.2. Diagrama de conexiones del Banco de Carga de Refrigerante

El diagrama de conexiones del banco de carga de refrigerante se encuentra desarrollado en la plataforma de Eagle® que se observa en la Fig. 9, este esquemático fue realizado para que cumpla la misma funcionalidad de un plano de conexiones. En la Fig. 10 se observa el tablero de conexiones con la disposición final de los dispositivos de medición.

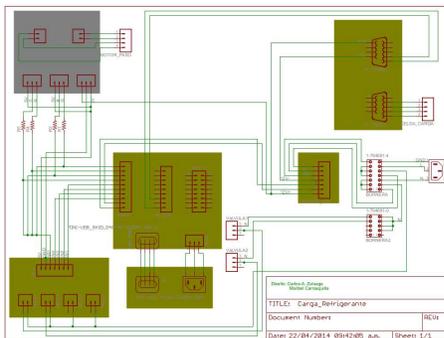


Figura 9. Conexiones Carga de Refrigerante



Figura 10. Tablero de conexiones Banco de Carga de Refrigerante

3.3. Diagrama de conexiones Banco Caracterización de la Válvula

Fue desarrollado el diagrama de conexiones del banco de Caracterización de la Válvula como se muestra en la Fig. 12 y se observa la disposición final de los dispositivos en el Laboratorio de Refrigeración Fig. 11.



Figura 11. Banco de Caracterización de la Válvula

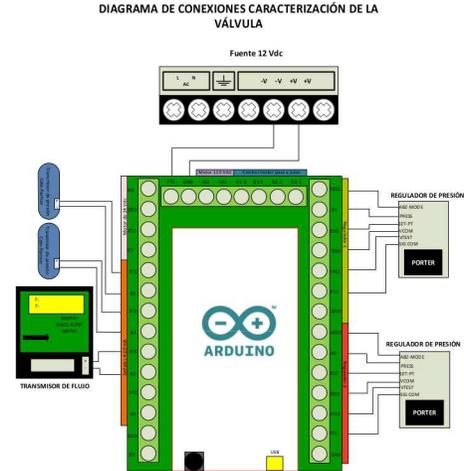


Figura 12. Conexión Caracterización de la válvula

3.4. Diagrama de conexiones Banco Túnel de Viento



Figura 13. Banco de Túnel de Viento

El sistema de monitoreo del Banco de Túnel de Viento, se encuentra diseñado para entregar los datos obtenidos durante las pruebas de presión diferencial y absoluta del sistema. Para este banco fue diseñada una tarjeta de acoplamiento de señal Fig. 14, que se encuentra acoplada a una tarjeta de adquisición de datos Leonardo de Arduino Fig. 15. El diagrama de conexiones del Túnel de Viento se muestran en la Fig. 16 y el tablero de conexiones con la disposición final de la instrumentación Fig. 17

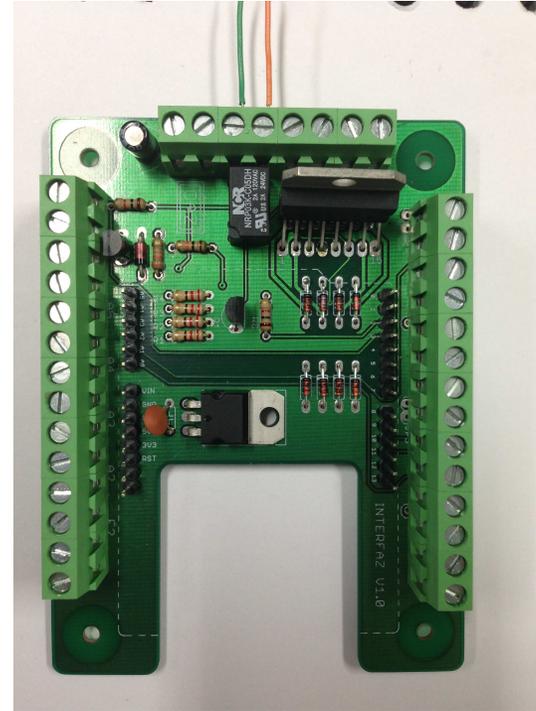


Figura 14. Tarjeta de acoplamiento de señal

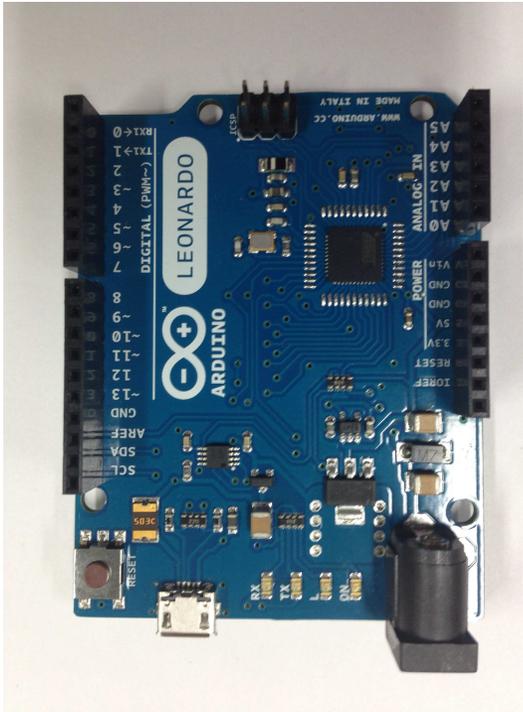


Figura 15. Tarjeta Leonardo de Arduino

DIAGRAMA DE CONEXIONES TÚNEL DE VIENTO

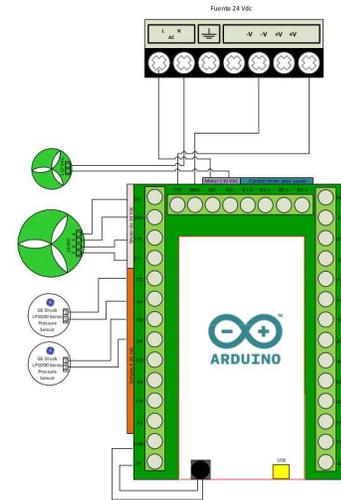


Figura 16. Diagrama de conexión del Túnel de viento

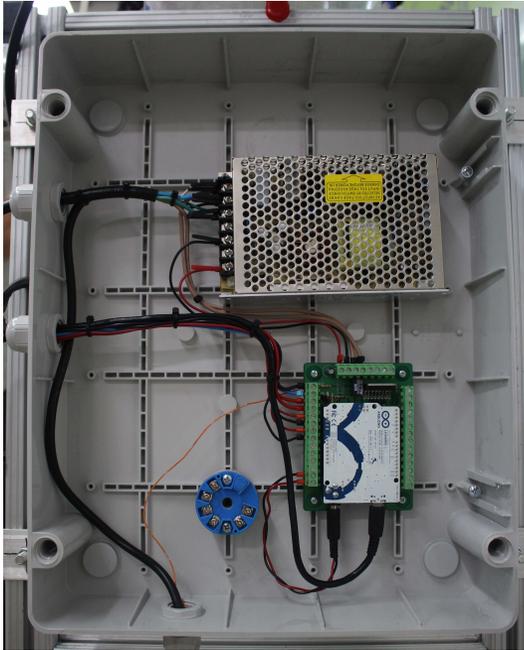


Figura 17. Tablero de Conexión Túnel de Viento

4. RESULTADOS OBTENIDOS

En la etapa final del proyecto se hace entrega de la instalación de la infraestructura de control de cada banco Fig. 18, se realizan las pruebas de comunicación correspondientes, así como la instalación del software de la *National Instruments*® y Arduino en los computadores del proyecto para que se haga más fácil el acceso al sistema de monitoreo de los bancos.

Teniendo en cuenta las tareas de mantenimiento preventivo y correctivo que puedan requerir los bancos de pruebas, se dispone de memorias de los diseños de las infraestructuras de control, diagramas de conexiones y hojas de datos de la instrumentación existente y se realiza la capacitación a los encargados de las pruebas de consumo energético sobre el manejo del sistema de encendido y apagado de las infraestructuras de control.

El balance de energía realizado al sistema de refrigeración doméstica, proporcionó un modelo matemático del sistema que podrá se usado para implementar estrategias de control en el banco de carga de refrigerante.



Figura 18. Bancos de pruebas disposición final

5. CONCLUSIONES

El desarrollo de nuevas tecnologías, la disminución del consumo energético, la optimización en los procesos de refrigeración y el uso de refrigerantes naturales, son algunos de los resultados de la fase de sensibilización de las empresas productoras de frío frente al medio ambiente. Estos resultados las ha llevado a impulsar proyectos de investigación que involucran al sector educativo como gestor del conocimiento y generador del trabajo en equipo, con el fin de desarrollar y promover el uso de nuevas tecnologías amigables con el medio. La fusión empresa universidad más que fortalecer la industria, crea conciencia e inclusión social en la resolución de problemas con un alto impacto tecnológico, académico y medio ambiental. Es de esta manera como los resultados obtenidos en este trabajo investigativo son de gran ayuda para lograr los alcances del proyecto “Desarrollo de un Banco de Ensayos para Refrigeración Doméstica en la Empresa Industrias Haceb S.A.” que estuvieron enfocados en la reducción del consumo energético de los sistemas de refrigeración doméstica, basados en encontrar la mejor configuración en los dispositivos de carga de refrigerante y túnel de viento.

Los resultados obtenidos no solo son una plataforma para el estudio de las variables asociadas a los procesos de refrigeración, la disminución del consumo energético y la optimización de los tiempos durante estas pruebas, sino que también permitirán la creación de nuevos dispositivos que mejorarán la calidad de los refrigeradores domésticos, dándole a esta industria un plus de innovación asociado a la responsabilidad social empresarial que se preocupa por crear productos con un bajo impacto ambiental posibilitando un mayor crecimiento económico.

El adecuado desarrollo de las etapas de ingeniería conceptual, básica y detallada, en las que se plantearon estrategias de selección y dimensionamiento de los dispositivos utilizados, permitieron que la implementación de la infraestructura de control en los bancos de carga de refrigerante, calibración de la válvula y túnel de viento fuera exitosa, de tal forma que la transmisión y recepción de datos funcionara correctamente sin que existieran retrasos en las comunicaciones.

La integración de dispositivos de adquisición de datos que cuentan con una mayor robustez, como lo es el CompactDAQ de la *National Instruments*®, ayudan en la etapa de acondicionamiento y procesamiento de señal, creando un ambiente de seguridad durante el período de transmisión y recepción de datos. Siendo ésta una de las maneras de disminuir los tiempos en el montaje y prueba de las infraestructuras de control.

El uso de Arduino como una de las herramienta de procesamiento y adquisición de datos facilitó el proceso de ingeniería de detalle, gracias a que cuenta con una amplia gama de tarjetas creadas para dar solución a las diferentes necesidades de los usuarios, esta característica asociada a que este microcontrolador no requiere de una tarjeta de programación y que cuenta con una plataforma de código y hardware abierto de fácil acceso, así como una plataforma de desarrollo con funciones ya preestablecidas ayudando a reducir la lógica de programación de las entradas y salidas hizo que el proceso de desarrollo del firmware fuera más rápido. En conclusión, fue adquirida una tarjeta de bajo costo, fácil programación y robustez en el ensamblaje, que dio solución a los requerimientos del proyecto.

El tener clara las necesidades y los alcances del proyecto permitió ejecutar la etapa de selección de la instrumentación con la total certeza de que esa selección sería la apropiada para soportar los rangos de las variables incluidas en los procesos de refrigeración y que no se generarían inconvenientes al realizar el acoplamiento de los dispositivos durante la etapa de instalación y puesta a punto. Esto también permitió que no se violaran los topes económicos asociados al proyecto, puesto que un cambio en alguno de los dispositivos escogidos podía incurrir en un gasto extra, afectando la dinámica del proyecto. Finalmente se puede decir que la ejecución por etapas del proyecto fue la más apropiada, trayendo consigo beneficios asociados con los costos y la eficiencia de los bancos de pruebas desarrollados.

Gracias al desarrollo de la interfaz hombre máquina se crea un lenguaje de interacción entre el operario y el proceso y se responde a la necesidad de tener un control más preciso de las variables en tiempo real, esto se logra utilizando la plataforma de LabVIEW® como un software abierto que permite incrementar el crecimiento de la interfaz en la misma medida en que crecen las necesidades del proyecto.

REFERENCIAS

- [1] X. I. Stavro, "Implementación del protocolo de montreal en colombia," *Produccion mas limpia*, vol. 1, no. 2, p. 15, june 2007.

AUTOR



Maribel CARRASQUILLA, Ingeniera Electrónica (2012), Especialista en Automática(2014), actualmente estudiante de Maestría en Ingeniería en el área de Automática y se desempeña como auxiliar de investigación del Grupo de Automática y Diseño de la Universidad Pontificia Bolivariana