

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

**MARIBEL CARRASQUILLA SUÁREZ**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
ESCUELA DE INGENIERÍAS  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA  
MEDELLÍN  
2014**

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

**MARIBEL CARRASQUILLA SUÁREZ**

**Trabajo de grado para optar al título de Magíster en Ingeniería**

**Director  
Carlos Alejandro Zulaga Toro  
Magíster en Ingeniería**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
ESCUELA DE INGENIERÍAS  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA  
MEDELLÍN  
2014**

Nota de aceptación

---

---

---

---

---

Firma  
Nombre:  
Presidente del jurado

---

Firma  
Nombre:  
Jurado

---

Firma  
Nombre:  
Jurado

Medellín, Diciembre 5 de 2014

Dedicación, respeto, humildad, don de gente, honestidad, lealtad, perseverancia y responsabilidad son algunos de los valores que mis padres y hermanas me han enseñado en el transcurso de la vida y a quién más dedicarle este trabajo de grado sino es a mi hermosa familia, que siempre me ha apoyado y se ha esforzado por hacer de mí una gran mujer.

## **AGRADECIMIENTOS**

Me encuentro agradecida con la vida y con Dios por darme esta oportunidad de crecer intelectualmente, muy agradecida con mi gran amigo y director de trabajo de grado Carlos Alejandro Zuluaga, por su apoyo incondicional, por compartir todos sus conocimientos con el mayor de los gustos, por creer siempre en mis capacidades y que merezco todas las cosas buenas que me pasan, también le agradezco al coordinador del proyecto Cesar Alejandro Isaza por esta oportunidad y por la paciencia durante el tiempo de ejecución de este maravilloso proyecto y finalmente pero no menos importante le agradezco a todos las personas que hacen parte del grupo de Automática y Diseño de la Universidad Pontificia Bolivariana por abrirme las puertas mientras trabajaba en la culminación de mi tesis.

## CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN . . . . .	18
1. CAPÍTULO I: SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN Y BALANCE DE ENERGÍA PARA REFRIGERADORES DOMÉSTICOS . . . . .	21
1.1. Definición de los sistemas de refrigeración . . . . .	21
1.2. Dispositivos de los sistemas de refrigeración . . . . .	21
1.3. Balance de Energía para un refrigerador doméstico marca Haceb . . . . .	22
1.4. Obtención de parámetros para la simulación . . . . .	24
1.5. Medición de áreas y volúmenes del refrigerador . . . . .	25
1.6. Modelo del refrigerador . . . . .	26
1.6.1. Resultados del Modelo del Refrigerador . . . . .	30
1.7. Gráfica de propiedades termodinámicas . . . . .	32
1.8. Potencia de la resistencias del refrigerador . . . . .	39
2. CAPÍTULO II: INGENIERÍA CONCEPTUAL-DISEÑO DE LA INFRAESTRUCTURA DE CONTROL . . . . .	41
2.1. Descripción de los requerimientos del proyecto . . . . .	41
2.2. Diseño de la infraestructura del Banco de Carga de Refrigerante . . . . .	42
2.3. Diseño de la infraestructura del Banco Túnel de Viento . . . . .	45

2.4.	Diseño de la infraestructura Banco de Caracterización de la Válvula . . .	45
2.5.	Diseño de la tarjeta Interfaz . . . . .	48
3.	CAPÍTULO III: INGENIERÍA BÁSICA-SELECCIÓN DE LA INSTRUMENTACIÓN PARA LOS BANCOS DE PRUEBA . . . . .	50
3.1.	Instrumentación Banco de Carga de Refrigerante . . . . .	51
3.1.1.	Celda de carga . . . . .	51
3.1.2.	Tanque de carga de refrigerante . . . . .	52
3.1.3.	Válvula solenoide . . . . .	52
3.1.4.	Resistencias . . . . .	53
3.1.5.	Motor paso a paso . . . . .	53
3.1.6.	<i>Driver</i> puente H y módulo de Relés . . . . .	54
3.1.7.	Fuente conmutada de 12 $V_{DC}$ y alimentación de 110 $V_{AC}$ . . . . .	55
3.1.8.	Módulos de la <i>National Instrument</i> ® . . . . .	55
3.2.	Instrumentación Banco de Caracterización de la Válvula . . . . .	59
3.2.1.	Regulador de Presión . . . . .	59
3.2.2.	Transmisor de Presión . . . . .	59
3.2.3.	Flujómetro . . . . .	60
3.3.	Instrumentación Banco Túnel de Viento . . . . .	61
3.3.1.	Sensor de presión . . . . .	61
3.3.2.	Ventiladores de AC Y DC . . . . .	62
4.	CAPÍTULO IV: INGENIERÍA DE DETALLE Y PUESTA A PUNTO . .	63

4.1.	Desarrollo del hardware, firmware y software para el sistema de adquisición de datos . . . . .	63
4.1.1.	Diagrama de conexiones del Banco de Carga de Refrigerante . . . . .	65
4.1.2.	Diagrama de conexiones Banco Caracterización de la Válvula . . . . .	66
4.1.3.	Diagrama de conexiones Banco Túnel de Viento . . . . .	67
4.1.4.	Disposición final de los bancos de pruebas . . . . .	71
5.	Resultados obtenidos . . . . .	72
	CONCLUSIONES . . . . .	73
	BIBLIOGRAFÍA . . . . .	74
6.	ARTÍCULO PUBLICABLE . . . . .	77
7.	ANTEPROYECTO . . . . .	93



## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
1 Diagrama para el balance de energía del refrigerador . . . . .	24
2 Diagrama en Simulink® del modelo del refrigerador . . . . .	27
3 Diagrama Presión de Saturación y Calor Específico . . . . .	28
4 Diagrama para la densidad y la tranferencia de calor . . . . .	29
5 Respuesta de la temperatura del conservador y congelador con las resisten- cias apagadas . . . . .	30
6 Respuesta de la temperatura del conservador y congelador con las resisten- cias encendidas . . . . .	31
7 Respuesta de la temperatura del conservador y congelador con las resisten- cias encendidas . . . . .	32
8 Gráfica de Presión de saturación Vs Temperatura de Saturación de Vapor .	34
9 Gráfica de la Humedad Específica Vs la temperatura de Saturación de Vapor	35
10 Gráfica del Calor Específico del aire Vs temperatura ambiente . . . . .	35
11 Gráfica del Calor Específico del Vapor Vs temperatura ambiente. . . . .	36
12 Gráfica de la respuesta del calor específico total Vs temperatura, presión atmosférica y humedad relativa . . . . .	36
13 Gráfica de la respuesta de la Densidad del aire Vs Humedad relativa y Tem- peratura ambiente, Presión atmosférica . . . . .	37

14	Superficie gráfica de la Densidad del aire seco Vs Humedad relativa, Temperatura ambiente . . . . .	37
15	Superficie gráfica del Calor Específico Vs Humedad relativa, Temperatura ambiente . . . . .	38
16	Superficie gráfica del Calor Específico Vs Presión atmosférica, Temperatura ambiente . . . . .	38
17	Superficie gráfica del Calor Específico Vs Presión atmosférica, Humedad Relativa . . . . .	39
18	Superficie superpuestas Densidad de aire seco y Calor Específico . . . . .	39
19	Superficie de potencia de las resistencias del refrigerador . . . . .	40
20	Diagrama de instrumentación y procesos . . . . .	43
21	Diagrama de bloques Carga de Refrigerante . . . . .	44
22	Diagrama de bloques Túnel de Viento . . . . .	46
23	Diagrama de bloques Caracterización de la Válvula . . . . .	47
24	Esquemático de la trajeta interfaz . . . . .	49
25	Celda de carga 2.2 lbf . . . . .	51
26	Tanque de carga de refrigerante . . . . .	52
27	Válvula Solenoide Danffos . . . . .	53
28	Motor Paso a Paso . . . . .	54
29	<i>Driver</i> Puente H . . . . .	54
30	Relés de estado solido . . . . .	55
31	Fuente conmutada 12 $V_{DC}$ y alimentación de 110 $V_{AC}$ . . . . .	55
32	Módulo NI 9472 . . . . .	56

33	Módulo NI 9203 . . . . .	56
34	Módulo NI 9213 . . . . .	57
35	Módulo NI 9174 . . . . .	57
36	Configuración de Módulos NI . . . . .	58
37	Regulador de presión . . . . .	59
38	Transmisor de presión . . . . .	60
39	Flujómetro . . . . .	60
40	Sensor de presión Diferencial . . . . .	61
41	Ventilador de entrada de 110 $V_{AC}$ . . . . .	62
42	Ventilador de salida de 24 $V_{DC}$ . . . . .	62
43	Etapas de implementación de la infraestructura de control . . . . .	64
44	Entorno de desarrollo de Arduino . . . . .	64
45	Interfaz gráfica del Túnel de Viento . . . . .	65
46	Adquisición de datos en la plataforma de LabVIEW® . . . . .	65
47	Diagrama de conexiones Banco Carga de Refrigerante . . . . .	66
48	Tablero de conexiones Banco de Carga de Refrigerante . . . . .	66
49	Diagrama de conexiones Banco de Caracterización de la válvula . . . . .	67
50	Banco de Caracterización de la Válvula . . . . .	67
51	Banco de Túnel de Viento y Tablero de Conexión . . . . .	68
52	Diagrama de conexiones Banco del Túnel de viento . . . . .	69
53	Tarjeta Leonardo de Arduino y Tarjeta de acoplamiento de señal . . . . .	69

54 Bancos de pruebas disposición final . . . . . 71

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
1 Nomenclatura . . . . .	20
2 Áreas del refrigerador . . . . .	25
3 Entradas y salidas del sistema de refrigeración . . . . .	27

## GLOSARIO

**ARDUINO:** arduino es una plataforma de prototipado electrónico con código fuente abierto, basado en un software y hardware flexible, fácil de usar. Está destinado a artistas, diseñadores, aficionados y cualquier persona interesada en la creación de objetos o entornos interactivos [1].

**CARGA 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. Las celdas de carga tienen la tarea de realizar la medición de la cantidad de refrigerante que se encuentra en el tanque, y el controlador deberá tomar la decisión de la cantidad de refrigerante que debe ser restringido por la válvula solenoide hacia evaporador en cada prueba.

**CARACTERIZACIÓN DE LA VÁLVULA:** este dispositivo está conformado por un motor paso a paso, una válvula solenoide, dos reguladores de presión, dos transmisores electrónicos de presión y un flujómetro. Tiene como objetivo encontrar la mejor configuración de motor-válvula respecto a la longitud del tubo capilar. Por medio del motor paso a paso se realiza la apertura de la válvula respectiva, a cierta longitud de tubo capilar requerida para las pruebas. Esta relación apertura válvula y longitud del tubo capilar está dada por medio de tablas.

**CELDA DE CARGA:** son sensores de fuerza, utilizados en equipos de pesaje industrial. Están compuestas de cuatro sensores conectados en configuración de puente de *Wheatstone*. Esta configuración permite obtener un voltaje proporcional a la deformación que sufren los sensores producto de la fuerza aplicada a ellos [2].

**COMPRESOR:** dispositivo empleado para comprimir aire u otro tipo de gases en un sistema de refrigeración, extrae el refrigerante vaporizado del evaporador a una presión

relativamente baja y lo comprime, para descargarlo en el condensador [3].

**COP:** *Coefficient Of Performance*, sigla del Inglés. Es la relación entre la energía útil o calor suministrado por la bomba de calor y la energía consumida para hacer funcionar el compresor [4].

**DAQ:** *Data Acquisition*, sigla del inglés. Es el proceso de medición de un fenómeno eléctrico o físico, como tensión, corriente, temperatura, presión, o el sonido. Permite digitalizar, procesar y almacenar variables eléctricas [5].

**EVAPORADOR:** se utiliza para transformar refrigerante de estado líquido a gaseoso. Es en este punto que el enfriamiento se lleva a cabo en forma de calor retirado del aire. [6]

**HARDWARE:** conjunto de los componentes que integran la parte material de un sistema [7].

**LABVIEW:** *Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench*, sigla del inglés. Es una plataforma de desarrollo de *Software* propiedad de *National Instruments* basada en un lenguaje de programación gráfico, conocido como Lenguaje G. Aunque pretende ser de propósito general, la plataforma *LabVIEW*® es utilizada principalmente para adquisición de datos, control de instrumentación y automatización, tanto a nivel académico y de investigación como industrial [8].

**MOTOR PASO A PASO:** es un actuador o transductor electromagnético incremental que convierte pulsos eléctricos en desplazamientos angulares de un eje. Este motor es en sí mismo un conversor digital-analógico ya que convierte una señal eléctrica digital en un desplazamiento angular del rotor [9].

**POLO:** el laboratorio de Investigación en Refrigeración y Termofísicas POLO fue fundado en 1986 por profesores en el área de Ciencias Térmicas del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Federal de Santa Catarina. El equipo del POLO es reconocido internacionalmente por en el campo de la investigación en compresores y en refrigeración. El POLO posee una sociedad ininterrumpida de más de 25 años con la EMBRACO Compresores, una empresa líder en el área de compresores para la refrigeración domestica y comercial de pequeño porte. Además, se ha establecido otras asociaciones con grandes compañías, tales como Whirlpool, Bosch, Electrolux, Metalfrio, Embraer, WEG y Petrobrás [10].

**REFRIGERANTES:** son conocidos como los fluidos de absorción de calor durante la evaporación. Proporcionan un efecto de enfriamiento durante el cambio de fase de líquido a vapor y se utilizan comúnmente en los sistemas refrigeración, aire acondicionado y sistemas de bombas de calor [11].

**SENSOR DE PRESIÓN:** los sensores de presión o transductores de presión son elementos que transforman la magnitud física de presión o fuerza por unidad de superficie en otra magnitud, en este caso eléctrica que es la empleada en los equipos de automatización o adquisición estándar. Los rangos de medida son muy amplios, desde unas milésimas de bar hasta los miles de bar [12].

**TERMOPAR:** un termopar consta de dos conductores eléctricos de diferentes materiales conectados entre sí en un extremo el denominado “punto de medida”. Los dos extremos libres están conectados a un instrumento de medida, por una unión de referencia llamada “unión en frío” [11].

**TRANSMISOR DE PRESIÓN:** los transmisores de presión son utilizados principalmente para el control de sistemas de presión, control de presiones en calderas y en sistemas de regulación y control[13].

**TUBO CAPILAR:** los tubos capilares son dispositivos de expansión en sistemas de refrigeración pequeños, consisten de una tubería de longitud fija, de diámetro pequeño, instalada entre el condensador y el evaporador de un circuito frigorífico [14].

**TÚNEL DE VIENTO:** este dispositivo esta 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.

**SOFTWARE:** conjunto de programas, instrucciones y reglas informáticas para ejecutar ciertas tareas en una computadora [7].

**VÁLVULA SOLENOIDE:** consiste en un dispositivo operado eléctricamente utilizado para el control de flujo de líquidos o gases en posición completamente abierta o completamente cerrada. Su función básica es la misma que una válvula de paso operada manualmente pero, siendo accionada eléctricamente [15].



## **RESUMEN**

En este trabajo de grado 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, el hardware y el firmware para cada uno de los bancos de pruebas con el fin de realizar las tareas de monitoreo durante las pruebas de eficiencia.

### **PALABRAS CLAVE:**

Carga refrigerante; Refrigeración doméstica; Tubo capilar; Túnel de viento; Consumo de energía.

## 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[16].

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 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.

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
$W_{Reg}$	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
$\rho$	densidad del aire, $kg/m^3$
$\nu$	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 $kJ/kg$
$\rho_a$	densidad del aire, $kg/m^3$
$w$	humedad específica, $kgH_2O/kgAire$
$p_a$	presión de aire, kpa
$p_g$	presión de saturación, kpa
$\phi$	humedada relativa, %
$C_p$	calor específico, $kJ/kgK$
$cs$	conservador
$cg$	congelador

---

# 1. CAPÍTULO I: SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN Y BALANCE DE ENERGÍA PARA REFRIGERADORES DOMÉSTICOS

## 1.1. DEFINICIÓN DE LOS SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN

Los sistemas de refrigeración corresponden a arreglos mecánicos que utilizan propiedades termodinámicas de la materia, para trasladar energía térmica en forma de calor entre dos o más focos. El proceso inicia cuando el fluido refrigerante que se encuentra a alta temperatura, entra en el compresor en forma de vapor y se comprime hasta la presión del condensador, en donde se enfría para emitir el calor a un medio de alta temperatura (TH) [11]. El ciclo continua dando paso al refrigerante a la válvula de expansión en forma líquida, en donde se expande con un diferencial de presión y temperatura, convirtiéndose en una mezcla de vapor y líquido que va directo a la entrada del evaporador, allí se absorbe calor, de un medio que se encuentra a baja temperatura (TL) a medida que fluye por éste. El ciclo se completa cuando el refrigerante sale del evaporador en forma de vapor y entra en el compresor [11]. Este proceso de refrigeración es utilizado por la industria de refrigeradores domésticos, en busca de que la producción de frío sea aprovechada para la conservación de alimentos perecederos.

## 1.2. DISPOSITIVOS DE LOS SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN

La sistemas de refrigeración doméstica constan de cuatro dispositivos esenciales en el proceso de producción de frío, estos son:

- Evaporador: en éste se realiza una transferencia de calor, la cual pasa de la región fría al refrigerante, que experimenta un cambio de fase a temperatura constante. Para que la transferencia de calor sea efectiva, la temperatura de saturación del

refrigerante debe ser menor que la temperatura de la región fría.

- Condensador: el refrigerante se condensa al ceder calor a una corriente externa al ciclo. El agua y el aire atmosférico son las sustancias habituales utilizadas para extraer calor del condensador. Para conseguir que se transfiera calor, la temperatura de saturación del refrigerante debe ser mayor que las temperaturas de las corrientes atmosféricas.
- Compresor: es utilizado para alcanzar las condiciones requeridas de temperatura y presión en el condensador, logrando la liberación del calor desde el sistema al ambiente. Para esto es necesario comprimir el refrigerante de manera que se pueda aumentar la presión y en consecuencia la temperatura (generalmente temperaturas de sobrecalentamiento).
- Válvula de expansión: al ser liberado el calor en el condensador es necesario revertir el proceso del compresor, de manera que se puedan obtener bajas temperatura al disminuir la presión, esto lo hace la válvula de estrangulamiento que restringe el flujo del refrigerante logrando las condiciones requeridas en el evaporador[11].

### **1.3. BALANCE DE ENERGÍA PARA UN REFRIGERADOR DOMÉSTICO MARCA HACEB**

Teniendo como referencia las especificaciones del proyecto “Desarrollo de un Banco de Ensayos para Refrigeración Doméstica en la Empresa Industrias Haceb S.A.”, el planteamiento de los objetivos y la metodología de desarrollo, se pretende conocer el consumo de energía teórico en los refrigeradores domésticos. Para alcanzar este fin, fue realizado el balance de energía de un refrigerador marca Haceb, que se encuentra en el laboratorio de refrigeración de la Universidad Pontificia Bolivariana, de el cual se obtuvo un modelo matemático del sistema de refrigeración, para ser llevado al entorno de simulación de Matlab® y de esta manera comprender como se ve afectado por los cambios de temperatura y la incidencia de las variables termodinámicas en el proceso de refrigeración. Gracias a la ejecución de las simulaciones se resuelve el cuestionamiento sobre la no linealidad del modelo matemático y se crea un precedente sobre el comportamiento de estas variables y su importancia al momento de plantear estrategias de control.

Partiendo del diagrama de la Fig. 1, se observa que, el equilibrio de la carga térmica del congelador y conservador está dado por las ecuaciones 1 y 2 respectivamente.

$$\rho\nu\frac{\partial h}{\partial T}(T_{cs})\frac{dT_{cs}}{dt} = UA(T\alpha - T_{cs}) + W_{Rcs} - \rhoqh(T_{cs}) + \rhoqh(T_{cg}) - U_{cs}A(T_{cs} - T_{cg}), \quad (1)$$

$$\rho\nu\frac{\partial h}{\partial T}(T_{cs})\frac{dT_{cg}}{dt} = UA(T\alpha - T_{cs}) + W_{Rcg} + \rhoqh(T_{cs}) - \rhoqh(T_{cg}) + W_v - Q_e + U_{cs}A(T_{cs} - T_{cg}). \quad (2)$$

En la Fig. 1 se observa el diagrama del balance de energía del refrigerador utilizado.

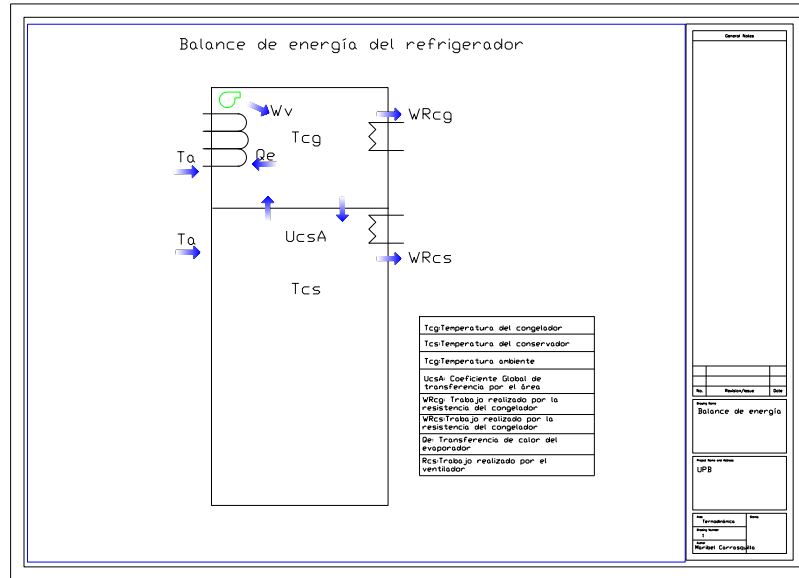


Figura 1. Diagrama para el balance de energía del refrigerador

#### 1.4. OBTENCIÓN DE PARÁMETROS PARA LA SIMULACIÓN

Para realizar el balance de carga térmica del refrigerador, se tuvieron en cuenta los cambios por transferencia de calor, convección y conducción presentes en el proceso de refrigeración. Los elementos existentes en el congelador, como el motor del ventilador, el evaporador y la resistencia de calentamiento, cuentan con un gasto o suministro de energía que se puede observar en el modelo de la Fig. 2. Algunos de estos cambios se ven representados por la conductancia global de transferencia de calor que se encuentra en el interior y exterior del refrigerador, estos coeficientes fueron obtenidos mediante cálculos a partir de un refrigerador marca Haceb. Las áreas de intercambio de éste, se encuentran contenidas por poliuretano rígido que tiene una conductividad de  $0.020 \text{ W/m}^2\text{K}$ , tenida en cuenta en el momento de realizar los cálculos de transferencia de calor. Con las medidas adquiridas de los gabinetes del refrigerador, fueron previstas las áreas exteriores e interiores, así como el volumen necesario para encontrar los parámetros de cálculo.



## 1.5. MEDICIÓN DE ÁREAS Y VOLUMENES DEL REFRIGERADOR

Tabla 2. Áreas del refrigerador

<b>Exterior congelador</b>			
	Longitud m		Área m <sup>2</sup>
Profundo	0.52	Lateral	0.2392
Ancho	0.59	Frente	0.2714
Alto	0.46	Superior	0.3068
<b>Interior congelador</b>			
	Longitud m		Área m <sup>2</sup>
Profundo	0.42	Lateral	0.1596
Ancho	0.52	Frente	0.1976
Alto	0.38	Superior	0.2184
<b>Exterior conservador</b>			
	Longitud m		Área m <sup>2</sup>
Profundo	0.52	Lateral	0.6136
Ancho	0.59	Frente	0.6962
Alto	1.18	Superior	0.3068
<b>Interior conservador</b>			
	Longitud m		Área m <sup>2</sup>
Profundo	0.48	Lateral	0.456
Ancho	0.52	Frente	0.494
Alto	0.95	Superior	0.249

Estos parámetros fueron remplazados en la Eq. 3, que muestra como el inverso de la conductancia es igual la sumatoria de la resistencia total hallada en los gabinetes. Para esto fueron encontradas las resistencias totales en cada tramo por convección, multiplicadas por la entalpía de entrada y salida; la resistencia por conducción es igual la longitud en metros, dividida por la constante de conducción por el área, como se muestra en la ecuación Eq. 6 [17]. En donde:

- $h_{in}$  entalpía de entrada del sistema
- $h_{out}$  entalpía de salida del sistema

- $R_T$  resistencia total de los gabinetes
- $L$  longitud en m
- $k$  constante de conducción
- $A$  área de estudio

$$\frac{1}{UA} = \sum_{i=1}^n R_T, \quad (3)$$

$$\frac{1}{UA} = R_T h_{out} + R_T h_{in}, \quad (4)$$

$$R_T h_{out} = \frac{1}{h_{out} A_{out}}, \quad (5)$$

$$R_T K = \frac{L}{K \bar{A}_T}, \quad (6)$$

$$R_T h_{in} = \frac{1}{h_{in} A_{in}}, \quad (7)$$

Los parámetros encontrados fueron utilizados en la simulación desarrollada en el entorno de Simulink® , con el fin de obtener una respuesta real del proceso de refrigeración.

## 1.6. MODELO DEL REFRIGERADOR

Partiendo de las ecuaciones descritas en 1 y 2 se realiza el diagrama del modelo del sistema de refrigeración, mediante Simulink® de la plataforma de Matlab®, definiéndose las entradas y salidas del sistema Tabla 3. Las variables de temperatura ambiente, presión atmosférica, humedad relativa y la temperatura del evaporador, son definidas como perturbaciones del sistema.

El modelo del refrigerador es implementado en Simulink® Fig. 2, para observar la respuesta del sistema ante cambios en la entrada. En este proceso se encuentran asociadas

Tabla 3. Entradas y salidas del sistema de refrigeración

Entradas	Salidas
Potencia del ventilador- Congelador	Temperatura del conservador
Potencia de la resistencia del Congelador	Temperatura del congelador
Potencia de la resistencia del Conservador	

variables térmicas como, presión de saturación, calor específico, densidad del aire y densidad de vapor. Dentro del modelo de refrigeración se encuentran los diagramas de bloques correspondientes a la presión de saturación y el calor específico Fig. 3, la densidad del aire y cálculo de la transferencia de calor Fig. 4.

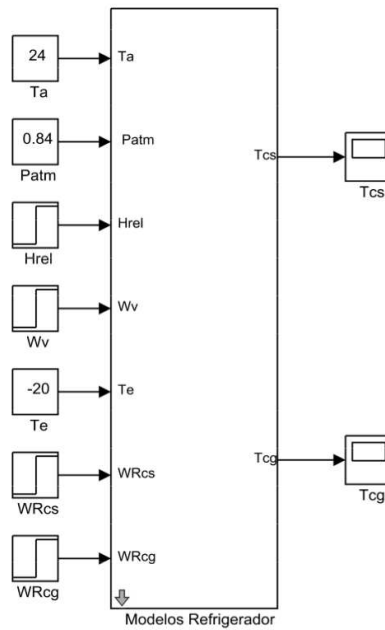
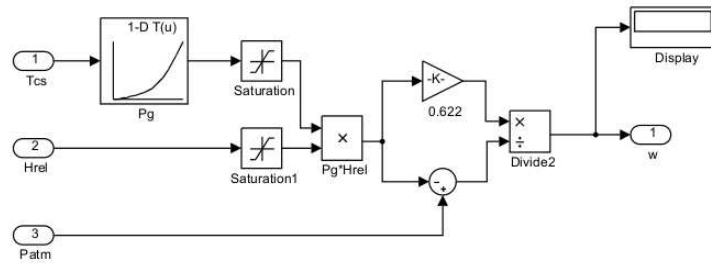


Figura 2. Diagrama en Simulink® del modelo del refrigerador

Módulo para la presión de saturación



Módulo para el calor específico

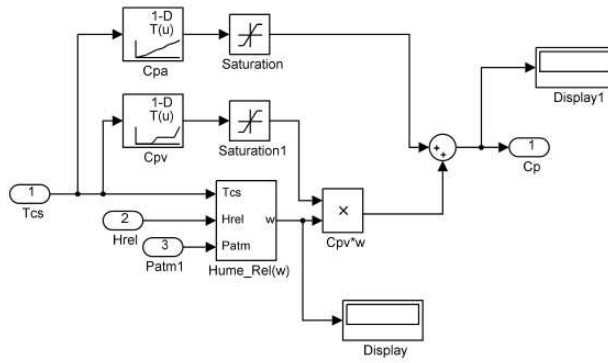
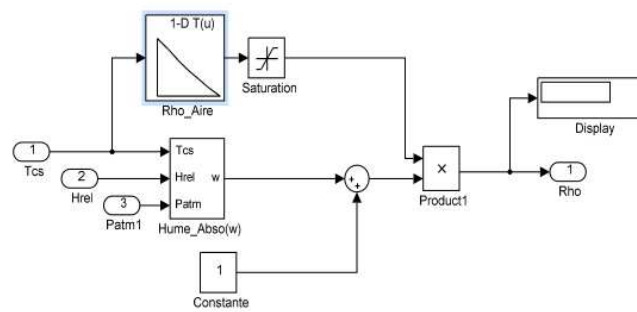


Figura 3. Diagrama Presión de Saturación y Calor Específico

**Modelo para la densidad**



**Modelo para la transferencia de calor**

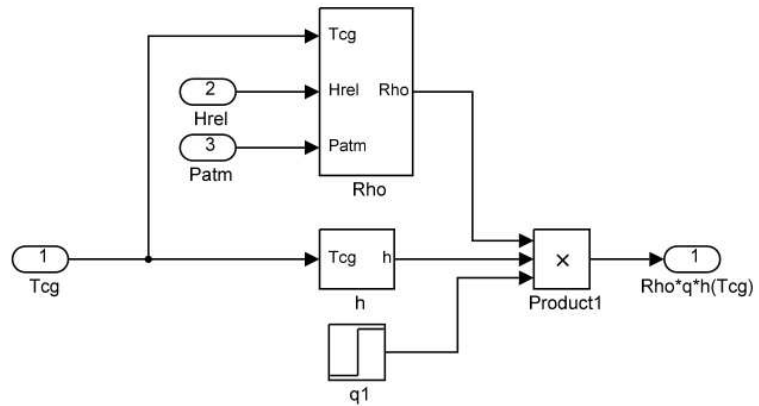


Figura 4. Diagrama para la densidad y la tranferencia de calor

### 1.6.1. Resultados del Modelo del Refrigerador

Las pruebas en modelo del refrigerador fueron realizadas con el fin de verificar los cambios de temperatura con el encendido y apagado de las resistencias. Se seleccionaron valores de temperatura ambiente de 24 °C, la potencia del motor del ventilador de cero y temperatura del evaporador de 22 °C. En la Fig. 5 se observa como se mantienen las temperaturas del conservador y el congelador cuando las resistencias se encuentran apagadas y en la Fig. 6 se observa el aumento de la temperatura cuando las resistencias son encendidas, verificando de esta manera el modelo matemático desarrollado.

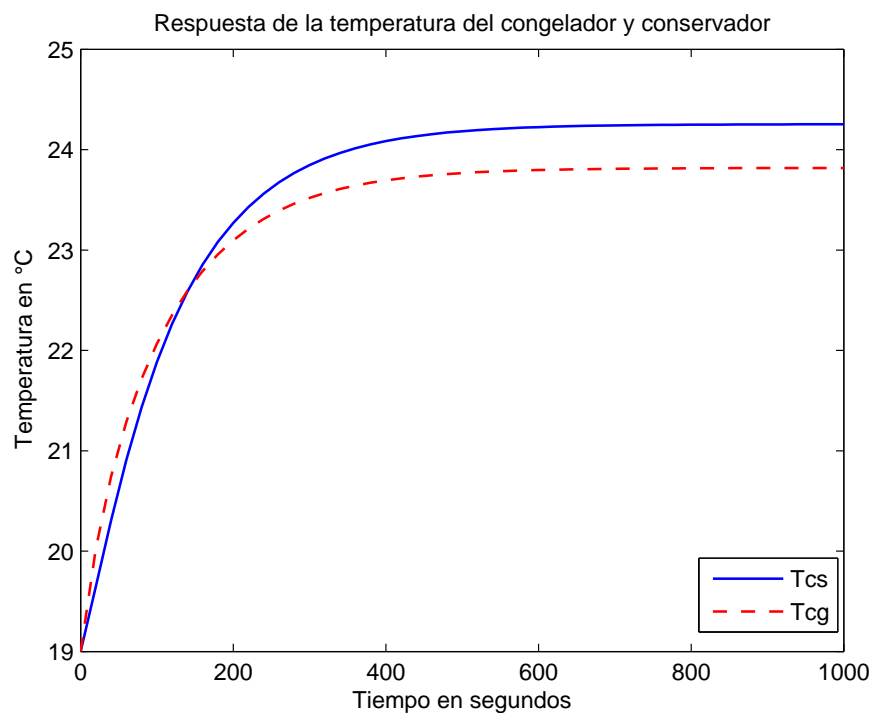


Figura 5. Respuesta de la temperatura del conservador y congelador con las resistencias apagadas

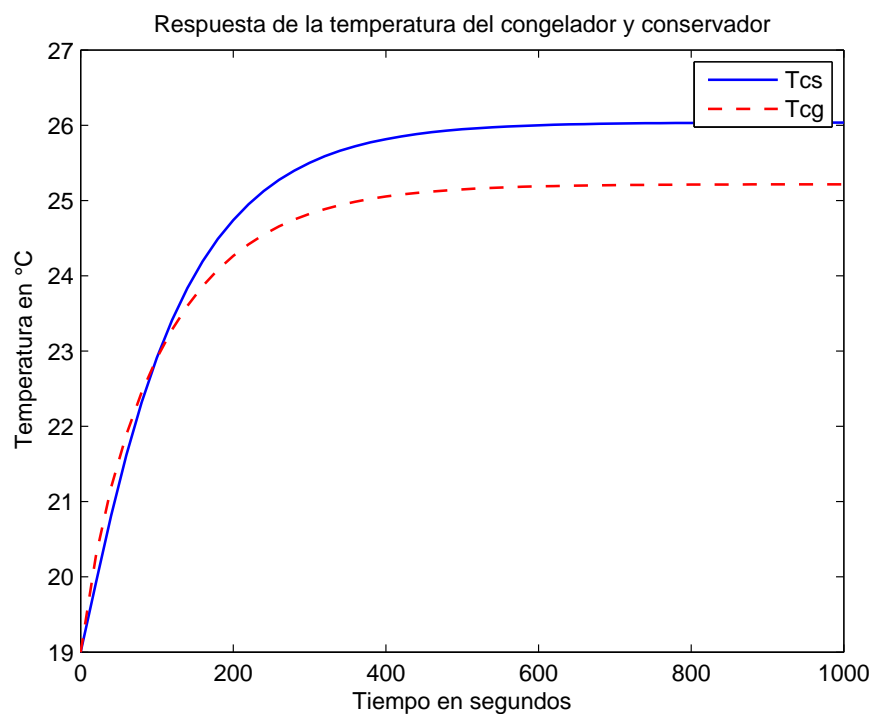


Figura 6. Respuesta de la temperatura del conservador y congelador con las resistencias encendidas

En la Fig. 7 se observa la disminución de la temperatura del congelador y conservador cuando el evaporador cuenta con una temperatura de  $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$  y es encendido el ventilador. Dando inicio al proceso de refrigeración.

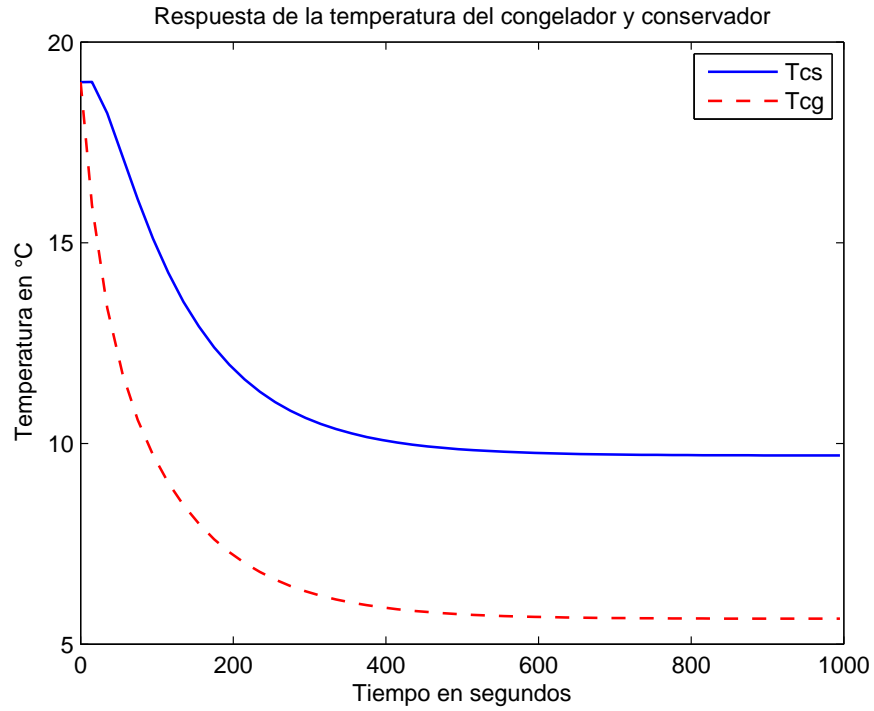


Figura 7. Respuesta de la temperatura del conservador y congelador con las resistencias encendidas

### 1.7. GRÁFICA DE PROPIEDADES TERMODINÁMICAS

Con el propósito de conocer la dinámica del modelo del refrigerador, se realiza un análisis de la energía, en el que se observa que ésta se encuentra en función de la temperatura, la humedad relativa y la presión atmosféricas. En el rango de temperatura establecido para este estudio -40 a 60 °C, el aire es considerado como una mezcla de aire seco y vapor de agua [18]. Partiendo de este enfoque se plantea la ecuación de energía Eq. 8 [18] en la que se introduce la mezcla de aire seco con vapor de agua, para observar como esta mezcla puede generar perturbaciones en las demás variables.

$$H = m_a h_a + m_v h_v, \tag{8}$$



de la Eq. 8 se sabe que la masa de vapor y la masa de aire seco están representadas por las Eq. 9 y Eq. 10 respectivamente; la entalpía del aire seco y del vapor de agua están dadas por Eq. 11 y Eq. 12.

$$m_v = w m_a, \quad (9)$$

$$m_a = \rho_a v, \quad (10)$$

$$h_a = C_p \frac{dT}{dt}, \quad (11)$$

$$h_v = C_p \frac{dT}{dt}, \quad (12)$$

finalmente, reemplazando las Eq. 9, Eq. 10, Eq. 11 y Eq. 12 en el delta de la Eq. 8 se obtiene:

$$\frac{dH}{dt} = \rho_a v \left( C_{pa} \frac{dT}{dt} + w C_{pv} \frac{dT}{dt} \right), \quad (13)$$

de la Eq. 13 se obtiene un  $C_p$  en función de la temperatura, presión atmosférica y humedad relativa; siendo  $w$  la humedad específica del aire en función de la presión de saturación, humedad relativa y presión atmosférica.

$$w = \frac{0.622 \phi p_g}{p_a - \phi p_g}. \quad (14)$$

El rango temperatura requerido para el refrigerador se encuentra entre  $-40$  a  $60$  °C, a partir de éste, se seleccionan los rangos de trabajo para los parámetros presentes durante el balance de energía:

- La Entalpía  $(-21.1, 59.31) \left[ \frac{kJ}{kg} \right]$
- Presión de saturación  $(0.1, 4) [kpa]$
- Calor Específico del Vapor  $(0.7160, 0.7210) \left[ \frac{kJ}{kg} \right]$

- Presión atmosférica en Medellín (101.3250, 64.8)[kpa]
- Humedad Relativa (0, 1)[%]
- Temperatura ambiente °C

De la gráfica obtenida para la presión de Saturación de Vapor correspondiente al rango de temperatura del refrigerador Fig. 8, se genera una respuesta no lineal, mostrando el comportamiento de esta variable antes los cambios de temperatura. Las respuestas obtenidas de la Humedad Específica Vs la temperatura de Saturación de Vapor Fig. 9 y Calor Específico del Aire Vs temperatura ambiente Fig. 10 generan los mismos resultados de no linealidad. Éstos dan respuesta sobre la no linealidad del modelo matemático del refrigerador bajo los rangon de temperatura de -40 a 60 °C.

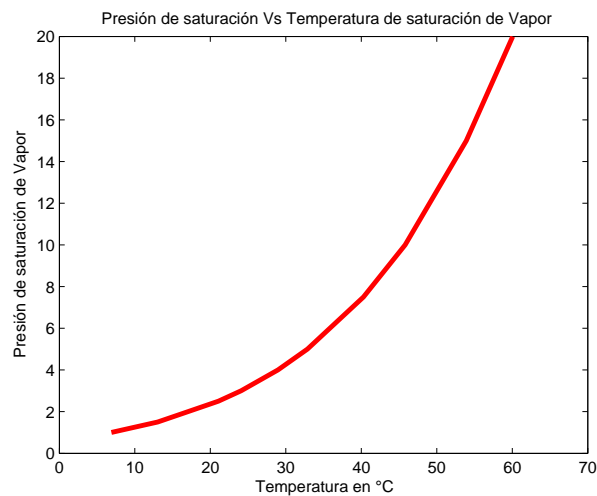


Figura 8. Gráfica de Presión de saturación Vs Temperatura de Saturación de Vapor

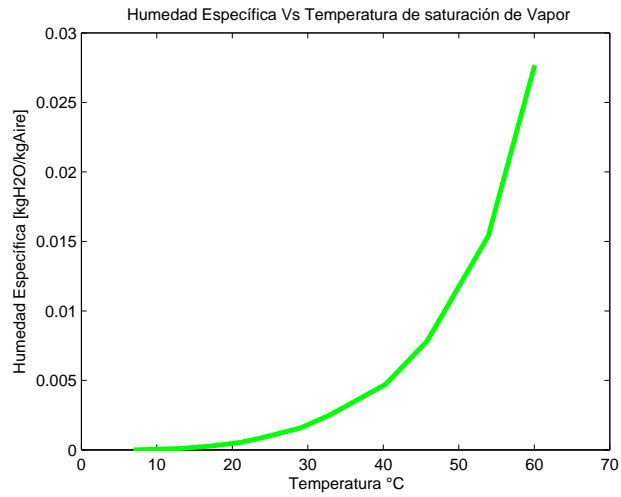


Figura 9. Gráfica de la Humedad Específica Vs la temperatura de Saturación de Vapor

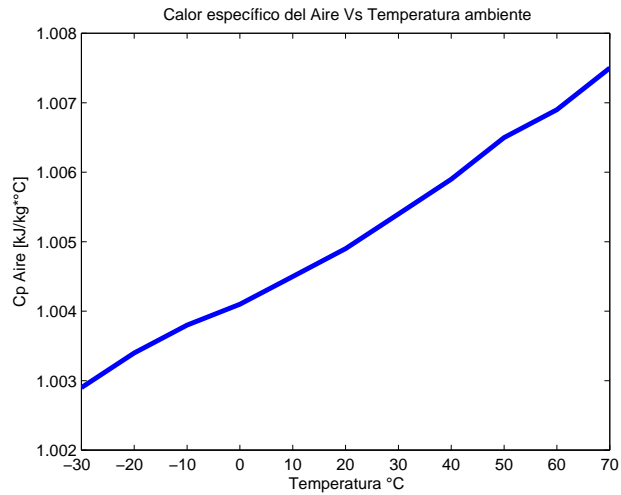


Figura 10. Gráfica del Calor Específico del aire Vs temperatura ambiente

En la Fig. 11 se observa la gráfica del Calor Específico del Vapor Vs temperatura ambiente, de la que se puede deducir que la respuesta es lineal pero solo por tramos, esta es una de las razones por las cuales dentro del rango de temperatura de estudio no se puede suponer que el aire es totalmente seco y que el calor específico puede tomar valores constantes, esto solo puede ser aplicado en el rango de trabajo de -10 a 50 °C.

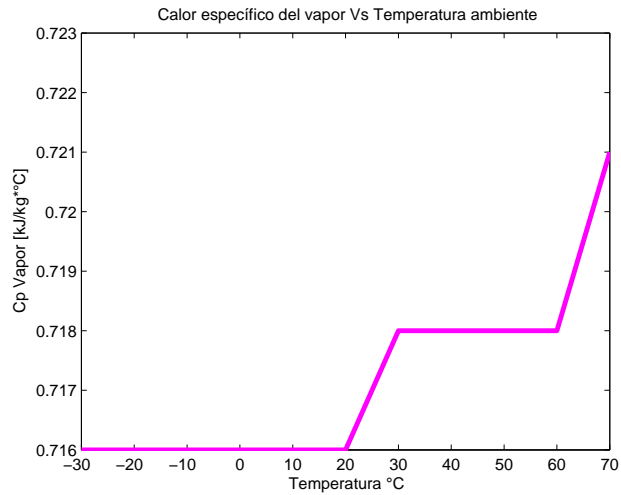


Figura 11. Gráfica del Calor Específico del Vapor Vs temperatura ambiente.

Se genera una gráfica de comparación Fig. 12 de las respuestas del Calor Específico total Vs temperatura, presión atmosférica y humedad relativa.

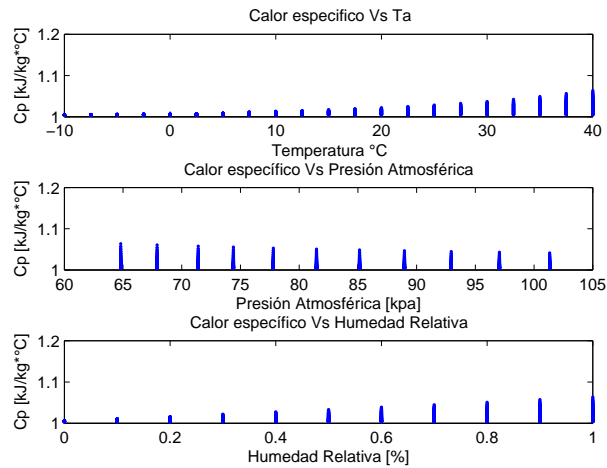


Figura 12. Gráfica de la respuesta del calor específico total Vs temperatura, presión atmosférica y humedad relativa

En las Fig. 13 y Fig. 14 se observan las repuestas de la densidad de aire seco Vs la temperatura ambiente, la presión atmosférica y la humedad relativa.

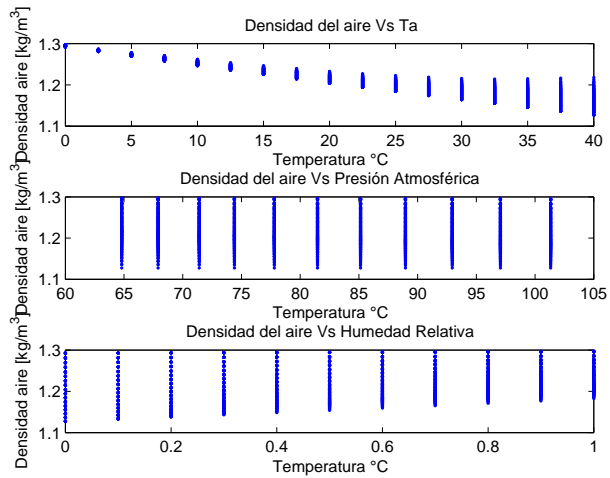


Figura 13. Gráfica de la respuesta de la Densidad del aire Vs Humedad relativa y Temperatura ambiente, Presión atmosférica

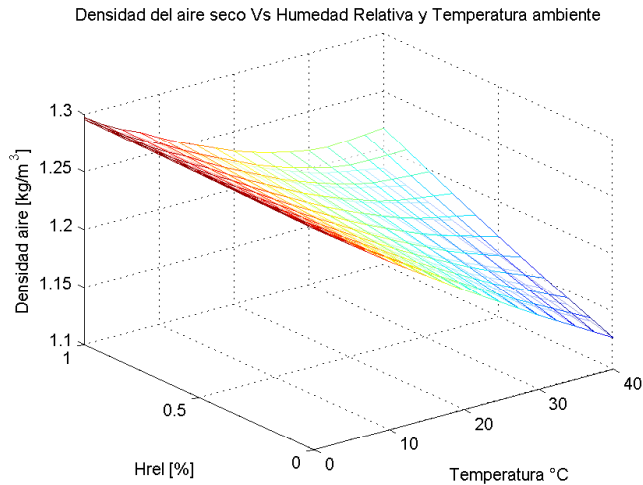


Figura 14. Superficie gráfica de la Densidad del aire seco Vs Humedad relativa, Temperatura ambiente

En las Fig. 15, Fig. 16, Fig. 17 y Fig. 18 se encuentran las superficies del Calor Específico en respuesta a la temperatura, la presión atmosférica y la humedad relativa, además se encuentran superpuestos las superficies de la densidad de aire seco y el calor específico.

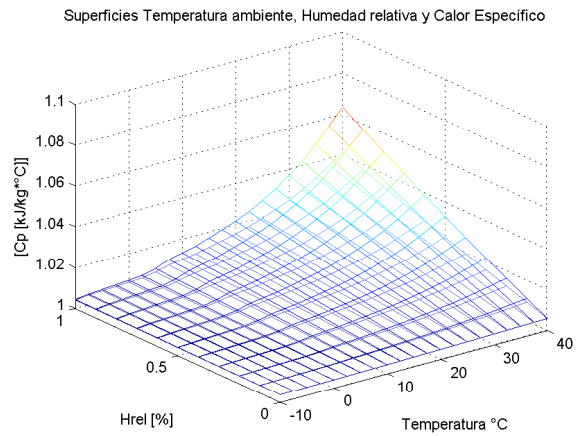


Figura 15. Superficie gráfica del Calor Específico Vs Humedad relativa, Temperatura ambiente

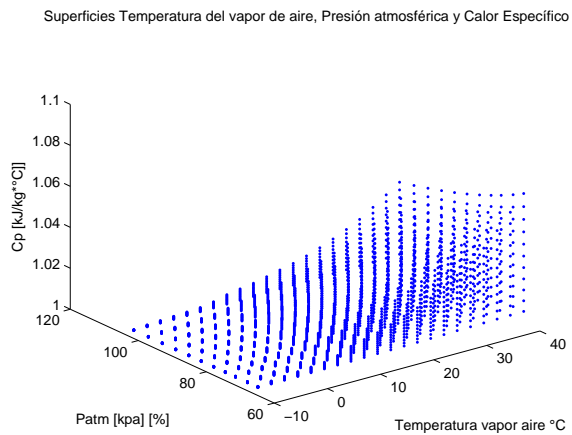


Figura 16. Superficie gráfica del Calor Específico Vs Presión atmosférica, Temperatura ambiente

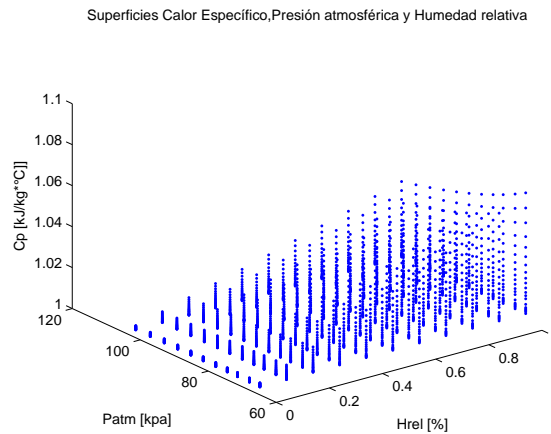


Figura 17. Superficie gráfica del Calor Específico Vs Presión atmosférica, Humedad Relativa

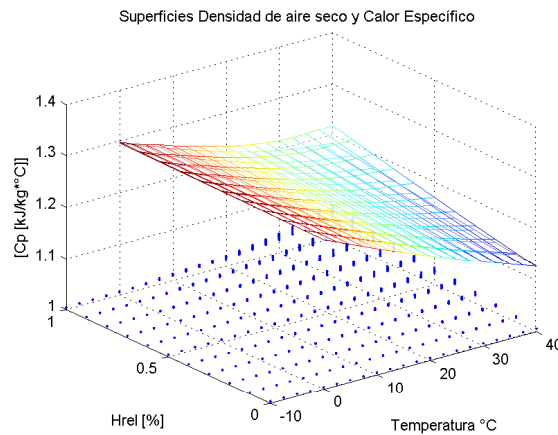


Figura 18. Superficie superpuestas Densidad de aire seco y Calor Específico

### 1.8. POTENCIA DE LA RESISTENCIAS DEL REFRIGERADOR

Al realizar la simulación de la potencia requerida para las resistencias del refrigerador en las temperaturas de trabajo, se puede concluir que la superficie de potencia permite encontrar uno valor de potencia para cada valor de temperatura, como se puede apreciar en la Fig. 19.

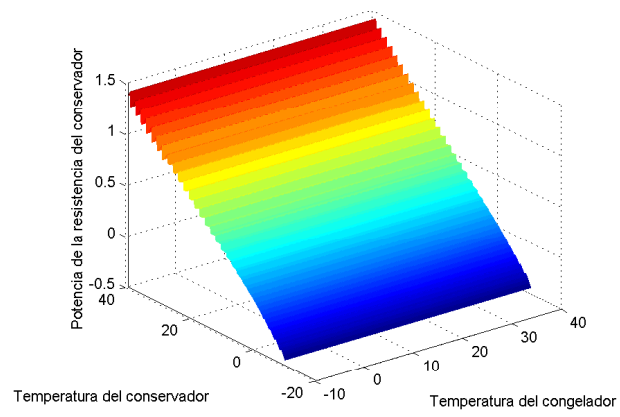


Figura 19. Superficie de potencia de las resistencias del refrigerador



## **2. CAPÍTULO II: 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.

### **2.1. DESCRIPCIÓN DE LOS REQUERIMIENTOS DEL PROYECTO**

Una de las infraestructuras de control diseñadas, debía ser integrada al dispositivo de carga de refrigerante, el cual entregaría las señales de una celda de carga, dos válvulas solenoide, un motor paso a paso, dos termopares tipo T, dos resistencias térmicas, una para el conservador y otra para el congelador, con el objetivo de controlar la cantidad de refrigerante que fluye desde el cilindro hacia el evaporador por medio de las válvulas solenoide, caracterizando así la dimensión del tubo capilar. La celda de carga daría a conocer la cantidad de refrigerante comprendido en el cilindro y que sería restringido de acuerdo a los parámetros calculados.

Las señales de temperatura entregadas por los termopares tipo T y la temperatura de las resistencias dispuestas en el conservador y el congelador, debían ser llevadas una tarjeta de adquisición de datos, mediante la cual se generaría un registro y monitoreo de la temperatura durante el proceso.

En el dispositivo de calibración se tendrían en cuenta las señales de los transmisores de presión, un flujómetro, tres válvulas solenoide, dos reguladores de presión y un motor paso a paso, con la idea principal de realizar la calibración del motor para obtener la caracterización de la válvula dependiendo de la longitud del tubo capilar, esencial en cada proceso.

Finalmente en el dispositivo de túnel de viento se obtendrían las medidas de presión absoluta y diferencial producidas por el ventilador de prueba, así como los requerimientos de flujo y velocidad de aire que no generaran ruido durante su funcionamiento. Esto con el fin de seleccionar el ventilador que mejor se adapte a una nevera específica, buscando el menor consumo de energético.

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.

## **2.2. 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.

En el diagrama de instrumentación y proceso del sistema de carga de refrigerante Fig. 20, desarrollado bajo la Norma ISA, se observa la disposición y el cableado de los dispositivos, las señales de temperatura que son llevadas a la infraestructura de control, que se encuentra integrada por el sistema de adquisición de datos CompactDAQ de la *National Instruments*, utilizado para el monitoreo y control durante las pruebas.

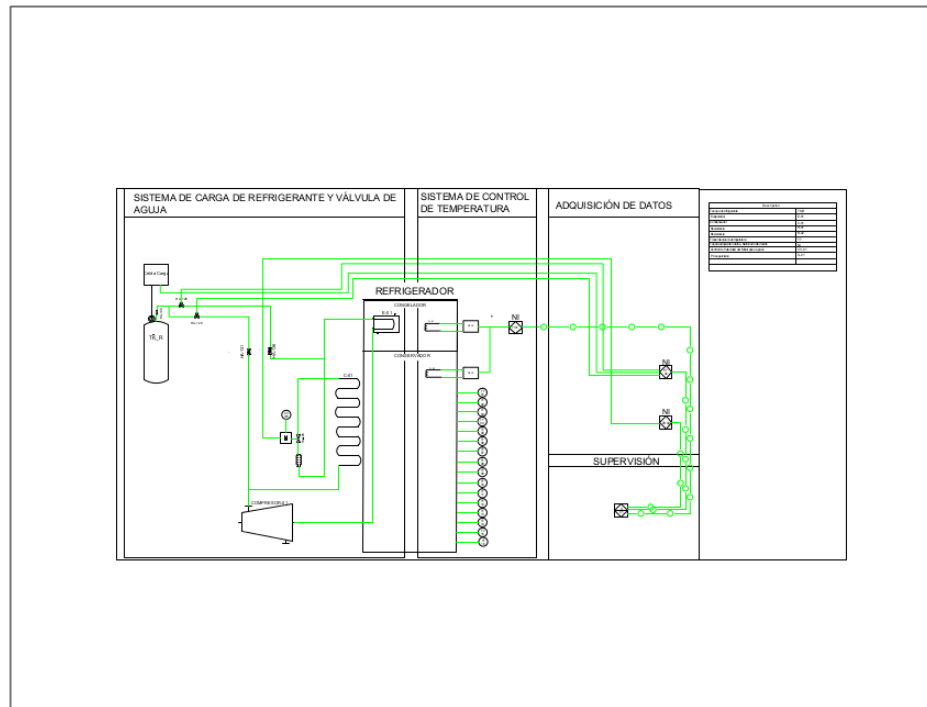


Figura 20. Diagrama de instrumentación y procesos

El diagrama de bloques del banco de carga de refrigerante se muestra en la Fig. 21,

fue diseñado para corroborar el tipo de cableado y la cantidad de señales enviadas al dispositivo de adquisición de datos, así como las descripciones de corriente y voltaje necesarios para la construcción de la infraestructura de control.

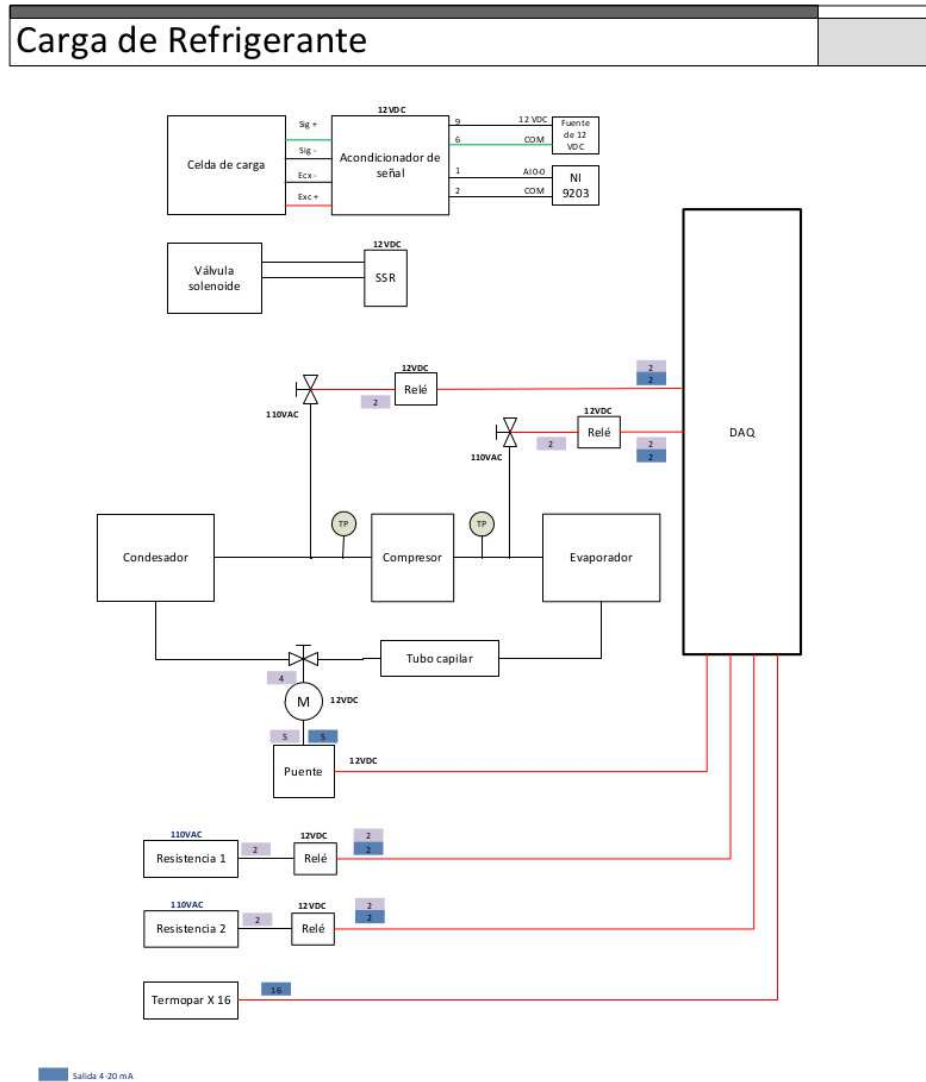


Figura 21. Diagrama de bloques Carga de Refrigerante

### **2.3. DISEÑO DE LA INFRAESTRUCTURA DEL 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. 22, 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.

### **2.4. 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 a través de tablas.

En el diagrama de bloques del banco de caracterización de la válvula Fig. 23, 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.

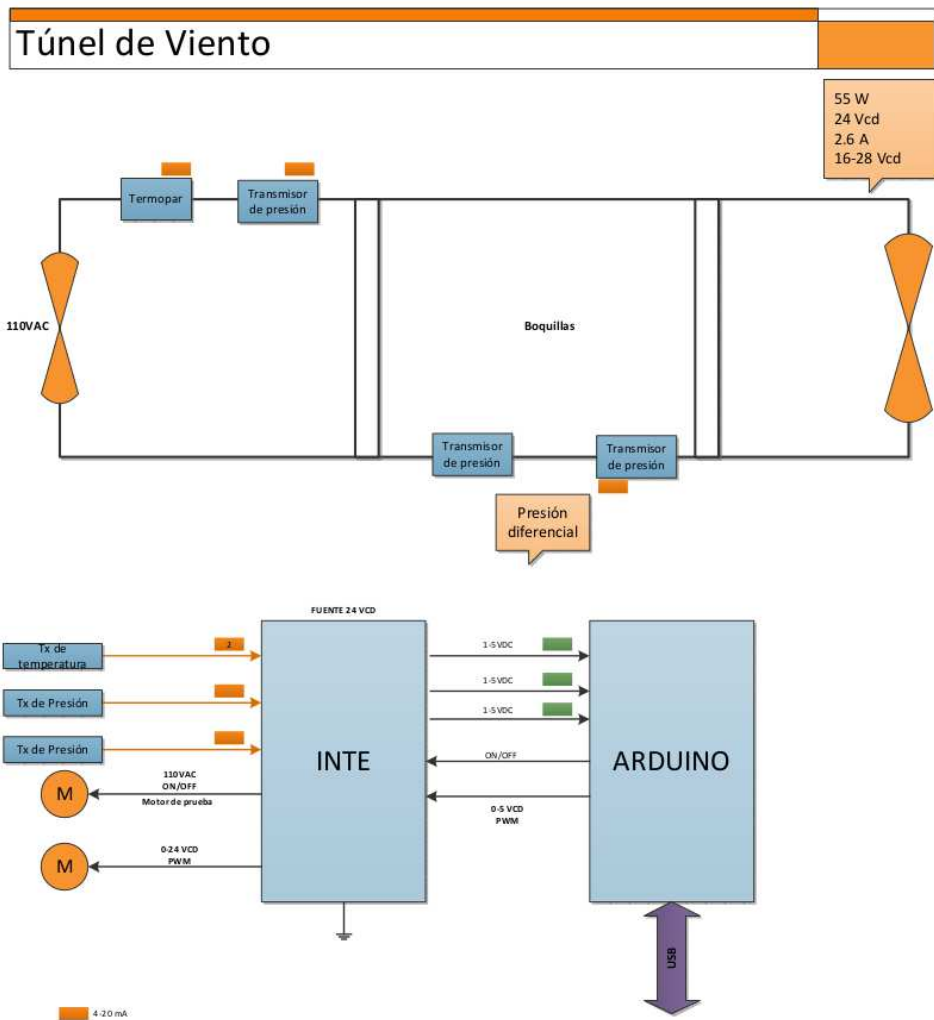


Figura 22. Diagrama de bloques Túnel de Viento

## Caracterización de la Válvula

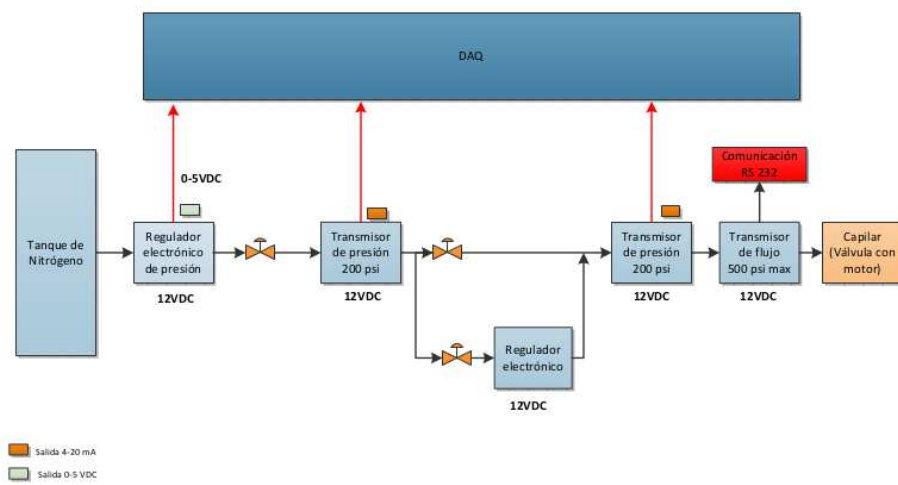


Figura 23. Diagrama de bloques Caracterización de la Válvula

## 2.5. DISEÑO DE LA TARJETA INTERFAZ

Después de conocer las especificaciones de la instrumentación de los bancos de refrigeración y de las infraestructuras de control, se dio inicio a la etapa de diseño y desarrollo de la tarjeta interfaz Fig. 24 para el acondicionamiento de las señales existentes. La tarjeta interfaz fue diseñada en la plataforma de Eagle, software de diseño de tarjetas PCB. La tarjeta interfaz 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 uso una señal controlada por un micro relé.



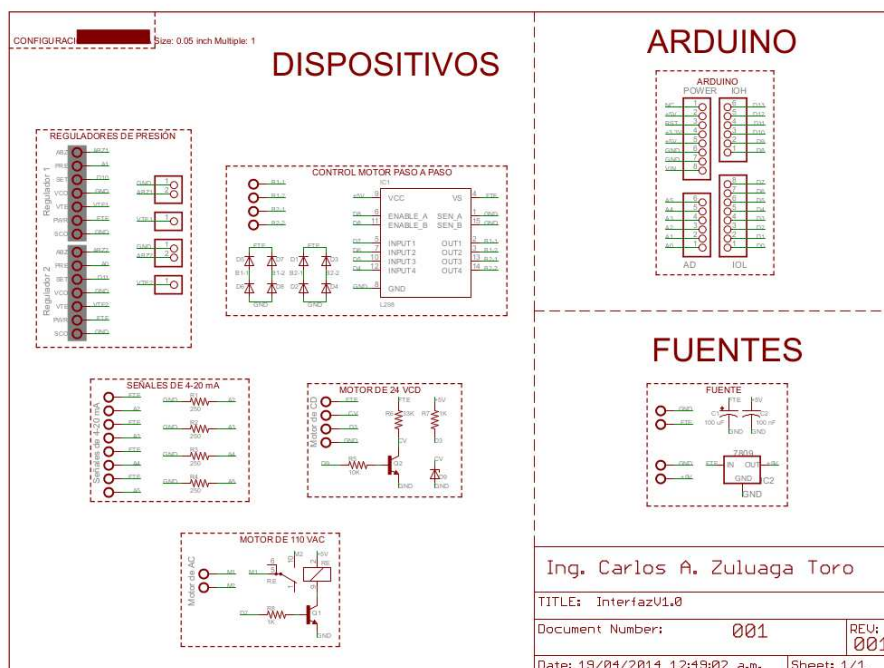


Figura 24. Esquemático de la tarjeta interfaz

### 3. CAPÍTULO III: INGENIERÍA BÁSICA-SELECCIÓN DE LA INSTRUMENTACIÓN PARA LOS BANCOS DE PRUEBA

En la etapa de selección y especificación de los equipos de refrigeración comercialmente existentes, se tomaron como referencia los equipos asociados a uno de los proyectos de refrigeración desarrollados en el laboratorio de Investigación en Refrigeración y Termofísicas POLO Brasil, no sin antes asegurar que compensaran los rangos de presión, humedad y temperatura requeridos por el proyecto “Desarrollo de un Banco de Ensayos para Refrigeración Doméstica en la Empresa Industrias Haceb S.A.”. El proceso de selección de los dispositivos de medición y control pertenecientes a las infraestructuras de control, fue complementario a las especificaciones técnicas de los equipos de refrigeración. De allí se seleccionaron los rangos de corriente, voltaje y potencia que pudieran adecuarse fácilmente a los dispositivos de adquisición de datos.

Con la experiencia adquirida en la ejecución de otros proyectos se tomó la determinación de escoger dispositivos para la adquisición de datos y el acondicionamiento de señal, que cumpliera con altos estándares de desempeño pero que a su vez fueran de fácil manejo y compatibles con las tecnologías de desarrollo de firmware existentes. Por esta razón la tarjeta de adquisición de datos CompactDAQ de la *National Instruments*® y las tarjetas de desarrollo Leonardo de Arduino fueron seleccionadas. En el proceso de selección de la instrumentación, emergieron variables como la temperatura y las señales entregadas por las celdas de carga, estas variables necesitan de un acondicionamiento señal óptimo, debido a que las señales son muy sensibles al ruido eléctrico que evita que el proceso de transmisión y recepción sea exitoso. Resultado que finalmente fue obtenido durante las pruebas en la culminación del proyecto.

### 3.1. INSTRUMENTACIÓN BANCO DE CARGA DE REFRIGERANTE

El banco de carga de refrigerante esta constituido por 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. La infraestructura de control asociada a este banco cuenta con una tarjeta interfaz desarrollada en la plataforma de Eagle para el acondicionamiento de señal, que se encuentra acoplada a una tarjeta de desarrollo Leonardo de Arduino, una fuente de voltaje de 12  $V_{DC}$  y un módulo de adquisición de datos Compact DAQ de la *National Instruments*®.

#### 3.1.1. Celda de carga

La celda de carga se encuentra dimensionada para soportar 2.2 lbf, este es el peso requerido por el tanque de refrigerante en condiciones normales, con una carga de refrigerante de 50 gr aproximadamente. En la Fig. 25 se observa la celda de carga modelo SMT1-2.2, diseñada para entregar una señal de 2 mV/V que deben ser llevados a un acondicionador de señal para obtener una señal linealizada de 4-20 mA.



Figura 25. Celda de carga 2.2 lbf

### 3.1.2. *Tanque de carga de refrigerante*

El tanque de carga de refrigerante está dimensionado para almacenar 50 gr de refrigerante R600a, que es el refrigerante utilizado en los refrigeradores domésticos por Industrias Haceb S.A. ya que cuenta con un potencial de destrucción de ozono (ODP) de cero y un potencial global de calentamiento (GWP) insignificante, lo que genera un bajo impacto ambiental. Además es una sustancia que forma parte de gases de petróleo provenientes de fuentes naturales, por lo que se le puede considerar un refrigerante natural [19].



Figura 26. Tanque de carga de refrigerante

### 3.1.3. *Válvula solenoide*

La válvula solenoide Danfoss utilizada en sistemas de refrigeración, cuenta con alimentación de 110 V<sub>AC</sub> a una frecuencia de 50/60 Hz, un rango de trabajo de -40 a 50 °C y con una conexión a la bobina por medio de cable.



Figura 27. Válvula Solenoide Danffos

#### 3.1.4. Resistencias

Las resistencias implementadas en el refrigerador, cumplen la función de mantener el nivel de temperatura deseado en el conservador y el congelador, estas resistencias cuentan con una fuente de alimentación de  $110 V_{AC}$ , entregando una potencia de  $19.2 W$  y  $0.16 A$ .

#### 3.1.5. Motor paso a paso

Se cuenta con un motor paso a paso bipolar de 1.8 pasos por grado, la alimentación del motor es de  $12 V_{DC}$ , corriente de  $350 mA$  y tiene un torque de  $2 kgf/cm$ . Para el funcionamiento del motor se requiere la implementación de un driver de potencia. En este caso un *driver* Puente-H dual L298 Fig. 29, que cuenta con un controlador dual H, utilizado para altos voltajes y corrientes: al ser dual está diseñado para aceptar niveles lógicos de estándares TTL y unidades inductivas como relés de estado solido, válvulas solenoides y motores paso a paso.



Figura 28. Motor Paso a Paso

### 3.1.6. Driver *punte H* y módulo de Relés

El módulo de relés Fig. 30 y el *driver* puente H Fig. 29, son utilizados como módulos de acoplamiento de señal para las válvulas solenoides y el motor paso a paso respectivamente.

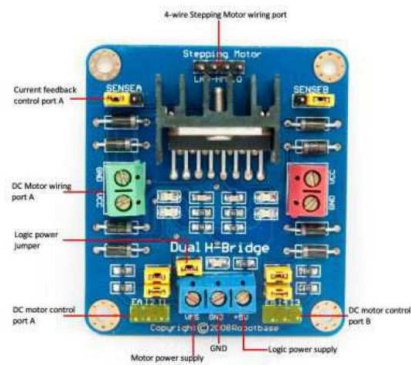


Figura 29. *Driver* Puente H

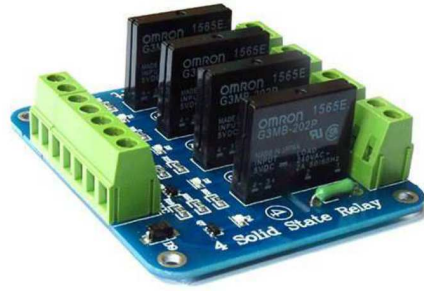


Figura 30. Relés de estado solido

### 3.1.7. Fuente conmutada de 12 $V_{DC}$ y alimentación de 110 $V_{AC}$

La fuente conmutada Fig. 31 es seleccionada para alimentar a los dispositivos de las infraestructuras de control de los bancos de carga de refrigerante y túnel de viento.



Figura 31. Fuente conmutada 12  $V_{DC}$  y alimentación de 110  $V_{AC}$

### 3.1.8. Módulos de la National Instrument®

Los módulos de la *National instrument*® son implementados para la medición y control del banco de carga de refrigerante. El Módulo NI 9472 Fig. 32 está compuesto por 7 salidas digitales y una fuente de alimentación externa de 0 a 30  $V_{DC}$ . Éste se encuentra dispuesto para la medición de las señales entregadas por el motor paso a paso y las válvulas solenoides.

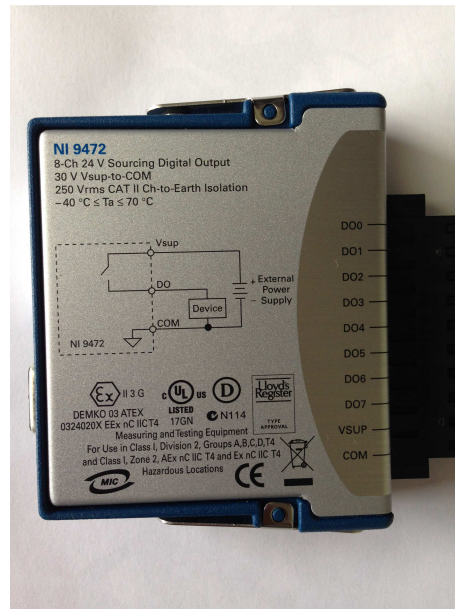


Figura 32. Módulo NI 9472

El módulo NI 9203 Fig. 33 cuenta con 8 canales, 4 a 20 mA y 16 bits de entradas análogas. Utilizado para la medición de las señales entregadas por la celda de carga.

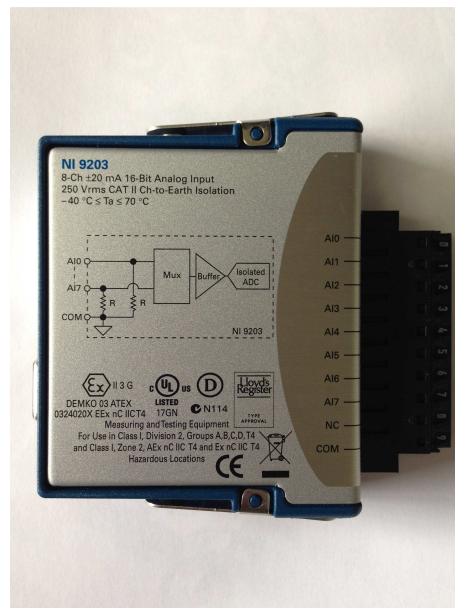


Figura 33. Módulo NI 9203



El módulo NI 9213 Fig. 34 cuenta con 36 terminales designadas para la conexión de los 16 termopares tipo T, que permiten obtener medidas de temperatura en los rangos de los procesos de refrigeración. De las 36 terminales 16 son para la conexión de TC+ y 16 para TC-, las terminales restantes son para NC y COM.

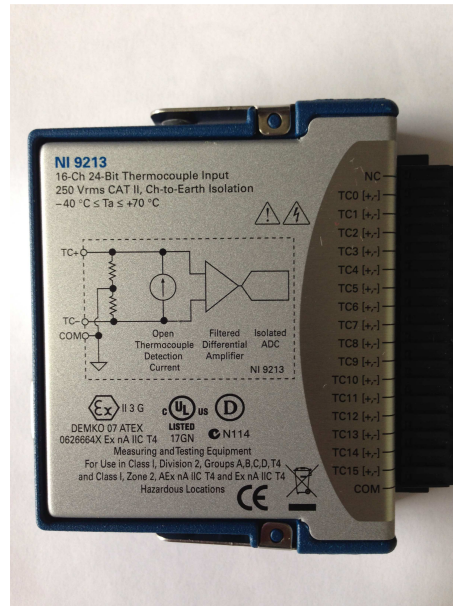


Figura 34. Módulo NI 9213

El módulo NI 9174 Fig. 35 es un chasis NI CompactDAQ USB de 4 ranuras diseñado para sistemas pequeños y portátiles de pruebas, en el que se soportan los módulos anteriores utilizados en la infraestructura de control. En la Fig. 36 se puede ver la configuración de los módulos en el chasis NI.



Figura 35. Módulo NI 9174

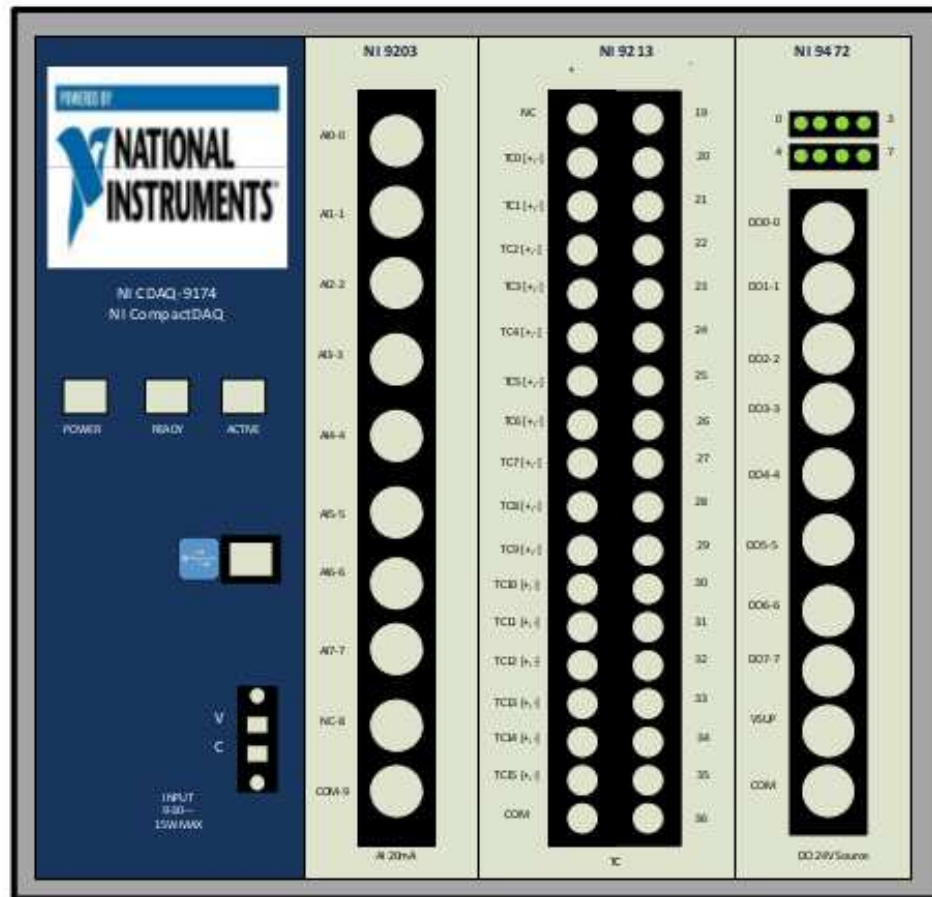


Figura 36. Configuración de Módulos NI

## 3.2. INSTRUMENTACIÓN BANCO DE CARACTERIZACIÓN DE LA VÁLVULA

Este banco tiene como objetivo encontrar la mejor configuración de motor-válvula respecto a la longitud del tubo capilar y está conformado por un motor paso a paso, una válvula solenoide, dos reguladores de presión, dos transmisores electrónicos de presión, un flujómetro y una fuente de voltaje de  $12 V_{DC}$ .

### 3.2.1. Regulador de Presión

El regulador de presión Porte 415 cuenta con un sensor de control proporcional que se encuentra integrado al dispositivo. Tiene salidas de 0 a  $5 V_{DC}$ , una fuente de poder de 12 a  $24 V_{DC}$  y un rango de presión de 0 a 100 psi.



Figura 37. Regulador de presión

### 3.2.2. Transmisor de Presión

El transmisor de presión electrónico Coler-Parmer, cuenta con señales de salida de 4 a 20 mA, una fuente de poder de 7 a  $35 V_{DC}$ , un rango de presión de 0 a 200 psi, compatible con gases y líquidos.



Figura 38. Transmisor de presión

### 3.2.3. *Flujómetro*

El flujómetro Coler-Parmer cuenta con un totalizador programable, una alarma de nivel de flujo, ajuste automático de cero, dos salidas de relé, *jumper* seleccionable de salidas analógicas de 0 a 5  $V_{DC}$  o 4 a 20 mA. La comunicación se realiza por medio de comunicación serial *RS485* y *RS232*.



Figura 39. Flujómetro

### 3.3. INSTRUMENTACIÓN BANCO TÚNEL DE VIENTO

La instrumentación de este banco está compuesta por un sensor de presión diferencial, un sensor de presión absoluta, un ventilador salida de 24  $V_{DC}$ , un ventilador de prueba de 110  $V_{AC}$  y un transmisor de temperatura. La infraestructura de control asociada a este banco cuenta con una tarjeta interfaz desarrollada en la plataforma de Eagle para el acondicionamiento de señal, que se encuentra acoplada a una tarjeta de desarrollo Leonardo de Arduino y una fuente conmutada de 24  $V_{DC}$  y alimentación de 110  $V_{AC}$ .

#### 3.3.1. Sensor de presión

Los sensores de presión diferencial y absoluta dispuestos para el banco de túnel de viento se observan en la Fig. 40. El sensor de presión diferencial modelo LPX1510-C1SNW-1, tiene un rango de presión de 0 a 6.25 mbar, una salida de corriente de 4 a 20 mA y una alimentación de voltaje de 10 a 30  $V_{DC}$  y el sensor de presión absoluta modelo LPX1010-C1SNW-1 tiene un rango de presión de 0 a 0.5 mbar, una salida de corriente de 4 a 20 mA y una alimentación de voltaje de 10 a 30  $V_{DC}$



Figura 40. Sensor de presión Diferencial

### 3.3.2. Ventiladores de AC Y DC

El ventilador de entrada Fig. 41 del túnel de viento, cuenta con una fuente de alimentación de  $110 V_{AC}$  y el ventilador de salida del túnel de viento Fig. 42, cuenta con una fuente de alimentación de  $24 V_{DC}$ . El encendido y apagado del ventilador de entrada, así como la velocidad del ventilador de salida serán controlados desde la interfaz desarrollada en LabVIEW®.

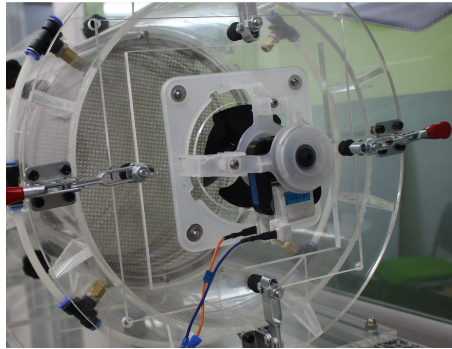


Figura 41. Ventilador de entrada de  $110 V_{AC}$



Figura 42. Ventilador de salida de  $24 V_{DC}$

## **4. CAPÍTULO IV: INGENIERÍA DE DETALLE Y PUESTA A PUNTO**

En este capítulo se muestra el desarrollo del firmware y el software de las infraestructuras de control, así como la integración de éstos con el hardware diseñado, que finalmente es dispuesto en los tableros de conexiones de cada banco.

### **4.1. 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. 44, en el cual fueron creadas un listado de tareas de lectura y escritura que debían ser ejecutadas de manera simultánea sin interferir en las demás tareas. Para el procesamiento de datos se desarrolló una máquina de estados basada en dos funciones principales, envía y recibe Fig. 46 en la plataforma de LabVIEW® y para el monitoreo de las variables fue creada una interfaz gráfica Fig. 45 de la misma plataforma.

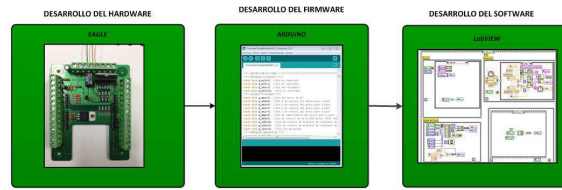


Figura 43. Etapas de implementación de la infraestructura de control

En el entorno de desarrollo de Arduino se realiza la definición de variables del programa, direccionamientos y se ejecutan las tareas asociadas con la adquisición de datos de los bancos de pruebas.

```

FirmwareTarjetaInterfazV1_0 | Arduino 1.0.3
Archivo Editar Sketch Herramientas Ayuda
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_mv=9; //Pin de control de velocidad motor 24Vdc (P)
const byte p_sr=10; //Pin de control de setpoint de regulador de
const byte p_sr=11; //Pin de control de setpoint de regulador de
const byte p_lee=13; //Pin led de estado
/** ENTRADAS ANALOGICAS ***/

```

Figura 44. Entorno de desarrollo de Arduino

La interfaz gráfica de túnel de viento Fig. 45 fue diseñada para obtener los valores de presión relativa y absoluta en mba, controlar en encendido y apagado del ventilador de prueba, controlar la velocidad del ventilador extractor, realizar la captura de los datos de presión para ser llevados a una carpeta de archivos en los que puedan ser verificados posteriormente. También cuenta con un botón de salir en el caso que se presente un error en las comunicaciones o cuando se haya terminado el proceso.





Figura 45. Interfaz gráfica del Túnel de Viento

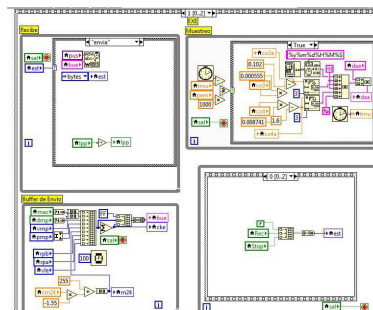


Figura 46. Adquisición de datos en la plataforma de LabVIEW®

#### 4.1.1. 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. 47, este esquemático fue realizado para que cumpla la misma funcionalidad de un plano de conexiones. En la Fig. 48 se observa el tablero de conexiones con la disposición final de los dispositivos de medición.

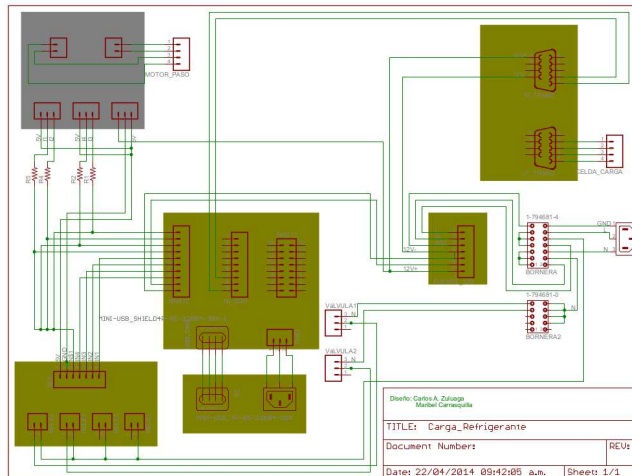


Figura 47. Diagrama de conexiones Banco Carga de Refrigerante



Figura 48. Tablero de conexiones Banco de Carga de Refrigerante

#### 4.1.2. 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. 49 y se observa la disposición final de los dispositivos en el Laboratorio de Refrigeración Fig. 50.

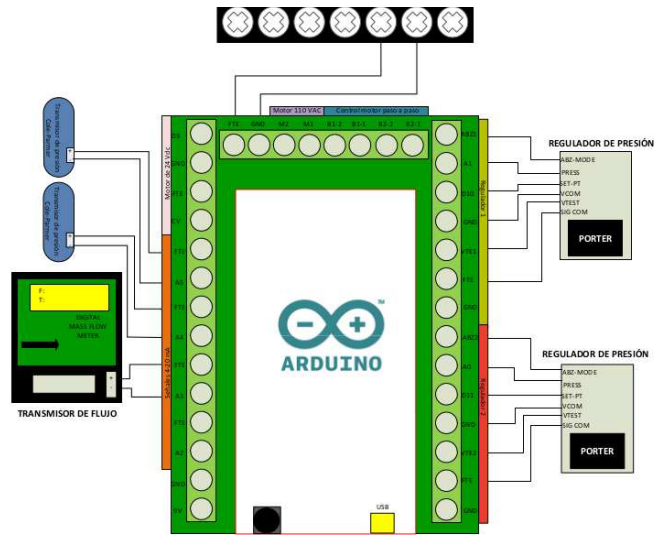


Figura 49. Diagrama de conexiones Banco de Caracterización de la válvula



Figura 50. Banco de Caracterización de la Válvula

#### 4.1.3. Diagrama de conexiones Banco 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 acondicionamiento de señal, que se

encuentra acoplada a una tarjeta de adquisición de datos Leonardo de Arduino Fig. 53. El diagrama de conexiones del túnel de viento se muestran en la Fig. 52 y el tablero de conexiones con la disposición final de la instrumentación Fig. 51

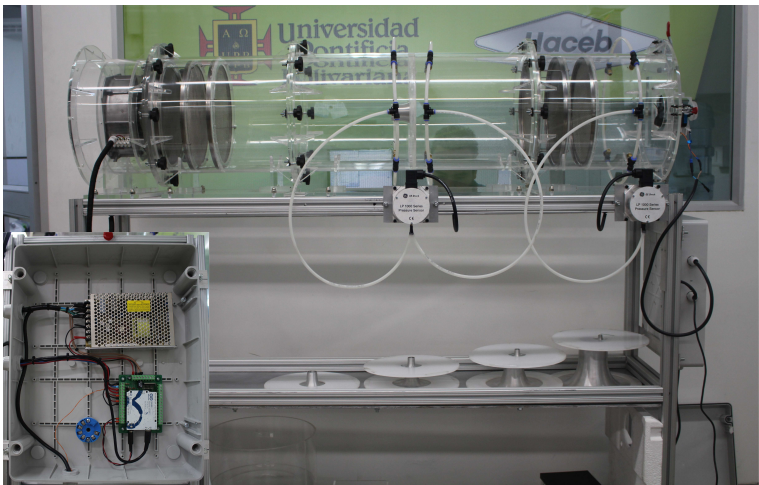


Figura 51. Banco de Túnel de Viento y Tablero de Conexión

DIAGRAMA DE CONEXIONES TÚNEL DE VIENTO

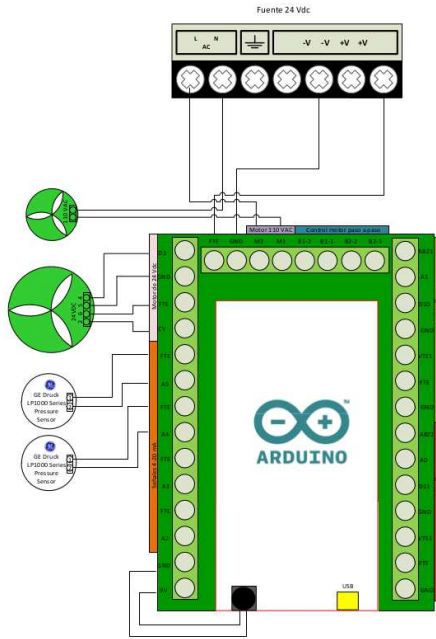


Figura 52. Diagrama de conexiones Banco del Túnel de viento

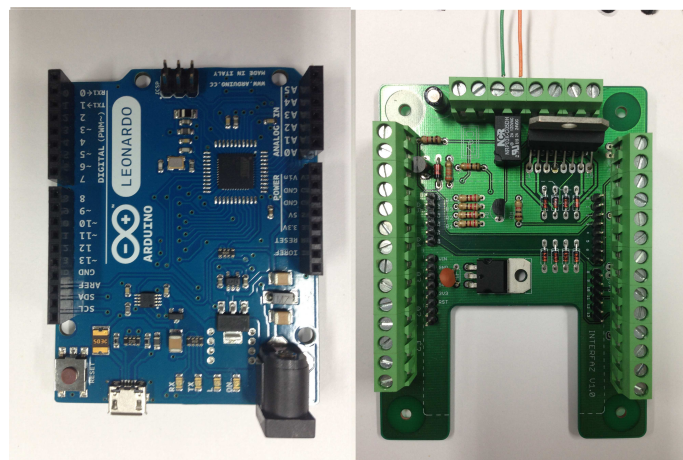


Figura 53. Tarjeta Leonardo de Arduino y Tarjeta de acoplamiento de señal

La tarjeta Leonardo de Arduino es una placa electrónica basada en el ATmega32u4. Cuenta con 20 pines digitales de entrada / salida (de los cuales 7 se pueden utilizar como salidas PWM y 12 entradas como analógicos), un oscilador de 16 MHz, una conexión micro USB, un conector de alimentación, una cabecera ICSP, y un botón de reinicio. Contiene todo lo necesario para apoyar el microcontrolador; basta con conectarlo a un ordenador con un cable USB o a una fuente de poder con un adaptador de AC o una batería de 5  $V_{DC}$ .

4.1.4. Disposición final de los bancos de pruebas



Figura 54. Bancos de pruebas disposición final

## 5. RESULTADOS OBTENIDOS

En la etapa final del proyecto se hace entrega de la instalación de la infraestructura de control de cada banco Fig. 54, 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 ser usado para implementar estrategias de control en el banco de carga de refrigerante.



## 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.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Arduino. (2014, July) Arduino. [Online]. Available: <http://arduino.cc/en/pmwiki.php>
- [2] J. Rocha, C. Couto, and J. Correia, "Smart load cells: an industrial application," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 85, no. 143, pp. 262 – 266, 2000. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924424700004155>
- [3] D. de arquitectura y construcción. (2013, June) Definiciones. [Online]. Available: <http://www.parro.com.ar/definiciondeevaporador>
- [4] R. Luken and T. Grof, "The montreal protocol's multilateral fund and sustainable development," *Ecological Economics*, vol. 56, no. 2, pp. 241 – 255, 2006. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921800905000960>
- [5] N. Instrument. (2013, June) Daq. [Online]. Available: <http://www.ni.com/labview>
- [6] E. Dictionaries. (2013, November) Evaporator. [Online]. Available: [http://www.engineering-dictionary.org/evaporator\\_](http://www.engineering-dictionary.org/evaporator_)
- [7] R. A. de la Lengua Española. (2013, June) Definición software. [Online]. Available: <http://buscon.rae.es/draeI/html/cabecera.htm>
- [8] LabView. (2014, November) Introduction labview. [Online]. Available: <http://www.ni.com/pdf/manuals/374029a.pdf>
- [9] O. L. Moscon. (2013, June) Máquinas e instalaciones eléctricas. [Online]. Available: <http://www.ing.unp.edu.ar/asignaturas/maqeinstelectricas/MOTOR>

- [10] POLO. (2013, November) Institucional. [Online]. Available: <http://www.polo.ufsc.br>
- [11] I. Dincer and M. Kanoglu, *Refrigeration systems and applications*, 2nd ed. Wiley, 2010.
- [12] Sensing. (2014, August) Sensores para la medicion de parametros fisicos. [Online]. Available: [http://www.sensing.es/Transductores\\_de\\_presion\\_Cm.htm](http://www.sensing.es/Transductores_de_presion_Cm.htm)
- [13] Quiminet. (2014, August) Transmisores de presión. [Online]. Available: <http://www.quiminet.com/articulos/usos-y-caracteristicas-de-los-transmisores-de-presion-55574.htm>
- [14] Frioline. (June2013) Tubo capilar. [Online]. Available: <http://frionline.net/articulos>
- [15] Ferroneumatica. (2013, June) Válvulas solenode. [Online]. Available: <http://www.ferroneumatica.com.co/2009/04/29/valvula-solenode/>
- [16] X. I. Stavro, “Implementación del protocolo de montreal en colombia,” *Produccion mas limpia*, vol. 1, no. 2, p. 15, june 2007.
- [17] E. L. Zapparoli and M. J. S. de Lemos, “simulation of transient response of domestic,” *The International Refrigeration and Air Conditioning Conference*, no. 371, 1996.
- [18] M. Hill, Ed., *Termodinámica*, 5th ed. Yunus A. Cengel and Michael A. Boles, 2009.
- [19] Danfoss. (2014, November) Aplicación práctica del refrigerante r600a isobutano en sistemas refrigerados domésticos. [Online]. Available: [http://www.construmatica.com/archivos/27579/4\\_catalogo\\_compresores\\_danfoss/informacion\\_tecnica.pdf](http://www.construmatica.com/archivos/27579/4_catalogo_compresores_danfoss/informacion_tecnica.pdf)

## 6. ARTÍCULO PUBLICABLE

## 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

2013-07-19, s2013-07-18

## 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
$\rho$	densidad del aire, $kg/m^3$
$\nu$	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 $kJ/kg$
$\rho_a$	densidad del aire, $kg/m^3$
$w$	humedad específica, $kgH_2O/kgAire$
$p_a$	presión de aire, kpa
$p_g$	presión de saturación, kpa
$\phi$	humedada 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.

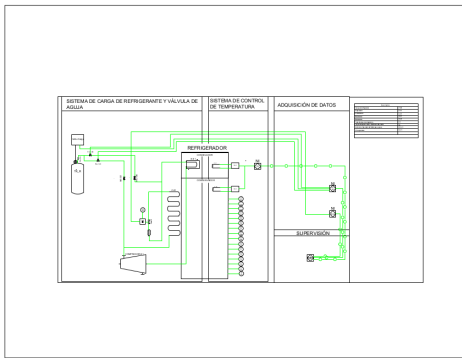


Figura 1. Dispositivo de carga de refrigerante

### 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.

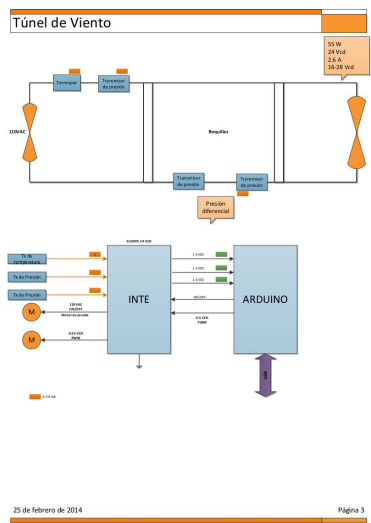


Figura 2. Diagrama de bloques Túnel de Viento

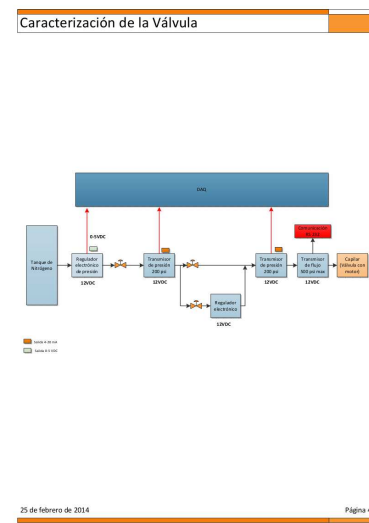


Figura 3. Diagrama de bloques Caracterización de la Válvula

#### 2.4. Diseño de la tarjeta Interfaz

Después de conocer las especificaciones de la instrumentación de los bancos de refrigeración y de las infraestructuras de control, se dio inicio a la etapa de diseño y desarrollo de la tarjeta interfaz Fig. 4 para el acondicionamiento de las señales existentes. La tarjeta interfaz fue diseñada en la plataforma

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.

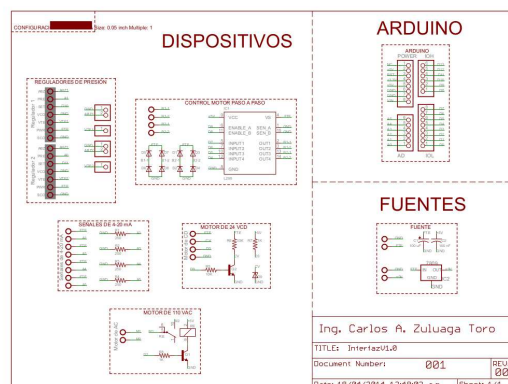


Figura 4. Diseño de la tarjeta interfaz

### 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

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.

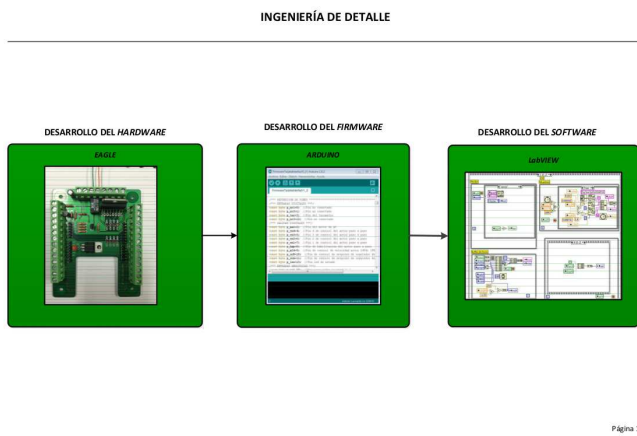


Figura 5. Etapas de implementación de la infraestructura de control

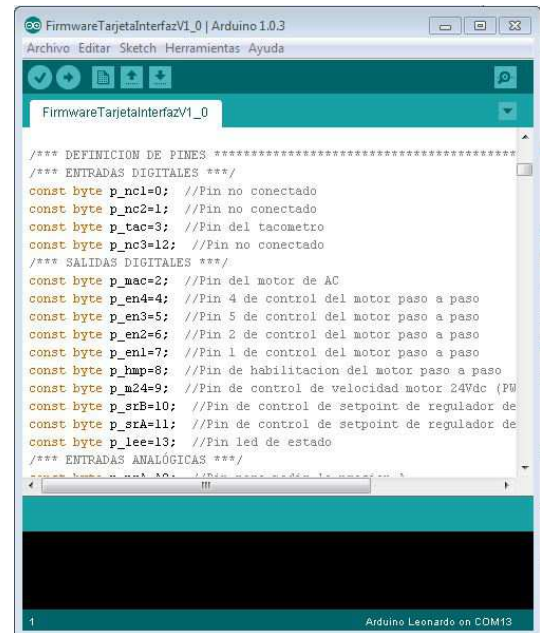


Figura 6. Entorno de desarrollo de Arduino



Figura 7. Interfaz gráfica del Túnel de Viento

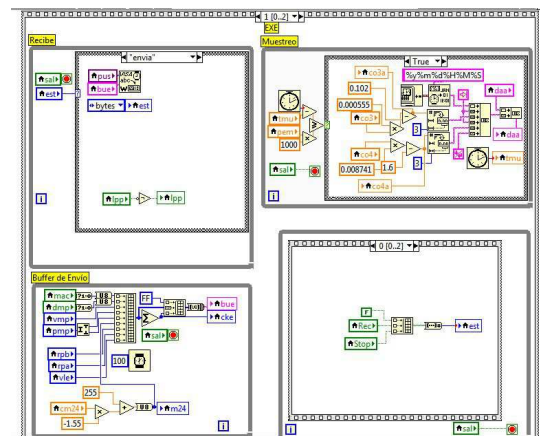


Figura 8. Adquisición de datos en la plataforma de LabVIEW

### 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.

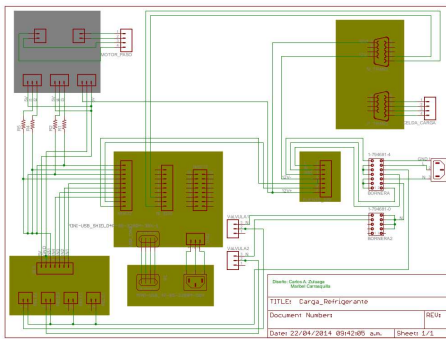


Figura 9. Conexiones Carga de Refrigerante



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.

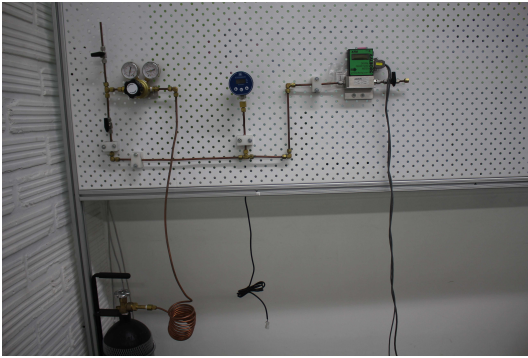


Figura 11. Banco de Caracterización de la Válvula

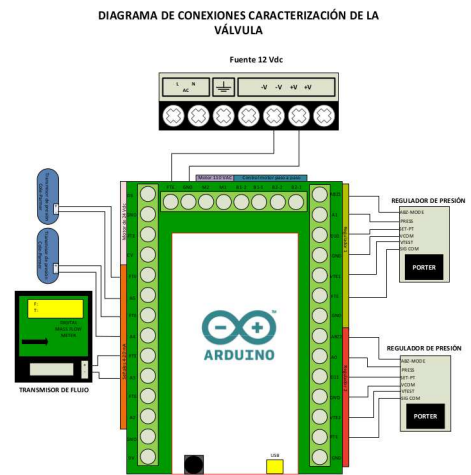


Figura 12. Conexión Caracterización de la válvula

### 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

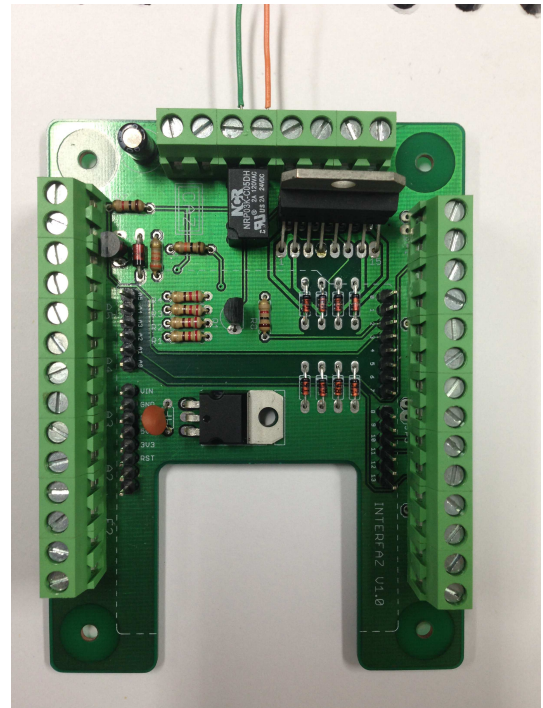


Figura 14. Tarjeta de acoplamiento de señal



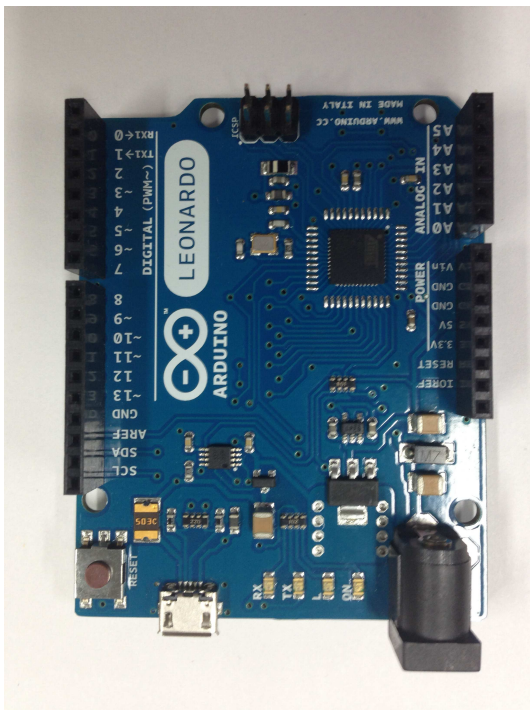


Figura 15. Tarjeta Leonardo de Arduino

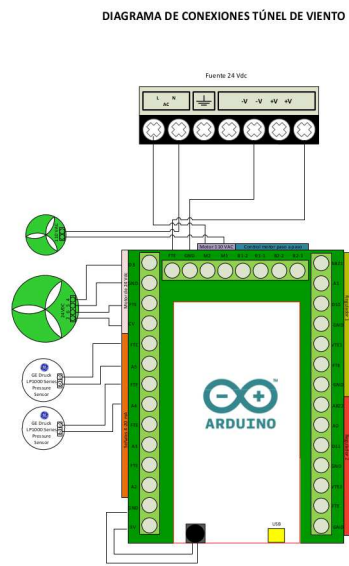


Figura 16. Diagrama de conexión del Túnel de viento

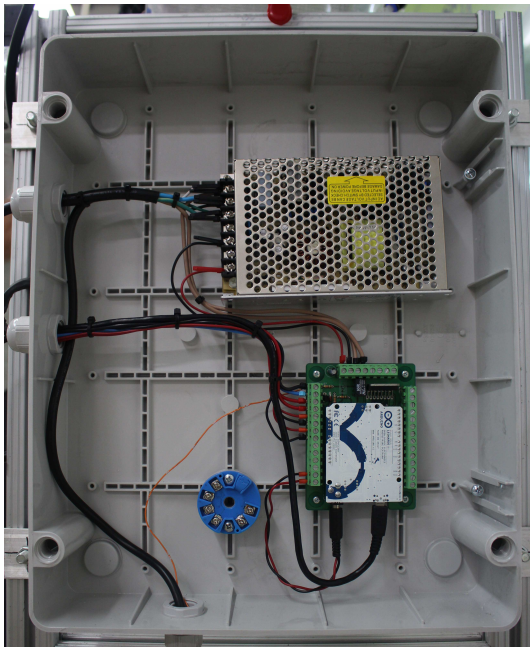


Figura 17. Tablero de Conexión Túnel de Viento

#### 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 ser 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 el alcance 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 proceso 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.

## 7. ANTEPROYECTO

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

**MARIBEL CARRASQUILLA SUÁREZ**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
ESCUELA DE INGENIERÍAS  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA  
MEDELLÍN  
2014**

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

**MARIBEL CARRASQUILLA SUÁREZ**

**Anteproyecto de trabajo de grado para optar al título de Magíster en  
Ingeniería**

**Director  
Carlos Alejandro Zuluaga Toro  
Magíster en Ingeniería**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
ESCUELA DE INGENIERÍAS  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA  
MEDELLÍN  
2014**

## GLOSARIO

**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 de solenoide, dos válvulas de bola, un compresor, un evaporador, un condensador, un tubo capilar, 16 termopares tipo T y dos resistencias térmicas. Las celdas de carga tienen la tarea de realizar la medición de la cantidad de refrigerante que se encuentra en el tanque, y así tomar la decisión de la cantidad de refrigerante que debe ser restringido por la válvula solenoide hacia evaporador en cada prueba.

**Caracterización de la válvula:** este dispositivo está conformado por un motor paso a paso, una válvula solenoide, un evaporador, un compresor y un condensador. Tiene como objetivo encontrar la mejor configuración de motor-válvula respecto a la longitud del tubo capilar. Por medio del motor paso a paso se realiza la apertura de la válvula respectiva, a cierta longitud de tubo capilar requerida para las pruebas. Esta relación apertura válvula-longitud tubo capilar se verifica por medio de tablas.

**Celda de carga:** las celdas de carga son sensores de fuerza, utilizados en equipos de pesaje industrial. Están compuestas de cuatro sensores conectados en configuración de puente de *Wheatstone*. Esta configuración permite obtener un voltaje proporcional a la deformación que sufren los sensores producto de la fuerza aplicada a ellos [1].

**Compresor:** dispositivo empleado para comprimir aire u otro tipo de gases en un sistema de refrigeración, extrae el refrigerante vaporizado del evaporador a una presión relativamente baja y lo comprime, para descargarlo en el condensador [2].

**COP:** *Coefficient Of Performance*, sigla del Inglés. Es la relación entre la energía útil o calor suministrado por la bomba de calor y la energía consumida para hacer funcionar el compresor [3].

**DAQ:** *Data Acquisition*, sigla del inglés. Es el proceso de medición de un fenómeno eléctrico o físico, como tensión, corriente, temperatura, presión, o el sonido. Permite digitalizar, procesar y almacenar variables eléctricas [4].



**Evaporador:** se utiliza para transformar refrigerante de estado líquido a gaseoso. Es en este punto que el enfriamiento se lleva a cabo en forma de calor retirado del aire. [5]

**Hardware:** conjunto de los componentes que integran la parte material de un sistema [6].

**Motor paso a paso:** el motor paso a paso es un actuador o transductor electromagnético incremental que convierte pulsos eléctricos en desplazamientos angulares de un eje. Este motor es en sí mismo un conversor digital-analógico ya que convierte una señal eléctrica digital en un desplazamiento angular del rotor [7].

**POLO:** el laboratorio de Investigación en Refrigeración y Termofísicas POLO fue fundado en 1986 por profesores en el área de Ciencias Térmicas del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Federal de Santa Catarina. El equipo del POLO es reconocido internacionalmente por en el campo de la investigación en compresores y en refrigeración. El POLO posee una sociedad ininterrumpida de más de 25 años con la EMBRACO Compresores, una empresa líder en el área de compresores para la refrigeración domestica y comercial de pequeño porte. Además, se ha establecido otras asociaciones con grandes compañías, tales como Whirlpool, Bosch, Electrolux, Metalfrio, Embraer, WEG y Petrobrás [8].

**Refrigerantes:** los refrigerantes son conocidos como los fluidos de absorción de calor durante la evaporación. Proporcionan un efecto de enfriamiento durante el cambio de fase de líquido a vapor y se utilizan comúnmente en los sistemas refrigeración, aire acondicionado y sistemas de bombas de calor [9].

**Termopar:** un termopar consta de dos conductores eléctricos de diferentes materiales conectados entre sí en un extremo el denominado “punto de medida”. Los dos extremos libres están conectados a un instrumento de medida, por una unión de referencia llamada “unión en frío” [9].

**Tubo capilar:** los tubos capilares son dispositivos de expansión en sistemas de refrigeración pequeños, consisten de una tubería de longitud fija, de diámetro pequeño, instalada entre el condensador y el evaporador de un circuito frigorífico [10].

**Software:** conjunto de programas, instrucciones y reglas informáticas para ejecutar ciertas tareas en una computadora [6].

**Válvula solenoide:** consiste en un dispositivo operado eléctricamente utilizado para el control de flujo de líquidos o gases en posición completamente abierta o completamente cerrada. Su función básica es la misma que una válvula de paso operada manualmente pero, siendo accionada eléctricamente [11].

## **1. PARTICIPANTES**

### **1.1. ESTUDIANTE**

Maribel Carrasquilla Suárez

Cédula: 43.271.055

Teléfono: 4110351

Id: 000030299

E-mail: maribel.carrasquilla@alfa.upb.edu.co

Programa: Maestría en Ingeniería

### **1.2. DIRECTOR**

Director: Carlos Alejandro Zuluaga Toro

Cédula: 98.562.106

Teléfono: 4488388 Opc. 1— Ext. 14113

E-mail: carlos.zuluaga@upb.edu.co

Empresa: Universidad Pontificia Bolivariana

### **1.3. GRUPO DE AUTOMÁTICA Y DISEÑO A+D**

Teléfono: 448 8388

Contacto: Rafael Vásquez

E-mail: rafael.vasquez@upb.edu.co

Empresa: Universidad Pontificia Bolivariana

#### **1.4. GRUPO DE ENERGÍA Y TERMODINÁMICA (GET)**

Teléfono: 448 8388 Opc.1—Ext. 12849

Contacto: César Alejandro Isaza Roldan

E-mail: cesar.isaza@upb.edu.co

Empresa: Universidad Pontificia Bolivariana

## **2. MODALIDAD**

Este trabajo de grado forma parte del proyecto “Desarrollo de un Banco de Ensayos para Refrigeración Doméstica en la Empresa Industrias Haceb S.A.”, pertenece a la modalidad de investigación y está enfocado en el desarrollo de la infraestructura de control que será integrada a los bancos de carga de refrigerante, caracterización de la válvula y túnel de viento. Estos bancos serán desarrollados por el grupo de Energía y Termodinámica (GET) en conjunto con el Grupo de Automática y Diseño (A+D), con el fin de optimizar los procesos de refrigeración, disminuyendo los tiempos de ejecución durante las pruebas y minimizando el consumo energético.

## **3. TEMAS DEL PROYECTO**

El proyecto “Desarrollo de un Banco de Ensayos para Refrigeración Doméstica en la Empresa Industrias Haceb S.A.” tiene dentro de sus objetivos realizar el diseño, construcción y puesta a punto de la infraestructura de control que será implementada en los bancos de ensayo de carga de refrigerante y caracterización de la válvula, diseñados para refrigeradores domésticos. Debido a que el consumo energético en los sistemas

de refrigeración es función de la carga refrigerante y la longitud del tubo capilar, la infraestructura de control desarrollada se verá orientada a estos bancos de ensayo con el fin de encontrar la mejor configuración de estos parámetros que permitan reducir el consumo energético. Las estrategias que se implementarán para desarrollarla, estarán enfocadas en el diseño de algoritmos convencionales y al menos, un algoritmo avanzado de control multivariable, no-lineal, o inteligente, que ayuden a realizar la mejor caracterización.

#### 4. DEDICACIÓN

En la Tabla 1 se observan los porcentajes de dedicación del proyecto.

Tabla 1. Dedicación del proyecto

<b>Tipo</b>	<b>%</b>
Investigación	70
Desarrollo	20
Redacción manual	10

En la Tabla 2 se observan las áreas asociadas al proyecto y el porcentaje de dedicación en cada una de ellas.

Tabla 2. Áreas a trabajar

<b>Área</b>	<b>%</b>
Automática	80
Termodinámica	20

## 5. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El Grupo de Energía y Termodinámica (GET) en conjunto con el Grupo de Automática y Diseño (A+D), se encuentran ejecutando el proyecto “Desarrollo de un Banco de Ensayos para Refrigeración Doméstica en la Empresa Industrias Haceb S.A.”. Este proyecto tiene como objetivo optimizar los procesos en los sistemas de refrigeración doméstica y para tal propósito se requiere implementar la infraestructura de control en los bancos de prueba de carga de refrigerante y caracterización de la válvula, que ayudará a disminuir el consumo energético, mejorando los tiempos de ejecución durante las pruebas y por lo tanto dando solución a problemas tales como:

- Falta de asertividad en las decisiones tomadas durante las pruebas de refrigeración.
- Aumento en las garantías por fallas funcionales en el sistema de refrigeración.
- Poca robustez del sistema de refrigeración.
- Sobredimensionamiento de partes y componentes.
- Aumentos en el consumo de energía.
- Incertidumbre de cómo atacar un problema que se presente durante el proceso.

La infraestructura de control diseñada, deberá ser integrada al dispositivo de carga de refrigerante, el cual entregará las señales de una celda de carga, dos válvulas solenoide, un motor paso a paso, dos termopares tipo T, dos resistencias térmicas, una para el conservador y otra para el congelador. El objetivo es controlar la cantidad de refrigerante que fluye hacia el evaporador por medio de las válvulas solenoide, caracterizando así la dimensión del tubo capilar. Por medio del peso medido con la celda de carga se conocerá la cantidad de refrigerante con la que cuenta el cilindro y que será restringido según sea el requerimiento.

Las señales de temperatura entregadas por los termopares tipo T serán llevadas una tarjeta de adquisición de datos con la cual se realizará un registro de la temperatura durante el proceso. La temperatura de las resistencias que se encuentran en el conservador y el congelador deberá ser controlada de acuerdo con los requerimientos de éste.

En el dispositivo de calibración se tendrán en cuenta las señales de los transmisores de presión, un flujómetro, tres válvulas solenoide, dos reguladores de presión y el motor paso a paso. La idea principal es realizar la calibración del motor para obtener la caracterización de la válvula dependiendo de la longitud del tubo capilar.

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 tener la posibilidad de contar con un banco de ensayo totalmente automatizado en el que se haga posible la evaluación de cada componente de los sistemas de refrigeración de una manera efectiva y científicamente adecuada.

## 6. ESTADO DEL ARTE

El consumo energético de la población mundial se encuentra en constante crecimiento, trayendo como consecuencia la escasez de los recursos naturales, además de generar 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 incluyendo sistemas de control con el fin de atender las demandas de equipos energéticamente eficientes, ambientalmente amigables y más competitivos. El propósito de los sistemas de control en una planta de refrigeración está enfocado en proporcionar un funcionamiento automático donde el control es demasiado complejo para el funcionamiento manual. Estos sistemas mantienen el control de las condiciones que podrían ser alcanzadas por la operación manual, proporcionando máxima eficiencia y economía durante el proceso [12].

Diferentes autores se han encargado de realizar estudios sobre el control de los sistemas de refrigeración, uno de estos estudios se ve enfocado en las ecuaciones de modelización transitoria, ya que son una forma eficiente y económica en el diseño de controladores

para estos sistemas. Existen diferentes métodos para construir el modelo matemático transitorio pero uno de los más populares se realiza con base en la derivación y solución de las ecuaciones de continuidad, energía, y momento. Ye et al. [13] realizaron la parametrización de los componentes de un sistema de refrigeración proporcionando orientación valiosa para el diseño óptimo y el funcionamiento de los sistemas activos. Con este fin también han sido desarrollados modelos para el evaporador, condensador, compresor, tubo capilar por medio de técnicas de simulación. Éstas se desarrollaron, incluyendo la regresión implícita y explícita. El método de cálculo utilizado para obtener las propiedades termodinámicas del refrigerante, estuvo basado en el modelo de metodología de simulación gráfica inteligente y la teoría del método de simulación [14].

Teniendo en cuenta el impacto del consumo energético en los sistemas de refrigeración se han desarrollado diferentes procedimientos de prueba para evaluar las condiciones que hacen que se produzca un menor consumo. El más utilizado ha sido el test de energía internacional ISO 6581:1995 [15], adoptado principalmente por fabricantes de refrigeradores en Europa y América Latina. En general, las pruebas de energía normalizadas requieren que el producto sea probado usando un sistema de control a bordo, que normalmente se compone de un termostato que arranca el compresor y es apagado según un patrón cíclico con el fin de igualar la capacidad de refrigeración a las cargas térmicas del gabinete [16].

Otras de las estrategias implementadas en los sistemas de refrigeración por absorción son controladores de encendido/apagado o estrategias de control proporcional [17], pero los controladores de encendido y apagado conducen a una pérdida significativa durante el periodo de desconexión debido a que se debe reiniciar el proceso y existe una migración de refrigerante durante este ciclo [18], lo que ha hecho que se busque la implementación de diferentes métodos de control y es así como Fernández y Velázquez [17] desarrollaron un estudio paramétrico para obtener resultados de un sistemas de control proporcional, que funcionaba con dos lazos separados. Este sistema mantenía la temperatura constante en el espacio a refrigerar, así como la temperatura óptima en el generador. Los lazos de control proporcional estaban implementados en lazo cerrado y permitían la separación de los dos niveles de presión, evitando de esta manera la migración del refrigerante. Logrando un ahorro de energía gracias a que no se presentaban periodos de reinicio después de las acciones de control.

Debido a que existen diferentes configuraciones y modos de funcionamiento en los sis-



tema de refrigeración, Shao et al. [19] se orientaron en construir un modelo versátil basado en la red del fluido para resolver algunos problemas como la incertidumbre de la dirección de flujo. Para esto se enfocaron en realizar una conexión matriz y describir las relaciones de los distintos componentes de refrigeración. Además de desarrollar un modelo paramétrico distribuido aplicado a los componentes del sistema como intercambiadores de calor y tubos de conexión, ayudando a calcular la distribución del refrigerante y el rendimiento de los circuitos de los intercambiadores de calor.

## 7. OBJETIVOS

### 7.1. GENERAL

Diseñar la infraestructura de control y adquisición de datos de un dispositivo de pruebas para la optimización del consumo energético en equipos de refrigeración doméstica, a partir de la modificación de la carga de refrigerante y la longitud de tubo capilar.

### 7.2. ESPECÍFICOS

- Elaborar la ingeniería conceptual del sistema de control de los equipos de caracterización de tubo capilar y carga de refrigerante para un banco de ensayos de refrigeración doméstica, de modo que se defina un conjunto de especificaciones deseables para los equipos, tomando como base los bancos de ensayos desarrollados en POLO (Brasil).
- Elaborar un diseño básico en el que se seleccionen, dimensionen e integren los diferentes componentes del sistema de control de los equipos de Carga de Refrigerante, Caracterización de la Válvula y Túnel de Viento, para los bancos de ensayos de refrigeración doméstica.
- Elaborar la ingeniería de detalle del sistema de control de los equipos Carga de

Refrigerante, Caracterización de la Válvula y Túnel de Viento para los bancos de ensayos de refrigeración doméstica, de modo que permita la implementación completa y exitosa del sistema de control.

- Poner en funcionamiento un algoritmo de control básico y avanzado para uno de los equipos del banco de ensayos.

## 8. METODOLOGÍA

Este trabajo de grado tiene como objetivo la investigación y desarrollo de la infraestructura de control, para los bancos de ensayo de refrigeración doméstica pertenecientes al proyecto “Desarrollo de un Banco de Ensayos para Refrigeración Doméstica en la Empresa Industrias Haceb S.A.”. Para dar inicio a este proceso, se deberá realizar:

- Un estado del arte del control de los equipos de ensayo para longitud de tubo capilar y carga refrigerante, esto permitirá tener una idea clara de los pasos a seguir en el momento del diseño de los controladores y la optimización de los sistemas.
- Teniendo una visión global del estado del arte del control de los sistemas de refrigeración, se elaborará un listado de especificaciones deseables para los equipos que serán utilizados en los bancos de pruebas, teniendo como referencia los bancos de ensayo desarrollados en el POLO (Brasil).
- Se realizará la selección de un sistema de adquisición de datos, quien se encargará de realizar el acoplamiento de señal de los componentes y la adquisición de datos durante las pruebas.
- Teniendo en cuenta las especificaciones de los dispositivos de los bancos de ensayos, se realizará un diseño básico de los componentes de los equipos, en el que se incluye dimensionamiento, configuración, integración y disposición final.
- El diseño básico dará paso a la elaboración de un diseño, consistente en la recopilación de la documentación necesaria para realizar la construcción del *hardware*.
- La fase final estará orientada a ajustes del sistema.

## 9. JUSTIFICACIÓN Y BENEFICIOS

Este proyecto será de gran apoyo durante las fases de prueba de los bancos de refrigeración del proyecto “Desarrollo de un Banco de Ensayos para Refrigeración Doméstica en la Empresa Industrias Haceb S.A.”. Con el diseño de la infraestructura de control y la interfaz de monitoreo se podrá tener una idea clara del impacto que tendrá la optimización de las variables utilizadas en los sistemas de refrigeración. Aumentando el desempeño de éstos, se mejorarán los tiempos de ejecución durante las pruebas y se optimizará la toma de datos, obteniendo como beneficio la reducción del consumo energético y de esta manera la posibilidad de entregar a la sociedad productos que cuenten con mayor eficiencia energética.

## 10. ALCANCES

Al finalizar este proyecto se deben entregar los siguientes productos:

- Trabajo de grado en el que se documente el proceso de diseño de la infraestructura de control.
- Interfaz de usuario realizada en la plataforma de LabVIEW que permita el monitoreo de las variables del sistema y la futura implementación de estrategias de control.
- Artículo entregable con el diseño de la infraestructura de control.

## 11. PRESUPUESTOS Y RECURSOS NECESARIOS

En la Tabla 3 se detalla el presupuesto necesario para el desarrollo del proyecto.

Tabla 3. Presupuesto necesario para el desarrollo del proyecto

Recurso	Participación ( miles de pesos)				Implica desembolso	
	Estudiante	UPB	Externo	Donación	Si	No (existe)
Bibliografía						
Papelería						
Telecomunicaciones						
Equipos						10'000.000
Transporte						
Asistencia Eventos						
Gastos representación						
Trabajo 7000/h	6'000.000					6'000.000
Trabajo director 9300/h	4'000.000					4'000.000
<b>SUBTOTAL</b>						20'000.000
<b>IMPREVISTOS(10%)</b>						2'000.000
<b>TOTAL</b>						22'000.000
<b>GRAN TOTAL</b>						22'000.000

## 12. CRONOGRAMA

El proyecto tendrá una duración de 21 meses contados a partir de 11 de Marzo 2013, en la Fig. 1 se observa el cronograma del proyecto, en donde se especifican las labores a realizar y los tiempos de ejecución de cada una de ellas.

		Fecha de inicio 11/03/2013													
		Semana													
		0	4	8	12	16	20	24	28	32	44	64	74	84	
Item	Actividades	11/03/2013	11/04/2013	11/05/2013	11/06/2013	11/07/2013	11/08/2013	11/09/2013	11/10/2013	11/11/2013	11/02/2014	11/07/2014	11/09/2014	11/12/2014	
1	Estado del arte del control de sistemas de refrigeración	■	■												
2	Formulación y Entrega del anteproyecto			■	■	■									
3	Documentación de los equipos asociados al proyecto				■	■	■	■	■						
4	Diseño de diagramas del proceso		■	■											
5	Recolección de la información para la construcción de la infraestructura de control				■	■	■	■	■						
6	Balance de energía de refrigeradores domésticos										■	■			
7	Contrucción de las infraestructuras de control										■	■	■	■	
8	Puesta a punto de las Infraestructuras de control											■	■	■	
9	Redacción del trabajo											■	■	■	

Figura 1. Cronograma de actividades del proyecto

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. Rocha, C. Couto, and J. Correia, “Smart load cells: an industrial application,” *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 85, no. 143, pp. 262 – 266, 2000. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924424700004155>
- [2] D. de arquitectura y construcción. (2013, June) Definiciones. [Online]. Available: <http://www.parro.com.ar/definiciondeevaporador>
- [3] R. Luken and T. Grof, “The montreal protocol’s multilateral fund and sustainable development,” *Ecological Economics*, vol. 56, no. 2, pp. 241 – 255, 2006. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921800905000960>
- [4] N. Instrument. (2013, June) Daq. [Online]. Available: <http://www.ni.com/labview>
- [5] E. Dictionaries. (2013, November) Evaporator. [Online]. Available: [http://www.engineering-dictionary.org/evaporator\\_](http://www.engineering-dictionary.org/evaporator_)
- [6] R. A. de la Lengua Española. (2013, June) Definición software. [Online]. Available: <http://buscon.rae.es/draeI/html/cabecera.htm>
- [7] O. L. Moscon. (2013, June) Máquinas e instalaciones eléctricas. [Online]. Available: <http://www.ing.unp.edu.ar/asignaturas/maqeinstelectricas/MOTOR>
- [8] POLO. (2013, November) Institucional. [Online]. Available: <http://www.polo.ufsc.br>
- [9] I. Dincer and M. Kanoglu, *Refrigeration systems and applications*, 2nd ed. Wiley, 2010.
- [10] Frioline. (June2013) Tubo capilar. [Online]. Available: <http://frionline.net/articulos>

- [11] Ferroneumatica. (2013, June) Válvulas solenoides. [Online]. Available: <http://www.ferroneumatica.com.co/2009/04/29/valvula-solenoides/>
- [12] A. Trott and T. Welch, “31 control systems,” in *Refrigeration and Air Conditioning (Third Edition)*, third edition ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000, pp. 324 – 332. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article>
- [13] X. Ye, J. Chen, and G. Lin, “Parametric optimization of a new combined refrigeration cycle active thermal potentiostating system,” *International Journal of Refrigeration*, vol. 30, no. 6, pp. 995 – 1003, 2007. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140700707000096>
- [14] G. liang Ding, “Recent developments in simulation techniques for vapour-compression refrigeration systems,” *International Journal of Refrigeration*, vol. 30, no. 7, pp. 1119 – 1133, 2007. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140700707000357>
- [15] *ISO 6581-1995 Household frost-free refrigerating appliances – Refrigerators, refrigerator-freezers, frozen food storage cabinets and food freezers cooled by internal forced air circulation – Characteristics and test methods*, ISO Std.
- [16] C. J. Hermes, C. M. J. B. Melo, and F. T. Knabben, “Alternative test method to assess the energy performance of frost-free refrigerating appliances,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 50, no. 1, pp. 1029 – 1034, 2013. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431112005170>
- [17] J. Fernandez-Seara and M. Velazquez, “Study and control of the optimal generation temperature in nh<sub>3</sub>-h<sub>2</sub>o absorption refrigeration systems,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 21, no. 3, pp. 343 – 357, 2001. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S135943110000478>
- [18] J. Wang and Y. Wu, “Start-up and shut-down operation in a reciprocating compressor refrigeration system with capillary tubes,” *International Journal of Refrigeration*, vol. 13, no. 3, pp. 187 – 190, 1990. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0140700790900747>

- [19] S. Shao, W. Shi, X. Li, and Q. Yan, "Simulation model for complex refrigeration systems based on two-phase fluid network part i: Model development," *International Journal of Refrigeration*, vol. 31, no. 3, pp. 490 – 499, 2008. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140700707001247>