

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE AUTOMATIZACIÓN DEL CONTROL DE UNA MÁQUINA DE SECADO DE ALIMENTOS (LIOFILIZADOR STOKES) DEL DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE ALIMENTOS Y BIOTECNOLOGÍA “DECAB” DE LA ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL (EPN)

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN
ELECTRÓNICA Y CONTROL**

**OCAMPO JIMÉNEZ FRANKLIN OLMEDO
(franklinocampo@hotmail.com)**

**DIRECTOR: ING. PABLO F. PÓLIT, M.Sc
(pablo.polit@epn.edu.ec)
CO-DIRECTOR: DR. LUIS CORRALES
(luis.corrales@epn.edu.ec)**

Quito, Mayo 2011

DECLARACIÓN

Yo, **OCAMPO JIMENEZ FRANKLIN OLMEDO**, declaro bajo compromiso que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

Franklin Olmedo Ocampo Jiménez

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por Franklin Olmedo Ocampo Jiménez, bajo nuestra supervisión.

Ing. Pablo F. Pólit, M.Sc
DIRECTOR DEL PROYECTO

Dr. Luis Corrales
CO-DIRECTOR DEL PROYECTO

DEDICATORIA

De todo corazón para mi hermana Gladys Ocampo por haberme brindado su apoyo moral y económico para poder culminar mi carrera, confianza, ayuda y comprensión necesarias para vencer adversidades presentadas en las etapas de mi vida estudiantil.

Con todo amor para la mujer más grande que he podido tener en el transcurso de mi vida, a mi madre María Baltazara Jiménez Barreros, que ha sido la madre más comprensiva y bondadosa con todos sus hijos. Gracias por proporcionarme todo tu apoyo incondicional en las diferentes etapas presentadas en mi vida y a todos mis hermanos quienes me motivaron a seguir adelante en el transcurso de mi aprendizaje.

Ocampo Jiménez Franklin

Autor

AGRADECIMIENTO

Todo mi agradecimiento es en primer lugar a Dios por brindarme la oportunidad de cumplir mis objetivos y a mi querida familia que me acompañó para poder obtener una profesión, al personal del Departamento de Ciencias de Alimentos y Biotecnología "DECAB", principalmente al Ing. Pablo Pólit y al Dr. Luis Corrales por su generosa colaboración y ayuda para cumplir con la realización de este trabajo y mis compañeros de aulas Paul Canseco, Andrés Caicedo, Diego Obando y todos mis compañeros que no están en esta lista pero están en mi corazón, por su motivación y colaboración para terminar esta carrera.

A la Escuela Politécnica Nacional por haberme brindado los conocimientos necesarios y permitirme estar en los registros de los mejores profesionales del Ecuador.

Ocampo Jiménez Franklin

Autor

CONTENIDO

CONTENIDO	vi
RESUMEN	ïix
PRESENTACIÓN	x
CAPÍTULO 1	1
ESTUDIO DE LA LIOFILIZACIÓN	1
INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVO	1
1.3 DEFINICIONES BÁSICAS	1
1.3.1 LIOFILIZACIÓN	1
1.3.2 FUNDAMENTOS DE LA LIOFILIZACIÓN	3
1.3.3 LA CONGELACIÓN DEL MATERIAL	3
1.3.4 EL SECADO POR SUBLIMACIÓN	4
1.3.5 CICLO DE LIOFILIZACIÓN	6
1.3.6 LIOFILIZADORES INDUSTRIALES	8
1.3.7 APLICACIÓN DE LA LIOFILIZACIÓN	11
1.4 PRESIÓN	11
1.4.1 PRESIÓN ATMOSFÉRICA	11
1.4.2 PRESIÓN MANOMÉTRICA	12
1.4.3 PRESIÓN ABSOLUTA	12
1.4.4 PRESIÓN RELATIVA	13
1.4.5 PRESIÓN DE VACÍO	13
1.5 SENSORES PARA MEDIR TEMPERATURA	14
1.5.1 TERMOCUPLAS	15
1.5.2 RTD Pt-100	19
1.6 INTRODUCCIÓN AL CALOR	21
1.6.1 CONDUCCIÓN	21
1.6.2 CONVECCIÓN	22
1.6.3 RADIACIÓN	22
1.7 REFRIGERACIÓN	22
1.7.1 EL PROCESO DE REFRIGERACIÓN	23
1.7.2 CICLO MECÁNICO DE REFRIGERACIÓN	23
1.7.3 COMPONENTES DE REFRIGERACIÓN	24
1.8 PROPUESTA DE DISEÑO	25

CAPÍTULO 2.....	27
DISEÑO DEL HARDWARE DEL SISTEMA	27
2.1 INTRODUCCIÓN.....	27
2.2 DISEÑO DE LOS CIRCUITOS ACONDICIONADORES DE SEÑAL.....	28
2.2.1 DISEÑO DEL CONTROL DE LA NIQUELINA	28
2.2.2 DISEÑO DEL ACONDICIONAMIENTO DEL RTD	42
2.2.3 SENSOR DE VACÍO.....	45
2.3 SELECCIÓN DE LA FUENTE PARA EL SENSOR DE VACÍO	47
2.4 FUENTE DE PODER.....	47
2.5 DIAGRAMA DEL CIRCUITO ELECTRICO LIOFILIZADOR	49
CAPÍTULO 3.....	51
DISEÑO DEL SOFTWARE DEL SISTEMA.....	51
3.1 DESARROLLO DE LA INTERFAZ HOMBRE-MÁQUINA (HMI).....	51
3.1.1 PROGRAMA LABVIEW	51
3.3.2 DESARROLLO DE LA HMI.....	59
3.3.3 CREACIÓN DE UN PAQUETE EJECUTABLE EN LABVIEW	65
3.3.4 DIAGRAMA DE FLUJO DE LA HMI	65
3.2 DESARROLLLO DEL PROGRAMA DEL PIC 16F873A PARA EL CONTROL POR CICLO INTEGRAL.....	67
CAPÍTULO 4.....	70
PRUEBAS Y RESULTADOS	70
4.1 PRUEBAS DE TEMPERATURA DEL PRODUCTO	70
4.2 PRUEBAS DE TEMPERATURA DE REFRIGERACIÓN DE LA CÁMARA DE CONDENSACIÓN	72
4.3 PRUEBAS DE TEMPERATURA DEL ACEITE CIRCULANTE POR LAS PLACAS DE CALENTAMIENTO	74
4.4 PRUEBAS DE PRESIÓN DE VACÍO DE LA CÁMARA DE CONDENSACIÓN	75
4.5 PRUEBAS EN LA HMI.....	77
4.5.1 AJUSTES PREVIOS.....	77
4.5.2 TRABAJO HMI.....	78
4.5.3 REGISTRO DE ANALISES DE RESULTADOS	80
4.6 POSIBILIDADES DE REEMPLAZAR LA BALANZA MECÁNICA POR UNA ELECTRÓNICA	82
4.6.1 BALANZAS DE PRECISIÓN XA	83
4.6.2 BALANZA ELECTRONICA MICROWEIGH.....	84
4.7 MANTENIMIENTO.....	85

4.7.1 MANTENIMIENTO CORRECTIVO	85
4.7.2 MANTENIMIENTO PREVENTIVO	85
4.7.3 PROGRAMA DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO DE LAS INSTALACIONES DEL LIOFILIZADOR "STOKES"	86
CAPÍTULO 5.....	88
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	88
5.1 CONCLUSIONES.....	88
5.2 RECOMENDACIONES.....	89
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91
ANEXOS.....	92
ANEXO 1: AD620	93
ANEXO 2: IRFP450	100
ANEXO 3: PIC16F873A.....	104
ANEXO 4: NI USB-6009	113
ANEXO 5: MANUAL DE USUARIO.....	128

RESUMEN

En la planta Piloto del “DECAB”, existe una maquina Liofilizador Stokes, para realizar procesos de liofilización. El control del calentamiento del aceite que circula por las placas radiantes era un equipo ON-OFF poco eficiente para mantener la temperatura constante a un punto determinado, y no contaba con registros de temperatura del producto, temperatura del proceso de refrigeración y presión de vacío, datos importantes para tener un proceso adecuado.

Para solventar estos problemas se diseñó e implementó una caja de control electrónico, con las siguientes características:

Los sensores utilizados en este proyecto son de tipo industrial, termocupla y RTD's, los mismos que detectan señales muy bajas en las escalas de milivoltajes, estas señales son amplificadas mediante dispositivos electrónicos, para poder realizar el control de la temperatura del aceite circulante por las placas de calentamiento y registro de los datos de la temperatura del producto, temperatura de refrigeración y presión de vacío, variables de gran importancia en el proceso.

Para el control de la temperatura del aceite se implementó un control por ciclo integral, permitiendo controlar periodos completos de la onda senoidal, y lograr disminuir la gran parte de los armónicos presentados en la red, que afectan en gran parte a los dispositivos electrónicos.

Para realizar la interface de comunicación se utilizó una tarjeta de adquisición de datos de National Instrument USB 6009, porque facilita la comunicación del HMI. Los registros datos de la temperatura del producto, temperatura de refrigeración y presión de vacío son guardados en un archivo para ser analizados posteriormente.

En conclusión se determino que el control implementado es eficiente en mantener estable la precisión de la temperatura al punto determinado, se logra con facilidad tener registro de temperatura del producto automáticamente y registro del peso manualmente por el operario, por medio de un archivo de Excel, y se tiene las graficas del proceso en tiempo real.

PRESENTACIÓN

El presente proyecto tiene por objetivo automatizar el control de temperatura de la niquelina que calienta el aceite, y registro de las variables de temperatura del producto, sistema de refrigeración y presión de vacío del liofilizador Stokes.

El presente trabajo se encuentra estructurado en cinco capítulos, los cuales se detalla a continuación:

En el Capítulo 1 se describen la teoría del proceso de liofilización y los sensores utilizados en el proyecto.

En el Capítulo 2 se detallan la implementación del control por ciclo integral mediante Mosfet de potencia, los acondicionamientos del termopar J, RTD's y las fuentes de corriente.

En el Capítulo 3 se describen las características del HMI mediante el software computacional Labview, y el programa para control por ciclo integral mediante Micro Code Studio.

En el Capítulo 4 se reportan las pruebas y resultados, que comprueban la validez del sistema diseñado. Se incluye un programa de mantenimiento y la posibilidad de instalar una balanza electrónica.

En el Capítulo 5 se mencionan las conclusiones y recomendaciones del proyecto.

CAPÍTULO 1

ESTUDIO DE LA LIOFILIZACIÓN

INTRODUCCIÓN

En la planta Piloto del Departamento de Ciencias de Alimentos y Biotecnología (DECAB) de la Escuela Politécnica Nacional (EPN), existe una máquina “LEOFILIZADOR STOKES”, para realizar procesos de liofilización, el mismo que fue adquirido dentro del programa UNESCO por el año 1964, actualmente se encuentra en un funcionamiento normal. El control de la temperatura de las placas de calentamiento se realizaba mediante un control ON-OFF, las variables de proceso: temperatura de refrigeración, presión de vacío y peso de la muestra se registraban manualmente y no existía medida de la temperatura del producto.

OBJETIVO

Realizar el diseño e implementación de la automatización del control de una máquina secadora de alimentos (Liofilizador Stokes) del Departamento de Ciencias de Alimentos y Biotecnología “DECAB” de la Escuela Politécnica Nacional (EPN) con visualización a través de una interface HMI (interface Hombre-Máquina).

1.3 DEFINICIONES BÁSICAS

1.3.1 LIOFILIZACIÓN

Es una forma de desecado en frío que sirve para conservar sin daño los más diversos materiales biológicos. El producto se conserva con muy bajo peso y a

temperatura ambiente y mantiene todas sus propiedades al rehidratarse. En el proceso, primero se congela el material, y luego el hielo se elimina por sublimación. En la Figura 1.1 se observa frambuesas liofilizadas que mantienen forma y color.



Figura 1.1 Ejemplo de secado de frambuesas.

Esta es una técnica de secado basada en sublimación que se ha desarrollado con el fin de reducir las pérdidas de los compuestos responsables del sabor y el aroma en los alimentos, los cuales se afectan en gran medida durante los procesos convencionales de secado.

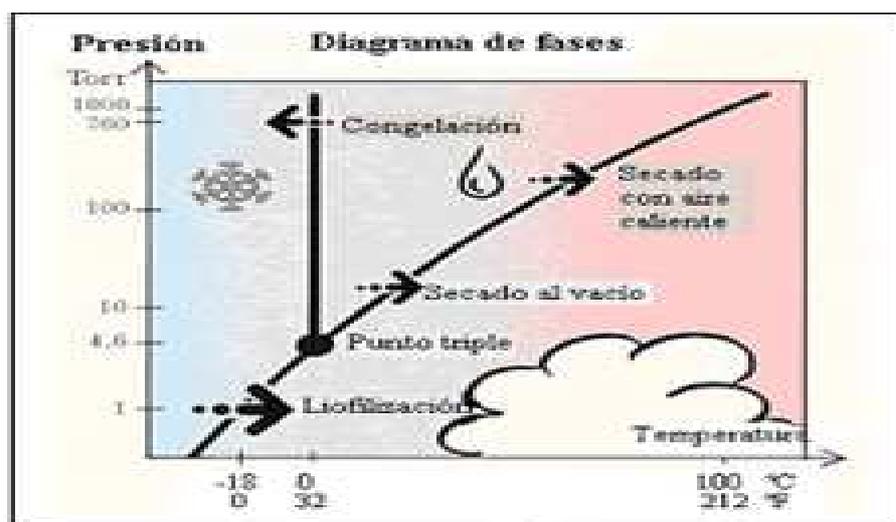


Figura 1.2 Diagrama de fases de agua y sistema de secado.

1.3.2 FUNDAMENTOS DE LA LIOFILIZACIÓN

Este proceso consta de varias etapas: Congelación a bajas temperaturas, secado por sublimación del hielo del producto congelado, generalmente a muy baja presión y almacenamiento del producto seco en condiciones controladas.

Al liofilizar un material se lo almacena por períodos muy largos, con reducciones muy bajas de sus características organolépticas, físicas, químicas y biológicas.

En esta etapa se considera tres variables de operación importantes: el vacío en el interior de la cámara de secado, el flujo de energía radiante aplicado al alimento, y la temperatura del condensador. La velocidad inicial de secado es alta, debido a que la resistencia a los flujos de masa y energía son pequeñas, esta velocidad empieza a decaer debido a que existe una pequeña capa alrededor del producto congelado y esta capa sirve de aislante y afecta a la transmisión de calor hacia el frente del hielo, como se detalla en la siguiente Figura 1.3.

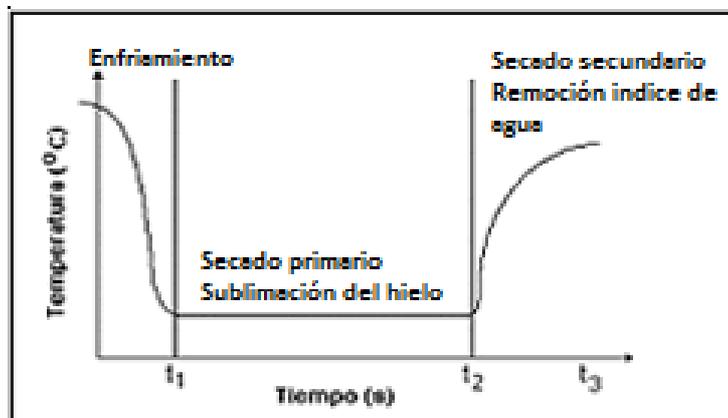


Figura 1.3 Pasos del proceso de liofilización.

1.3.3 LA CONGELACIÓN DEL MATERIAL

Cada producto debe congelarse de una manera tal que garantice que sufrirá pocas alteraciones en el proceso posterior de sublimación. Para lograr esto se debe conocer con precisión las siguientes variables:

- La temperatura en la que ocurre la máxima solidificación.
- La velocidad óptima de enfriamiento.
- La temperatura mínima de fusión incipiente.

Se busca que el producto ya congelado tenga una estructura sólida sin intersticios en los que haya líquido concentrado para propiciar que todo el secado ocurra por sublimación.

1.3.4 EL SECADO POR SUBLIMACIÓN

En esta técnica se usan bajas presiones porque en tales condiciones es mucho más eficiente el proceso difusivo. El paso de hielo a vapor requiere gran cantidad de energía que, suministrada en alto vacío, hace que la interface de secado se mueva hacia el interior de la muestra. El calor tiene que atravesar capas congeladas (sistemas liofilizados en bandeja, sin granular) o secas (en granulados), generándose un considerable riesgo de fusión del material intersticial o quemar la superficie del producto que ya está seco.

En esta etapa se debe considerar tres variables de diseño importantes: el vacío en el interior de la cámara de secado, el flujo de energía radiante aplicado al alimento, y la temperatura del condensador. La velocidad inicial de secado es alta, debido a que la resistencia a los flujos de masa y energía son pequeñas, esta velocidad empieza a decaer debido a que existe una pequeña capa alrededor del producto congelado y esta capa sirve de aislante y afecta a la transmisión de calor hacia el frente del hielo.

Cuando se realiza el secado mediante la liofilización se distinguen tres fases o etapas que se esquematizan en la Figura 1.4.

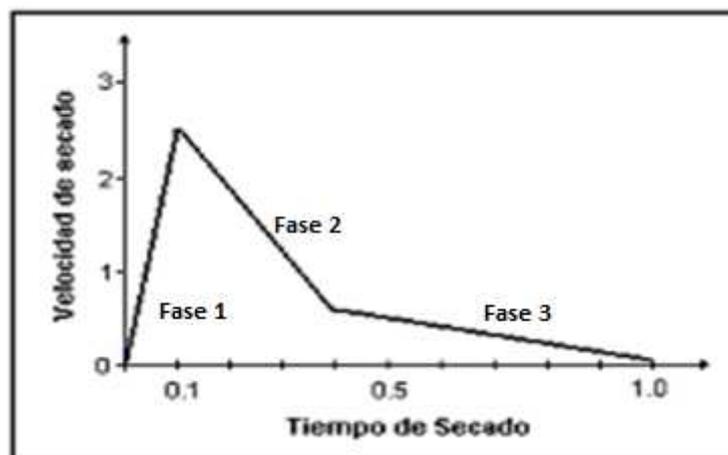


Figura 1.4 Etapas del proceso de liofilización.

Cuando se inicia el proceso de liofilización empieza a formarse un frente de sublimación o interface entre la capa seca y la capa congelada de la muestra el cual avanza progresivamente. Para un determinado instante, a una temperatura de interface (T_S) le corresponde una determinada Presión de saturación (P_i).

1.3.4.1 Las Tres Fases Que Se Distinguen Son:

1.3.4.1.1 Etapa Conductiva

Inicialmente, la velocidad de sublimación crece rápidamente hasta llegar a un máximo. El tiempo para agotar esta fase es relativamente corto; en ella se lleva a cabo la mayor parte de remoción de agua del producto (entre un 75-90%), siendo el mecanismo preponderante la transferencia de calor por conducción.

1.3.4.1.2 Primera Etapa Difusiva

La velocidad de sublimación continúa decreciendo de forma que se aproxima a cero. Esto debido a que el calor necesario para retirar el agua ligada es más alto que el calor de sublimación. Puesto que la difusividad de los aromas disminuye sensiblemente cuando la humedad es pequeña (fase 3), es posible en esta etapa incrementar la temperatura de calefacción y del producto hasta valores del orden de 50°C, dependiendo del material que se trate ¹[Victorio Torrecilla].

¹<http://es.scribd.com/doc/16404179/LiofilizaciF3n>

1.3.4.2 Almacenamiento

Los productos liofilizados y adecuadamente empacados, pueden ser guardados por largos periodos de tiempo ya que en buena medida retienen las propiedades físicas, químicas, biológicas y organolépticas iniciales. La liofilización, reduce las pérdidas de calidad debidas al deterioro por reacciones químicas, causado por degradación enzimática y no enzimática. Sin embargo, la oxidación de lípidos, inducida por los bajos niveles de humedad a los que lleva el producto durante el secado, es un problema a considerar para los productos liofilizados. Las reacciones de oxidación de lípidos se controlan empacando los productos liofilizados en recipientes impermeables al oxígeno. La degradación no enzimática es evitada por la rápida transición de alto a bajo contenido de humedad. El uso de rangos bajos de temperatura también evita la desnaturalización de proteínas en los productos liofilizados.

1.3.5 CICLO DE LIOFILIZACIÓN

La liofilización es cíclica y sus fases son las siguientes:

- Pre-tratamiento del producto
- Hacer el vacío en el Liofilizador
- Sublimación (deseccación primaria)
- Desorción (deseccación secundaria)
- Ruptura del vacío.

1.3.5.1 Pre-Tratamiento Del Producto

En esta etapa es importante reducir al máximo el tiempo de secado ya que el proceso de liofilización es una operación muy costosa. En el caso presente, como es un producto solido, se puede disminuir el tiempo de secado dividiendo su volumen (raspado, cortado, triturado, etc.) con el fin de aumentar la superficie de transferencia. Si se trata de un producto líquido el objetivo es eliminar la mayor cantidad de agua posible porque se efectúa una pre-concentración. Antes de la liofilización los productos tratados deben ser congelados.

1.3.5.2 Vacío

El vacío tiene como objetivo disminuir los riesgos de fusión del hielo y acelerar el secado. Este tipo de proceso se lo realiza mediante una bomba de vacío y el tiempo prudencial para realizar el vacío es de 10 a 15 minutos. También es importante trabajar a presiones bajas, del orden de 0,3 a 1 Torr, o incluso más bajas.

1.3.5.3 Sublimación

En esta etapa el objetivo es eliminar el agua del producto que pasa de hielo a vapor. Se producirá simultáneamente transferencia de calor hacia el producto y transferencia de materia desde el producto. La temperatura debe ser mantenida lo suficientemente baja para evitar derretir los cristales de hielo presentes, por lo que la aplicación de calor de sublimación debe ser cuidadosamente controlada.

1.3.5.4 Desorción

Todo el hielo desaparece durante la sublimación y el agua restante se encuentra en forma de agua ligada. Por eso se procede a una evaporación a vacío manteniendo la misma presión durante el proceso de sublimación, pero a temperaturas positivas, superiores a 20 °C pudiendo llegar incluso a 60 °C. Con este proceso se logra mantener el aroma de los productos.

1.3.5.5 Ruptura Del Vacío

Con el fin de recuperar la presión atmosférica en la cámara de secado, se abre una válvula que permite reducir progresivamente el vacío. Ya que el producto liofilizado tiene un elevado poder de adsorción, se rompe el vacío con un gas neutro: nitrógeno o dióxido de carbono.

1.3.6 LIOFILIZADORES INDUSTRIALES

Los liofilizadores industriales consisten en una cámara con bandejas conectadas a un condensador y una bomba de vacío. En las bandejas se introduce el producto congelado, se cierra la cámara y se hace el vacío, se procede con el secado durante el tiempo especificado para el ciclo. Al final se saca el producto de la cámara y se lo envasa.

La liofilización requiere un alto vacío en la cámara de secado ya que la presión del vapor del hielo es considerablemente menor que la presión atmosférica. Durante la práctica este método de deshidratación se lleva a cabo normalmente en el rango de temperaturas de -10 a -40°C con presiones correspondientes de 5 a 0,05 Torr. En la Figura 1.5 se detalla el liofilizador Stokes del DECAB.

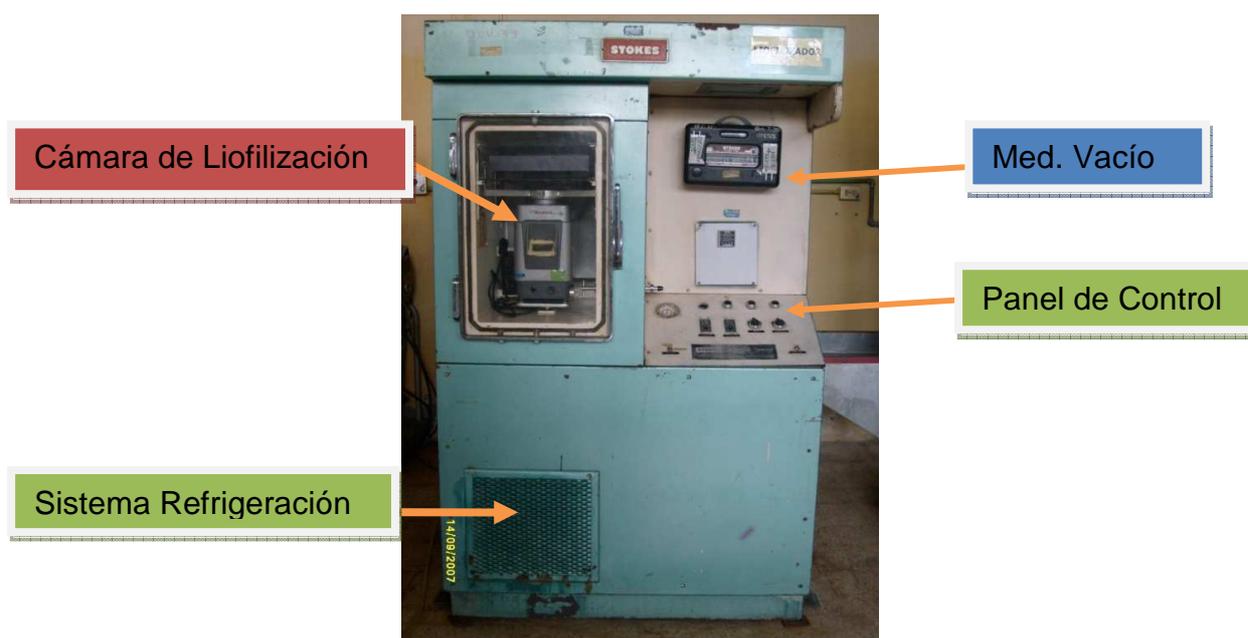


Figura 1.5 Foto del Liofilizador DECAB.

El proceso de liofilización comprende los siguientes elementos que son básicos para el proceso:

1. Cámara de vacío que incluye una fuente de calor para la sublimación y, en algunos casos, una fuente de frío para congelar las muestras.

2. Sección de remoción de vapor, conectada a la cámara de vacío y a una bomba de vacío como se demuestra en la Figura 1.6.

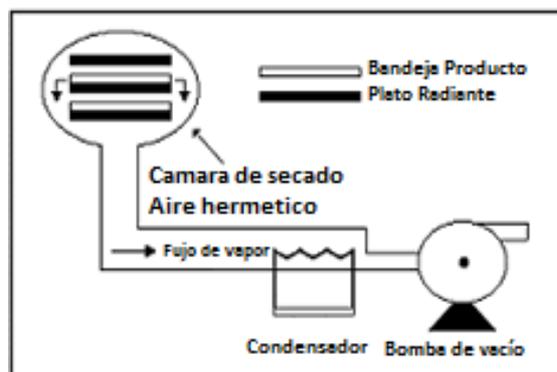


Figura 1.6 Sistema Básico de liofilización.

Cuando la presión en la cámara liofilizadora es baja, por acción de una bomba de vacío, el hielo cede vapor de agua muy lentamente y desaparece después de algún tiempo. Puesto que la temperatura no sube en ningún momento, como para descongelar el producto, no existe la posibilidad de la acción disolvente del agua, quedando al finalizar una estructura microporosa muy liviana, formada por aquellos elementos que no eran agua y ocupando los mismos lugares cuando comenzó la congelación en su estructura molecular.

La variable más importante del proceso es la presión: su incremento aumenta la transferencia de calor a expensas de una mayor resistencia a la transferencia de masa.

Otra condición importante es la temperatura de las placas calefactoras que afecta la velocidad de la transferencia de calor de la superficie del material congelado.

La temperatura del condensador es otra variable a controlar porque afecta la fuerza impulsora de la presión de vapor de agua para la transferencia de masa.

Hay limitaciones importantes en las temperaturas de la superficie y de la interface del material. Los parámetros de operación mencionados deben garantizar que ninguna de estas dos temperaturas supere los valores críticos del material a secar durante el período de liofilización.

Existen tres variables importantes para diseño en el proceso de liofilización:

- El nivel de vacío en el interior.
- El flujo de energía radiante aplicado al producto.
- La temperatura del condensador.

A partir del diagrama de fases de la Figura 1.2, se observa que para sublimar el agua es necesario realizar el proceso a unas condiciones de presión y temperatura por debajo del punto triple del agua ($P = 4.6$ Torr y $T=0^{\circ}\text{C}$). Para el caso de los alimentos líquidos congelados se exige además que la temperatura del producto no sobrepase la temperatura eutéctica de la solución, pues de otro modo el producto se fundiría.

La relación entre la presión de vapor de hielo y la temperatura por debajo del punto triple se muestra en la Figura 1.7. Teóricamente la presión del agua contenida en los alimentos como hielo es igual a su presión de vapor, sí existe un equilibrio ² [Pierre Mafart, 1994].

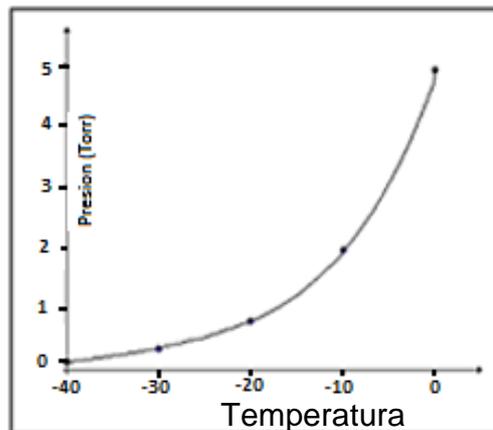


Figura 1.7 Presión de vapor del hielo.

Fijadas estas condiciones iniciales, para extraer el agua del sistema se suministra el calor latente de sublimación del hielo por algún medio (conducción, radiación o

² Autor: Pierre Mafart, Título: Ingeniería industrial de alimentos

microondas), creando un gradiente de presión de vapor de agua bajo cuyo impulso se extrae el agua del sistema.

1.3.7 APLICACIÓN DE LA LIOFILIZACIÓN

El método o técnica del liofilizado se aplica en diferentes campos industriales, resultando indispensable en varios sectores de aplicación como:

1. En la Medicina
2. En Biología
3. En la industria farmacéutica
4. En industria alimenticia

1.4 PRESIÓN

Se define como la fuerza aplicada por unidad de área. En el sistema métrico decimal, se la expresa en pascales (N/m^2).

1.4.1 PRESIÓN ATMOSFÉRICA

Es la fuerza que ejerce la masa del aire de la atmosfera terrestre sobre la superficie, medida mediante un barómetro. A nivel del mar la presión atmosférica es de aproximadamente de 760 mm Hg, cuando la temperatura ambiental es de 20°C

El barómetro es un tubo de vidrio de aproximadamente un metro de longitud, cerrado en un extremo y relleno de mercurio. Se inserta el tubo con el extremo abierto hacia abajo en un tanque de mercurio y se lo mantiene en posición vertical. El mercurio del tubo tratará de bajar hacia el tanque, pero no conseguirá salir por entero. La atmósfera está ejerciendo una presión sobre el tanque, mientras que en la parte superior del tubo se forma un vacío. El mercurio del tubo caerá hasta el nivel de 760 mm al nivel del mar, cuando la temperatura atmosférica circundante sea de 20°C (véase la Figura 1.8).

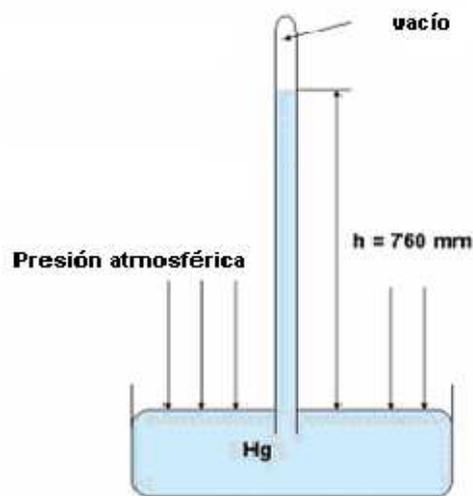


Figura 1.8. Barómetro de Mercurio.

1.4.2 PRESIÓN MANOMÉTRICA

Es la presión medida con referencia a la presión atmosférica. Estos son principalmente los medidores de tubo Bourdon y de Fuelles metálicos. Medir las presiones en un sistema cerrado requiere un método diferente. El tubo Bourdon, mostrado en la Figura 1.9, se lo acopla a una aguja y puede medir presiones por debajo y por encima de la presión atmosférica.



Figura 1.9. Manómetros de tubo Bourdon.

1.4.3 PRESIÓN ABSOLUTA

Es aquella presión que se mide con relación al cero absoluto o vacío total.

1.4.4 PRESIÓN RELATIVA

Esta presión se mide con respecto a la presión atmosférica, es decir, su valor cero, corresponderá al valor de la presión absoluta atmosférica.

1.4.5 PRESIÓN DE VACÍO

El vacío es la ausencia total de materia en un determinado espacio o lugar, o la falta de contenido en el interior de un recipiente. La presión de vacío es aquella que se mide como la diferencia entre una presión atmosférica y la presión absoluta (cero absoluto). Se concluye que el cero absoluto no existe, pero se llega a una proximidad cercana al valor cero. Las presiones de vacío se pueden medir con valores negativos o valores positivos. En este caso se debe tomar bien en cuenta el punto de referencia.

Si se tiene valores negativos en presión de vacío, entonces se tiene una medida de presión diferencial; estos instrumentos son manómetros de presión. Los instrumentos que miden presiones positivas (mientras más vacío exista su medida se aproxima más cercano al cero) son instrumentos adecuados para medir presiones de vacío absoluto.

Para la presente aplicación se utilizará el siguiente sensor transductor de vacío para medir presiones sumamente bajas, en el rango de 1000 mbar a $1 \cdot 10^{-4}$ mbar como se indica en la Figura 1.10.

1.4.5.1 VSP62 - Transductor Smartline Vacío



Figura 1.10. Medidor de presión de vacío absoluto.

1.4.5.1.1 Principio de Medición

Este sensor utilizado para medir presiones de vacío producidos en la cámara de liofilización, es un transductor de vacío VSP62 tiene un sensor interno Pirani, que utiliza la conducción de calor de gases para la medición de vacío. Un filamento del sensor se calienta a un umbral de temperatura determinados en modo pulsante, el tiempo necesario para la calefacción es medida de la presión total del gas.

1.4.5.1.2 Señal de salida

La señal de salida de 1,5 - 8,5 V de su VSP62 tiene una dependencia logarítmica con la presión, sobre el rango de medida $1,0 \times 10^{-4}$ - 1000 mbar (1 V por década presión). La conversión de señal de la tensión y la presión se realiza de acuerdo a la siguiente fórmula, la misma que es utilizada para medir la presión de vacío en el HMI:

$$\begin{aligned} V_{out} (V) &= \log (p(\text{mbar})) + 5.5 \\ p (\text{mbar}) &= 10^{(V_{out}(V) - 5.5)} \end{aligned}$$

Figura 1.11 Voltaje de señal de salida.

La salida de la señal de VSP62 está disponible inmediatamente después de que la unidad está encendida. Para aprovechar la máxima precisión de la unidad es conveniente permitir un de estabilización de 2-5 minutos, especialmente cuando, se han producido cambios de presión extrema ³ [THYRACONT].

1.5 SENSORES PARA MEDIR TEMPERATURA

La temperatura es una magnitud referida a las nociones comunes de caliente o frío, depende de la energía cinética media de las moléculas del cuerpo.

³ http://www.thyracont.com/en/products/index/vacuum_gauges_itemid_81.html

1.5.1 TERMOCUPLAS

La termocupla son los sensores de temperatura más comúnmente utilizados industrialmente.

Una termocupla se construye con dos alambres de distinto material unidos en un extremo (soldados generalmente). Al aplicar temperatura en la unión de los metales se genera un voltaje muy pequeño del orden de los milivoltios (mV) el cual aumenta con la temperatura.

Existen una gran variedad de tipos de termocuplas. En la Tabla 1.1 aparecen algunas de las más comunes, pero casi el 90% de las termocuplas utilizadas son de tipo **J** ó del tipo **K**.

Una termocupla “tipo J” está hecha con un alambre de hierro y otro de constantán. Al colocar la unión de estos metales a 750 °C, debe aparecer en los extremos 42.2 milivoltios como se muestra en la Figura 1.12.

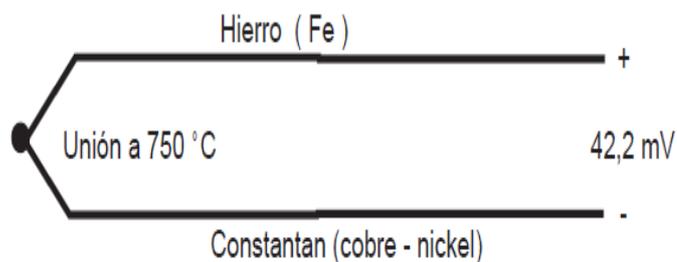


Figura 1.12. Diagrama de termocupla.

Las termocuplas tipo **J** se usan principalmente en la industria del plástico, goma y fundición de metales a bajas temperaturas. La termocupla **K** se usa típicamente en fundición y hornos a temperaturas menores de 1300 °C, por ejemplo fundición de cobre y hornos de tratamientos térmicos. Las termocuplas **R**, **S**, **B** se usan casi exclusivamente en la industria siderúrgica.

Te	Cable +	Cable -	Rango	Volts.
----	---------	---------	-------	--------

	Aleación	Aleación	(Min, Max) °C	Máx. (mV)
J	Hierro	Cobre/níquel	(-180,750)	42,2
K	Níquel/cromo	Níquel/aluminio	(-180,1372)	54,8
T	Cobre	Cobre/níquel	(-250,400)	20,8
R	87% Platino 13% Rodio	100% Platino	(0,1767)	21,09
S	90% Platino 10% Rodio	100% Platino	(0,1767)	18,68
B	70% Platino 30% Rodio	94% Platino 6% Rodio	(0,1820)	13,814

Tabla 1.1. Características de los diferentes termopares.

Finalmente las tipo **T** eran usadas hace algún tiempo en la industria de alimentos, pero han sido reemplazadas en esta aplicación por los Pt-100.

La dependencia entre el voltaje entregado por la termocupla y la temperatura no es lineal (Figura 1.13), es deber del instrumento electrónico destinado a mostrar la lectura, efectuar la linealización; es decir, tomar el voltaje y conociendo el tipo de termocupla, ver en tablas a que temperatura corresponde este voltaje.

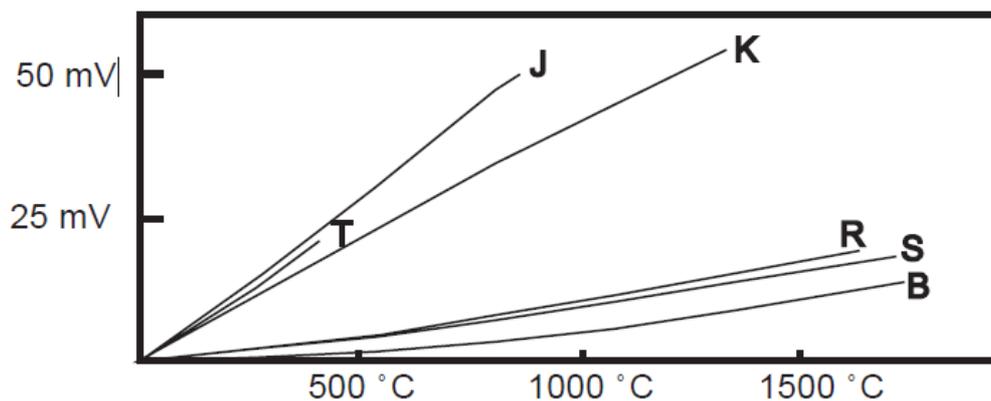


Figura 1.13. Curvas características de la termocuplas.

Dentro del uso correcto de los termopares se encuentra el evitar la diferencia de potencial en las juntas de conexión, y en caso de existir esto se debe tomar en cuenta el valor de potencial que se encuentra afectando la medición ya que la

lectura sería errónea. Para esto se describe a continuación el cómo realizar esta compensación.

1.5.1.1 Compensación De Cero

El principal inconveniente de las termocuplas es la necesidad de la "compensación de cero". Esto se debe a que en algún punto, habrá que empalmar los cables de la termocupla con un conductor normal de cobre. En ese punto se producirán dos nuevas termocuplas con el cobre como metal para ambas, generando cada una un voltaje proporcional a la temperatura de ambiente en el punto del empalme. La manera como se encuentra conectada la termocupla se la puede apreciar en la Figura 1.14.

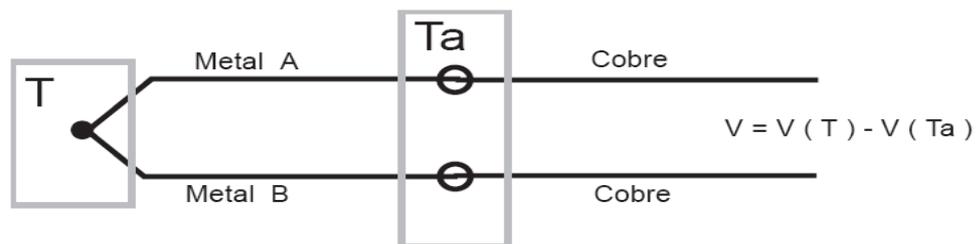


Figura 1.14 Compensación de cero.

Antiguamente se solucionaba este problema colocando los empalmes en un baño de hielo a cero grados para que generen cero voltaje ($Ta = 0$ y luego $V(Ta) = 0$). Actualmente todos los instrumentos modernos miden la temperatura en ese punto y la suman para crear la compensación y obtener así la temperatura real.

El punto de empalme (llamado "unión ó juntura de referencia") es siempre a la entrada del instrumento pues ahí se conectan los terminales del sensor de temperatura, de modo que es necesario llegar con el cable de la termocupla hasta el mismo instrumento.

1.5.1.2 Cable Compensado

Cuando el instrumento está muy retirado del lugar de medición, no siempre es posible llegar con el mismo cable de la termocupla al instrumento. Esto ocurre especialmente cuando se están usando termocuplas R, S ó B hechas con aleación de platino de muy alto precio. La solución de este problema es usar los llamados "cables compensados" para hacer la extensión del cable. Estos exhiben el mismo coeficiente de Seebeck de la termocupla (pero hechos de otro material de menor precio) y por lo tanto no generan termocuplas parásitas en el empalme. (Figura 1.15)

Los cables de extensión al tener propiedades eléctricas similares a las del termopar soportan hasta ciertos límites de temperatura (0-200°C) y son más económicos. Se suelen utilizar los siguientes:

- Conductores tipo J para termopares tipo J
- Conductores tipo K o tipo T para termopares tipo K
- Conductores tipo T para termopares tipo T
- Conductores tipo E para termopares tipo E
- Conductores cobre-cobre níquel para termopares tipos R, S o B

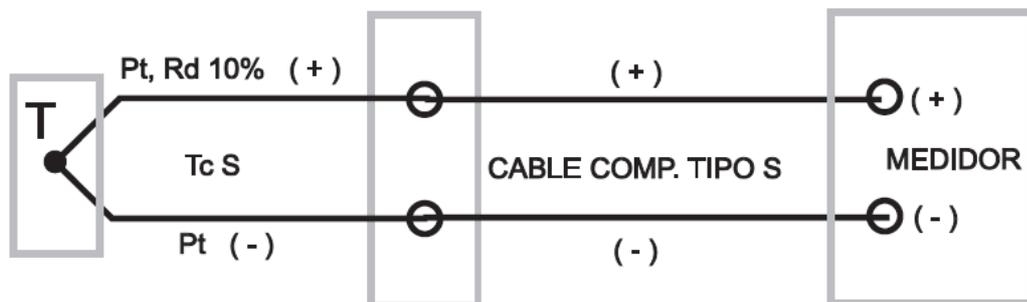


Figura 1.15 Configuración con cable compensado.

Los cables compensados tienen una polaridad de conexión (+) y (-) que al conectarse con la termocupla se debe respetar. Un error típico es conectar al revés el cable en la termocupla y en el instrumento, de esta forma se genera un error en la lectura del orden de la temperatura de ambiente en el empalme.

Es importante que estos dos cables compensados sean para el tipo de termocupla que se está usando y además estén conectados con la polaridad correcta (+) con (+) y (-) con (-). De otra forma será imposible obtener una medición sin error.

1.5.2 RTD Pt-100

Ningún transductor es el mejor en todas las situaciones de medida, por lo que se debe saber cuándo debe utilizarse cada uno de ellos. Como se puede ver, en la Tabla 1.2 se están comparando los cuatro tipos de transductores de temperatura más utilizados, y refleja los factores que deben tenerse en cuenta: las prestaciones, el alcance efectivo, el precio y la comodidad.

	RTD	Termistor	Sensor de IC	Termopar
Ventajas	Más estable. Más preciso. Más lineal que los Termopares.	Alto rendimiento. Rápido. Medida de dos hilos.	El más lineal. El de más alto rendimiento. Económico.	Autoalimentado. Robusto. Económico. Amplia variedad de formas físicas. Amplia gama de temperaturas.
Desventajas	Caro. Lento. Precisa fuente de alimentación. Pequeño cambio de resistencia. Medida de 4 hilos. Autocalentable.	No lineal. Rango de temperaturas limitado. Fragil. Precisa fuente de alimentación. Autocalentable.	Limitado a < 250 °C. Precisa fuente de alimentación. Lento. Autocalentable. Configuraciones limitadas.	No lineal. Baja tensión. Precisa referencia. Menos estable. Menos sensible.

Tabla 1.2 Comparación entre los diferentes sensores de temperatura.

El sensor **PT-100** es un sensor de temperatura que basa su funcionamiento en la variación de resistencia a cambios de temperatura del medio. Este elemento

consiste en un arrollamiento muy fino de Platino bobinado entre capas de material aislante protegido por un revestimiento cerámico. El material que forma el conductor, posee un coeficiente de temperatura α , el cual determina la variación de la resistencia del conductor por cada grado que cambia su temperatura según la siguiente ecuación:

$$R_t = R_o(1 + \alpha t)$$

Donde:

R_o = resistencia en Ω a 0°C

R_t = resistencia en Ω a $t^\circ\text{C}$

t = temperatura actual

α = coeficiente de temperatura de la resistencia cuyo valor entre 0°C y 100°C es de $0.003850 \Omega/^\circ\text{C}$.⁴[WikiCiencia, Electrónica]

A continuación se muestra las características del Platino comparadas con otros materiales:

Metal	Resistividad $\mu\Omega/\text{cm}$	Coeficiente de Temperatura $[\Omega/^\circ\text{C}]$	Intervalo útil de temperatura $[\text{C}]$	Resistencia a 0°C $[\Omega]$	Precisión $[\text{C}]$
Platino	9.83	0.003850	-200 a 950	25, 100, 130	0.01
Níquel	6.38	0.0063 a 0.0066	-15 a 300	100	0.50
Cobre	1.56	0.00425	-200 a 120	10	0.10

Tabla 1.3. Características de los sensores RTD.

⁴ <http://www.wikiciencia.org/electronica/electricidad/ttemperatura/index.php>

El platino es el elemento más indicado para la fabricación de sensores de temperatura, ya que posee:

1. Alto coeficiente de temperatura.
2. Alta resistividad, lo que permite una mayor variación de resistencia por °C.
3. Relación lineal resistencia-temperatura.
4. Rigidez y ductilidad lo que facilita el proceso de fabricación de la sonda de resistencia.
5. Estabilidad de sus características durante su vida útil.

1.6 INTRODUCCIÓN AL CALOR

Las leyes de la termodinámica ayudan a entender el concepto de calor. Una de estas leyes establece que el calor no puede ser creado ni disminuido. Este calor puede ser medido cuando se transfiere de una sustancia a otra. El calor es una forma de energía que fluye de un cuerpo a otro, los mismos que se encuentran a diferentes temperaturas, transmitiéndose el calor al cuerpo de temperatura más baja. Este cambio de temperatura se denomina calor sensible. El calor, sin que se produzca un aumento de temperatura, y al aplicarlo se produzca un cambio de estado se denomina calor latente.

Una caloría se define como la cantidad de calor requerida para elevar la temperatura de un gramo de agua 1° C. Por ejemplo, cuando se calienta 1g de agua de 68° C a 69° C, el agua absorbe una caloría de energía calórica.

Para medir cuanto calor se absorbe en un proceso como este, se necesita un instrumento de laboratorio. Este instrumento se denomina calorímetro.

El calor se transmite de distintas maneras:

1.6.1 CONDUCCIÓN

La transferencia de calor por conducción es la transmisión de energía entre una molécula y otra. A medida que el átomo se mueve más rápido, hace que otros hagan lo mismo.

Hay dos tipos de materiales que son importantes sobre la conducción de calor, esto son los conductores de calor y los aislantes de calor. El calor se transfiere a través de los conductores principalmente por medio del movimiento de los electrones libres, los metales que son buenos conductores de electricidad son buenos conductores de calor, el calor no circula bien a través de los aislantes, el vacío es un muy mal conductor de calor.

1.6.2 CONVECCIÓN

La transferencia de calor por convección se produce cuando el calor, es transferido a alguna sustancia que sea fácilmente desplazable, tal como el aire o el agua. La densidad no es constante para un material dado ya que varía con la temperatura, con la temperatura los volúmenes de los cuerpos aumentan y la densidad disminuye y viceversa, esto causa que el material calentado se desplace produciendo convección.

1.6.3 RADIACIÓN

El calor transferido por radiación viaja a través del espacio sin calentar éste y es absorbido por los primeros objetos sólidos que encuentra. La radiación es la única manera en la que el calor puede viajar a través del vacío, esto se consigue por medio de la radiación electromagnética. La transferencia a través del vacío es imposible por convección y por conducción, ya que son mecanismos de transporte que necesitan una sustancia a través de la cual viajar.

1.7 REFRIGERACIÓN

Es el proceso de extraer calor de un lugar donde no se desea que exista y transferir dicho calor a un lugar donde su existencia no tiene importancia.

1.7.1 EL PROCESO DE REFRIGERACIÓN

Es la transferencia de calor de un lugar o producto a otro. El cuerpo empleado como absorbente de calor se denomina agente de refrigeración o agente refrigerante.

Los procesos de refrigeración se clasifican en:

1. Sensible.- En un proceso sensible la temperatura del refrigerante varía al absorber el calor desde el medio a refrigerar. Sin que exista cambio de estado del refrigerante.
2. Latente.- Por el contrario en un proceso latente ocurre un cambio de estado en el refrigerante. Que pasa de líquido a gas para lo que aspira su calor latente de vaporización.

1.7.2 CICLO MECÁNICO DE REFRIGERACIÓN

Existen diferentes métodos de refrigeración, pero el más usado es el de refrigeración mecánica, sus cuatro componentes principales se detallan a continuación:

1. El evaporador.
2. El compresor.
3. El condensador.
4. El dispositivo de expansión del refrigerante.

La Figura 1.16 muestra los componentes básicos de un sistema de refrigeración mecánico.

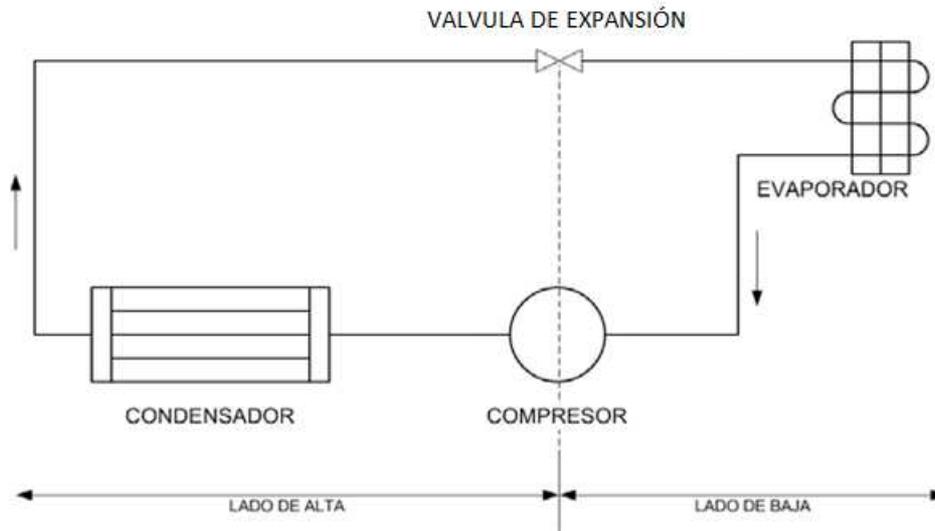


Figura 1.16 Ciclo básico de refrigeración mecánica.

1.7.3 COMPONENTES DE REFRIGERACIÓN

1.7.3.1 El Evaporador

Este dispositivo absorbe calor hacia dentro del sistema. Cuando se evapora el refrigerante a una temperatura inferior a aquella de la sustancia que hay que enfriar, el refrigerante absorbe calor de la sustancia. El evaporador es la parte del sistema frigorífico en el que el refrigerante se vaporiza, tomando su calor latente de vaporización de los alrededores.

1.7.3.2 El Compresor

Los compresores son las máquinas que aspiran el vapor refrigerante proveniente del evaporador, y lo comprimen induciendo un aumento de temperatura durante la compresión y lo envían al condensador. Los compresores mantienen el refrigerante en circulación a través del sistema ⁵[Norman Cook, 2001].

⁵ Norman Cook, curso práctico de refrigeración y aire acondicionado, iragra S.A. Madrid, año 2001

1.7.3.3 El Condensador

El vapor caliente proveniente del compresor es enviado hacia el condensador, aquí se enfría y una vez en forma líquida retorna al tanque refrigerante para luego ser enviado al evaporador.

1.7.3.4 El dispositivo de expansión del refrigerante

Este dispositivo hace circular el refrigerante líquido a través de un orificio de pequeño diámetro, lo que causa una disminución de la presión, permitiendo así el cambio de estado del refrigerante de líquido a vapor. La válvula de expansión controla además el caudal del refrigerante que pasa de la línea de líquido hasta el evaporador.

1.8 PROPUESTA DE DISEÑO

En este Capítulo se realizó un estudio del proceso de liofilización del Liofilizador Stokes, y diferentes variedades de sensores industriales que permitirían la automatización de la planta. Mediante un diagrama de bloques (Figura 1.17) se esquematiza la estrategia a seguirse.

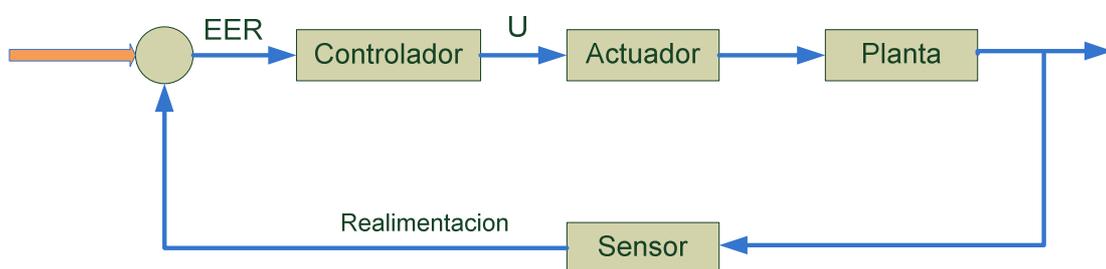


Figura 1.17 Esquema de un control con realimentación.

A continuación se explica el diagrama de bloques propuesto:

Controlador: Este detectará la señal de error respecto a la señal realimentada, y ejecutará su algoritmo de control y enviará una señal al actuador.

Actuador: Es un dispositivo de potencia que actuará sobre la planta.

Planta: Es la parte o conjunto de partes de la máquina liofilizadora.

Sensor: Es un dispositivo capaz de detectar magnitudes físicas, llamadas variables de instrumentación, y transformarlas en variables eléctricas

CAPÍTULO 2

DISEÑO DEL HARDWARE DEL SISTEMA

2.1 INTRODUCCIÓN

En toda implementación de un sistema automatizado es necesario realizar un análisis previo al diseño, con el fin de obtener resultados acordes a la realidad.

Del análisis se decidió implementar el control de temperatura del Liofilizador STOKES por medio de un control PI, utilizando al lenguaje de programación grafica Labview. Se decidió realizar la interface entre la computadora y la máquina mediante una DAQ (tarjeta de adquisición de datos). Las funciones del sistema de control serían:

1. Control de la temperatura del aceite; esto es, mediante un control por ciclo integral, controlar el voltaje en periodos de onda completa. Este voltaje será entregado a un actuador para controlar el calentamiento del aceite circulante.
2. Registro de la temperatura del producto, que se ubicará en el plato donde se pone la muestra para deshidratar.
3. Registro de la temperatura de condensación.
4. Registro de la presión de vacío de la cámara de condensación.

Todas estas variables deberán ser almacenadas en un archivo, para ser analizadas posteriormente.

Con estos objetivos se pensó en un diagrama de bloques como el de la Figura 2.1.

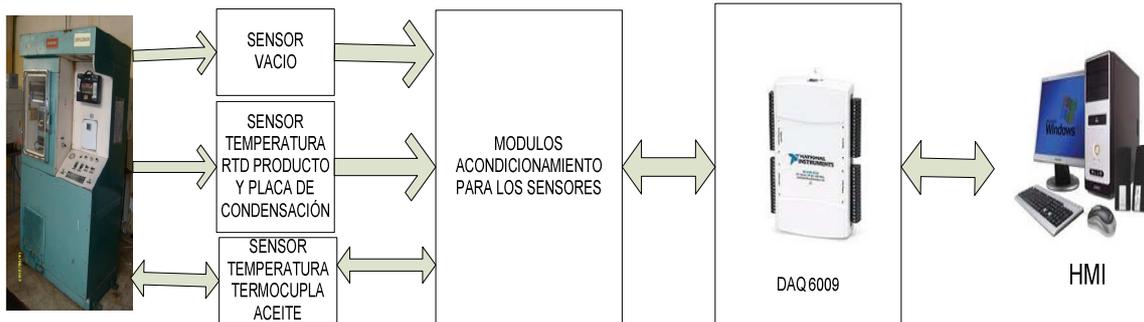


Figura 2.1 Esquema general de todo el proceso

2.2 DISEÑO DE LOS CIRCUITOS ACONDICIONADORES DE SEÑAL

En el diagrama de bloques de la Figura 2.1 se muestra la ubicación de los módulos de acondicionamiento de señal.

A continuación se realiza la explicación del diseño del sistema de control de la niquelina.

2.2.1 DISEÑO DEL CONTROL DE LA NIQUELINA

En la Figura 2.2 se muestra el diagrama de bloques para el control de la Niquelina.

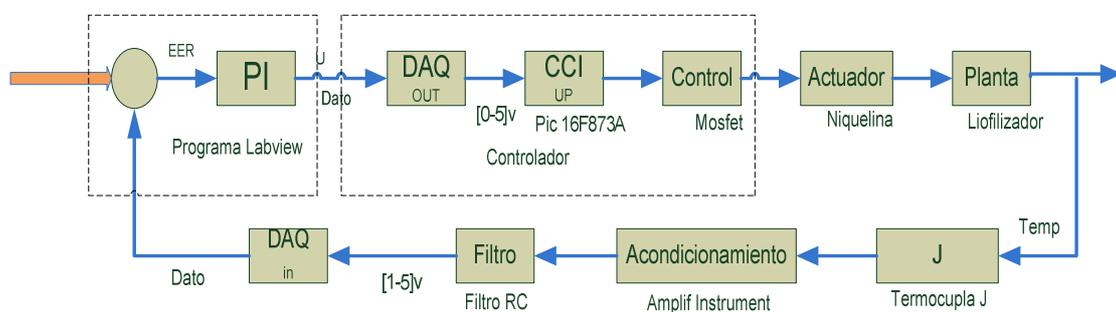


Figura 2.2 Diagrama de bloques del control de temperatura

En la Figura 2.2, la parte proporcional integral (PI) será programada mediante el software Labview. La señal resultante será ingresada a una tarjeta de Adquisición

de Datos, cuya salida irá a un micro controlador en el cual se programará el control por ciclo Integral (CCI). Mediante Mosfet de Potencia se controlarán las señales de voltaje aplicadas a las niquelinas para mantener la temperatura del Aceite circulante constante de acuerdo a la señal de entrada predeterminada.

Para la medición de la temperatura se ha pensado en emplear una termocupla tipo J, cuya señal será ingresada a una etapa de amplificación basada en un amplificador de instrumentación. Luego del acondicionamiento pertinente la señal será enviada a una DAQ para poder ingresar los datos al computador para su visualización y el registro.

2.2.1.1 Diseño de la etapa de medición de temperatura

Para la medición de temperatura se pensó en una termocupla tipo J pues es la que mejor se ajusta a las necesidades del proyecto.

Para las compensaciones en las uniones de los terminales se pensó en utilizar terminales especiales como: terminales de zinc, plata y oro. Al final se utilizó de zinc porque es el más comercial y económico para esta clase de sensores; el resto del reajuste se realizó mediante software.

La amplificación de las señales del termopar (J) se realizó a través de un amplificador de instrumentación, AD620. Este amplificador está caracterizado por tener una alta impedancia de entrada, una R_G variable que controla la ganancia y un alto rechazo al modo común.

La resistencia R_G es la que determina la ganancia del amplificador, y se la calcula mediante la ecuación 2.1:

$$G = \frac{49.4 \text{ k}\Omega}{R_G} + 1 \quad \text{o} \quad R_G = \frac{49.4 \text{ k}\Omega}{G - 1} \quad \text{Ecuación 2.1}$$

Debiéndose, por lo tanto, seleccionar la ganancia del amplificador y de allí calcular R_G .

Se buscó una ganancia que permita elevar los valores de voltaje de 1 V a 5V, de tal manera que éstos puedan ingresar a las entradas analógicas de la tarjeta de adquisición de datos.

En la Figura 2.3 se muestra el circuito de acondicionamiento para la termocupla tipo J:

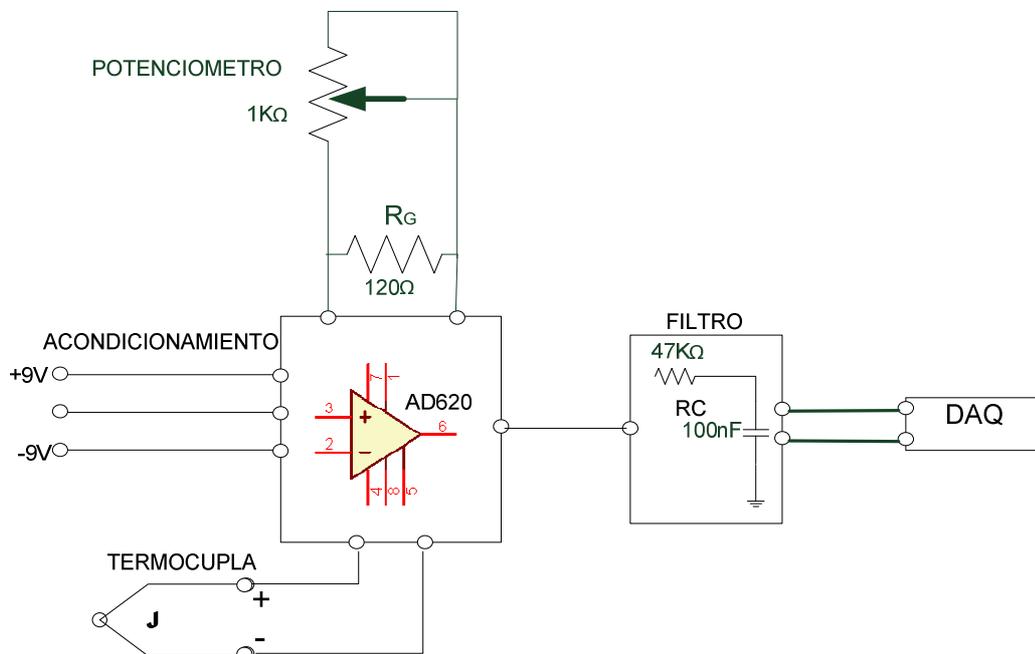


Figura 2.3 Circuito de acondicionamiento de la termocupla tipo J.

Para el diseño del acondicionamiento de la termocupla tipo J se toma en cuenta los datos mostrados en la Tabla 2.1.

TEMPERATURA (°C)	VOLTAJE TERMOCUPLA J (mV)	VOLTAJE DE SALIDA (V)
5	0.253	1
200	10.777	5

Tabla 2.1 Valores del voltaje de entrada respecto al voltaje de salida

Con los datos de la Tabla 2.1 se realiza la gráfica, voltaje de salida con respecto al voltaje de entrada, como se muestra en la Figura 2.4.

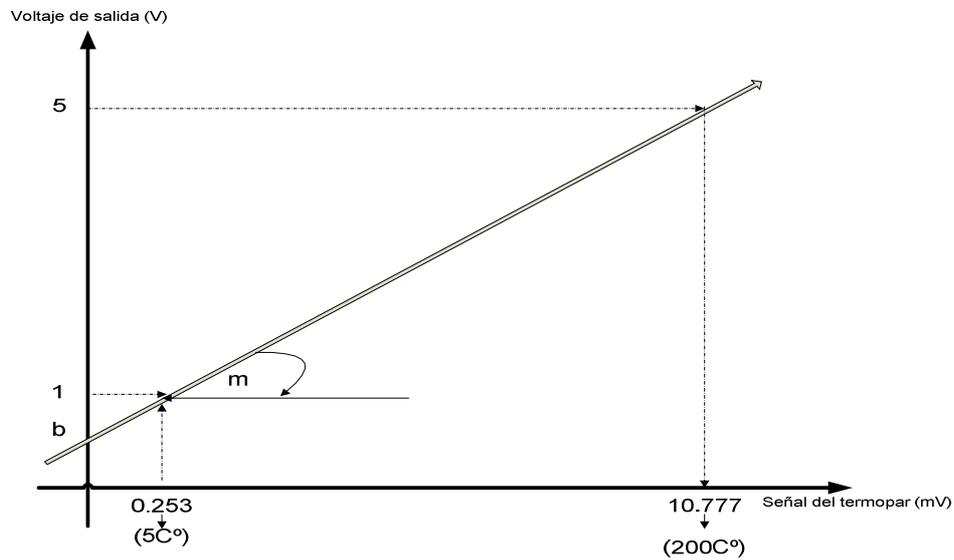


Figura 2.4 Voltaje de salida vs voltaje de entrada.

De la Figura 2.4 se obtiene de la recta la ecuación 2.2, y se procede a calcular la pendiente m y la incógnita b .

$$V_o = mV_i + b$$

Ecuación 2.2

$$-1 = -m(0.000253) - b$$

$$5 = +m(0.010777) + b$$

$$4 = m (0.010524)$$

$$m = \frac{4}{0.010524} = 380.08361$$

$$b = 1 - (380.08361)(0.000253)$$

$$b = 0.903838$$

$$V_{o1} = 380.1 * V_i + 0.904$$

$$V_{o1} = 380.1(0.000253) + 0.904$$

$$V_{o1} = 1V$$

$$V_{o2} = 380.1(0.010777) + 0.904$$

$$V_{o2} = 5V$$

Por lo tanto, la ganancia A_V es de 380.1, la misma que es utilizada para calcular la resistencia de ganancia, R_G , del amplificador de instrumentación, a partir de la ecuación 2.1.

$$R_G = \frac{49.4K\Omega}{A_V - 1}$$

$$R_G = \frac{49.4K\Omega}{380.1 - 1} = 130.1\Omega$$

Se escoge el valor más
cercano a lo real

$$R_G = 130.1\Omega \begin{cases} \rightarrow R_G = 120\Omega \\ \rightarrow R_G = 150\Omega \end{cases}$$

Los valores entre los cuales opera el amplificador operacional AD620, a las variaciones de la termocupla con respecto a la temperatura se muestran en la Tabla 2.2.

Voltaje de entrada (mV)	Voltaje de salida (V)
0.253	0.096
10.777	4.096

Tabla 2.2 Voltaje de salida en función de la respuesta de la termocupla tipo J.

2.2.1.2 Diseño del Filtro RC

El tipo de filtro pasabajos utilizado es un RC que permite atenuar el ruido que puede provenir de diversas fuentes, incluyendo agentes externos. Se decidió diseñar un filtro pasabajos con una frecuencia de corte de 30 Hz, obtenido en forma experimental.

La frecuencia de corte está dada por la siguiente ecuación 2.3:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad \text{Ecuación 2.3}$$

En la Figura 2.5 se muestra el circuito del filtro pasabajos diseñado.

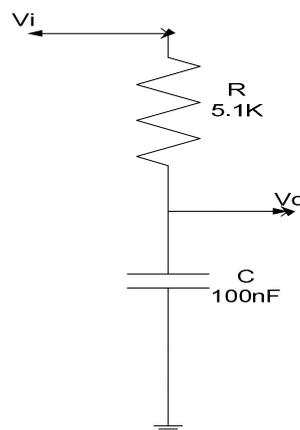


Figura 2.5 Filtro RC

Así, para tener una frecuencia de corte de 30 Hz, los valores de la resistencia R y condensador de poliéster C son: Seleccionando un condensador de 100 nF para C, el valor de la resistencia R se calcula de la ecuación 2.3:

$$R = \frac{1}{2\pi * 100 * 10^{-9} * 30}$$

$$R = 53041.6 \Omega$$

El valor escogido de resistencia para R es: R = 5.1 KΩ

2.2.1.4 Selección de la tarjeta de adquisición de datos (DAQ)

La adquisición de datos consiste en tomar un conjunto de variables físicas, convertirlas en voltajes y digitalizarlas de manera que se puedan procesar en una computadora.

Una vez que las señales eléctricas analógicas se convierten en digitales, se envían a la PC, para procesarlas con un programa de aplicación adecuado al uso, que es Labview.

De entre las diferentes opciones se seleccionó el módulo de adquisición de datos multifuncional USB-6009 de National Instruments provee una adquisición de datos confiables. Con una conectividad USB plug-and-play, este módulo es lo suficientemente simple para realizar mediciones rápidas pero lo suficientemente versátil para aplicaciones de medición más complejas.



Figura 2.6 NI USB-6009

Las características más relevantes de este dispositivo son:

- 8 entradas analógicas (14 bits, 48 kS/s)
- 2 salidas analógicas (12 bits a 150 S/s)
- 12 E/S digitales
- Contador de 32 bits

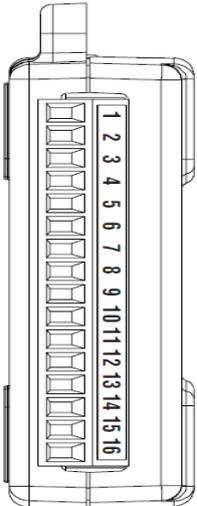
Módulo	Terminal	Nombre	Descripción
	1	GND	Tierra
	2	AI 0	Entrada análoga 0
	3	AI 4	Entrada análoga 4
	4	GND	Tierra
	5	AI 1	Entrada análoga 1
	6	AI 5	Entrada análoga 5
	7	GND	Tierra
	8	AI 2	Entrada análoga 2
	9	AI 6	Entrada análoga 6
	10	GND	Tierra
	11	AI 3	Entrada análoga 3
	12	AI 7	Entrada análoga 7
	13	GND	Tierra
	14	AO 0	Salida análoga 0
	15	AO 1	Salida análoga 1
	16	GND	Tierra

Tabla 2.3 Asignación de terminales analógicos.

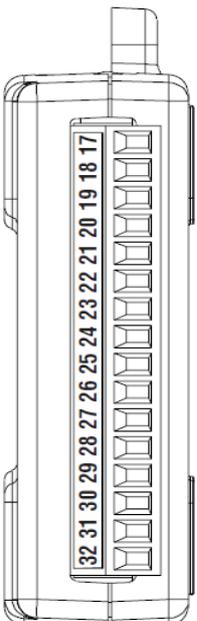
Módulo	Terminal	Nombre	Descripción
	17	P0.0	Puerto 0 Línea 0
	18	P0.1	Puerto 0 Línea 1
	19	P0.2	Puerto 0 Línea 2
	20	P0.3	Puerto 0 Línea 3
	21	P0.4	Puerto 0 Línea 4
	22	P0.5	Puerto 0 Línea 5
	23	P0.6	Puerto 0 Línea 6
	24	P0.7	Puerto 0 Línea 7
	25	P1.0	Puerto 1 Línea 0
	26	P1.1	Puerto 1 Línea 1
	27	P1.2	Puerto 1 Línea 2
	28	P1.3	Puerto 1 Línea 3
	29	PFI 0	Entrada Trigger
	30	2,5V	Voltaje de referencia
	31	5V	Fuente auxiliar
	32	GND	Tierra

Tabla 2.4 Asignación de terminales digitales.

En la Tabla 2.5 se indica las señales analógicas y digitales del DAQ que se conectan a la tarjeta de control por ciclo integral, y las tarjetas de acondicionamientos de los sensores. Todas las señales de los sensores entran al puerto análogo (AI0, AI1, AI2, AI3). EL terminal AO 0 entrega un voltaje análogo al microprocesador en el rango de 1V a 5V, para que luego el microprocesador entregue una señal de control por ciclos enteros a los Mosfet de potencia. El pórtilo P0.0 da una señal digital por medio de un switch implementado en el HMI

para la activación de un relé, el mismo que acciona al contactor de potencia para cerrar el circuito de 220V a la Niquelina de 3KW.

Terminales del DAQ	Señales de entradas y salidas
AI0	Entrada de la termocupla "J"
AI1	Entrada del RTD1
AI2	Entrada del RTD2
AI3	Entrada del sensor de vacío
AO 0	Salida análoga al microprocesador, porta.0
P0.0	Salida digital al switch

Tabla 2.5 Asignación de los terminales de DAQ.

2.2.1.5 Control por ciclo integral

De las diferentes opciones de control que se conocen se optó por el método de control por ciclo integral que consiste en la variación de la potencia entregada a la carga, por medio de la activación y desactivación de la misma en periodos o semiperiodos completos de la red.

La ventaja de este método radica en el bajo componente de armónicos que genera, lo que le convierte en ideal para el control de cargas resistivas como la niquelina.

El circuito se diseño para que funcione sincrónicamente con la frecuencia de la red de alimentación, detectando el cruce por cero de la onda senoidal al cambiar del semiciclo positivo a negativo. La señal de este circuito es enviada al microprocesador para que este envíe el pulso de disparo a los actuadores de potencia.

2.2.1.5.1 Detector de cruce por cero

En la figura 2.7, se muestra el circuito detector de cruce por cero.

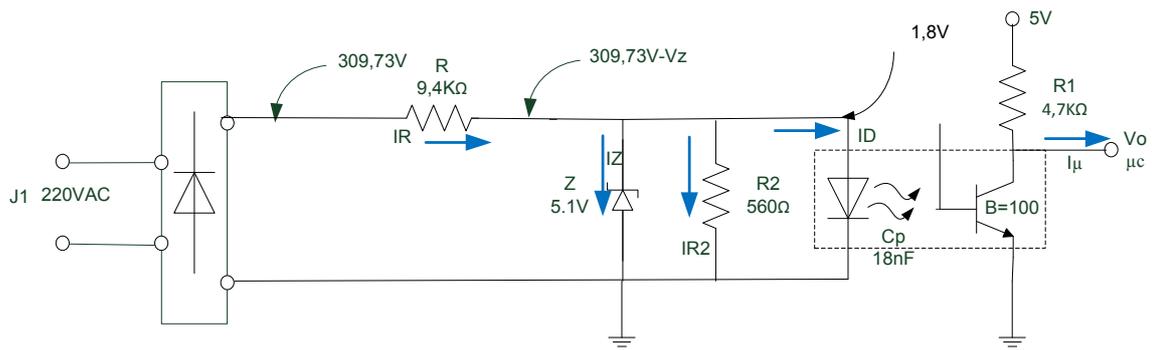


Figura 2.7 Circuito detector de cruce por cero

La entrada de energía de la red es de 220 V_{AC}. Este voltaje se rectifica por medio de un puente de diodos.

El diseño de este circuito se describe a continuación:

Datos:

$I_{\mu} = 1\text{mA}$; $V_{CE} = 0,3\text{V}$; $C_p = 18\text{nF}$; $V_{dxcx} = 6$; $I_z = 49\text{Ma}$, datos entregados por el fabricante.

$$R = \frac{VR}{IR} \quad \text{Ecuación 2.4}$$

$$R1 = \frac{VR1}{IR1}; \quad IR1 = I_{\mu} = 1\text{mA}$$

$$R1 = \frac{5 - 0.3}{0.001} = 4.7\text{K}\Omega$$

$$R2 = ?$$

$$V_{dxcx} = 220\sqrt{2} \sin \omega t$$

$$6\text{V} = 220\sqrt{2} \sin \theta; \quad \sin \theta = \frac{6\text{V}}{220\sqrt{2}} = 0.019$$

$$\theta = 1.105^{\circ}\text{C}$$

$$t = \frac{1.105 \cdot 8.333\text{ms}}{180} = 0.0511\text{ms} \quad T1 = 2 * t = 2 * 0.0511 = 0.1023\text{ms}$$

$$\tau \ll T1 = RC$$

$$\tau \ll \frac{T1}{10} = \frac{0.1023}{10} = 10.23\mu s = R2 * Cp$$

$$R2 = \frac{10.23\mu s}{Cp} = \frac{10.23\mu s}{18nF} = 568.4\Omega$$

$$R_2 = 568.4\Omega \begin{cases} \rightarrow R_2 = 560\Omega \\ \rightarrow R_2 = 680\Omega \end{cases}$$

$$R_2 = 560\Omega //$$

$$IR2 = \frac{Vz}{R2} = \frac{5.1}{560} = 9.107mA$$

$$ID = \frac{I\mu}{\beta} = \frac{0.001}{100} = 10\mu A$$

$$IR = Iz + IR2 + ID = 49mA + 9.107mA + 10\mu A = 58.107mA$$

$$R = \frac{VR}{IR} = \frac{309.73 - 5.1}{58.107mA} = 5.24K\Omega$$

$$PR = I^2 * R = (58.107mA)^2 * 5.24K\Omega = 17.7W$$

La resistencia de 9,4K Ω y 10W reduce el voltaje que se aplica al diodo zener, el que limita a un voltaje de 5.1V. Se conecta una resistencia de 560 Ω en paralelo al diodo zener para limitar la corriente de entrada al opto transistor.

El valor de la resistencia R1 es fundamental para activar la se\u00f1al que se introduce en el microprocesador, mientras m\u00e1s alto sea el valor de la resistencia la corriente se limita, y a menor corriente se tiene un mejor detector de cruce por cero porque la se\u00f1al de respuesta es m\u00e1s r\u00e1pida el control es eficiente.

El opto transistor realiza la funci\u00f3n de detectar el cruce por cero, cuando el voltaje en el emisor este por debajo de 1,8V, entregando una se\u00f1al de cero logico al receptor provocando que se encuentre en corte (interruptor abierto) y permitir

entregar una señal de 1 lógico al microprocesador, para que este realice su función.

La disipación de energía en la resistencia R es alta, de 17.7W, para reducir el valor de esta potencia se instaló dos resistencias en serie de 4.7K Ω a 10W.

2.2.1.5.2 Función del PIC 16F873A

El microprocesador que se utilizó en el control por ciclo integral es el PIC16F873A. La tarea que realiza este microprocesador es la de enviar señales en periodos completos de la onda.

La distribución de pines PIC16F873A se muestra en la Figura 2.8.

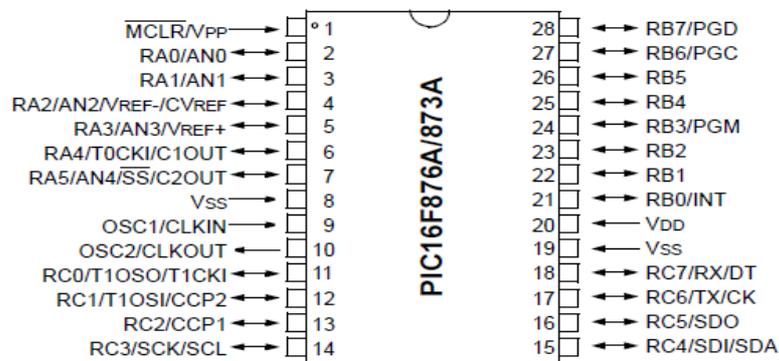


Figura 2.8 Distribución de pines C.I 16F873A

Los pines que tiene el PIC16F873A serán utilizados de la siguiente manera:

- El pín B es configurado como se detalla a continuación:
- El Portb.0 es asignado como entrada para detectar el cruce por cero. Cuando la onda senoidal cruza por cero, se envía un pulso de uno lógico a este pin del microprocesador.

- El Portb.1 es definido como salida para controlar los actuadores, en este caso los Mosfet de potencia que controlan la Niquelina de 3 Kw de potencia.
- El Portb.2 es configurado como entrada. Sirve para bloquear todo el control de la carga, cuando se pierde comunicación entre el PC y la tarjeta de adquisición de datos.
- El Portb.3 es establecido como salida, para energizar un relé, el mismo que permite cerrar el circuito del sistema de potencia desde la HMI.
- El Portb.4 es configurado como salida, para indicar con una luz verde que el funcionamiento de la planta es normal.
- El Portb.5 es configurado como salida, para encender una luz roja indicando al operador que no hay comunicación entre la PC y la DAQ. Esta luz se enciende después de 10 segundos de no haber comunicación con la interface PC y el DAQ. Las principales causas para que se pierda la comunicación son: que la computadora este desenergizada, no haya presencia de tensión en la red, o el cable USB que permite la comunicación con el PC y el DAQ no esté conectado.
- El Porta.0 es designado como entrada para leer el voltaje análogo que entrega la DAQ, entre el valor de 1V a 5V. Con este voltaje el microprocesador determinará cuanto es la potencia de activación por ciclos de períodos o semiperíodos que debe entregar a la carga.
- El Portb.6 es configurado como entrada, indicando al microprocesador que hay presencia de tensión en la red.

2.2.1.6 Diseño para el actuador

La niquelina tiene las siguientes características: potencia nominal 3KW y voltaje nominal 220V.

$$I = \frac{P}{V} = \frac{3000 W}{220V}$$
$$I = 13.63 A$$

La corriente nominal de la niquelina es entonces de 13.63 A.

Se debe tener en cuenta el voltaje pico inverso (V_{ak}) que soportará el semiconductor. Usando la ecuación 2.5 se calcula:

Ecuación 2.5

Para satisfacer las condiciones de voltaje y corriente se escoge el Mosfet IRP 450, cuyas especificaciones más relevantes se especifican en la Tabla 2.6.

MOSFET IRFP450				
Tipo de Canal	Corriente I_D (A)	Tensión V_{DS} (V)	Potencia P_D (W)	Resistencia On R_{DS} (Ω)
N	14	500	190	0,4

Tabla 2.6 Características del IRFP450

Para que los Mosfet entren en conducción es necesario entregar voltaje máximo a la compuerta de 20V y mínimo de 10V.

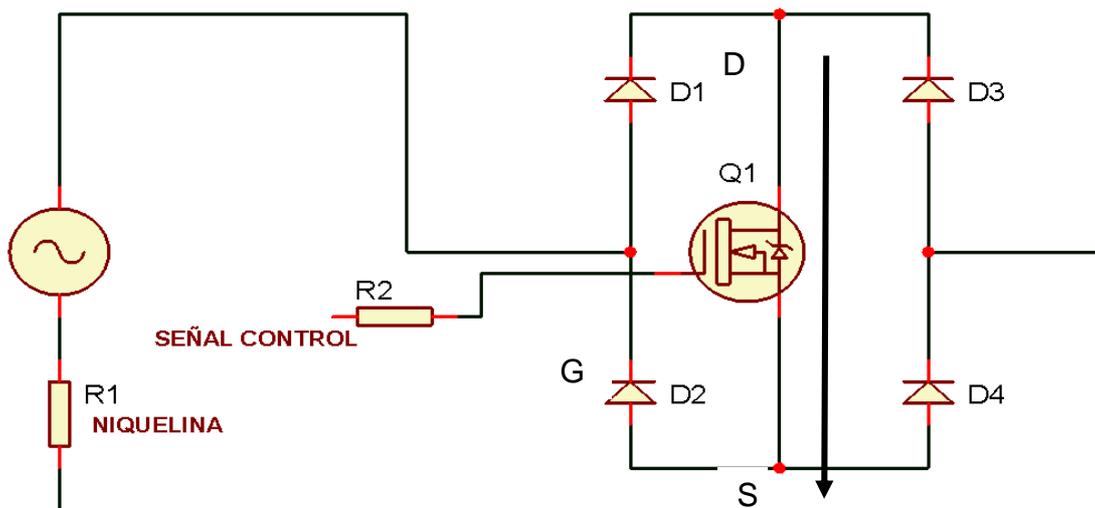


Figura 2.9 Circuito de Potencia

En la Figura 2.9 se muestra el circuito de potencia para el IRFP450. Para dividir la corriente de carga, se conectó cuatro Mosfet en paralelo. En conclusión, la corriente nominal que circulará por cada Mosfet será de 3.41 A. En la Tabla 2.6 se observa que el IRFP450 soporta 14 A.

El diodo de conmutación en paralelo a la carga debe soportar las condiciones de corriente y voltaje máximo especificadas por el fabricante del Mosfet, 500V, 14A.

El diodo que cumple con estas características es el B5006, cuyas características se las muestra en la Tabla 2.7.

If	Corriente máxima	50 [A]
Vf	Voltaje directo led	0,6 [V]
Vrrm	Voltaje pico inverso	600 [V]

Tabla 2.7 Características del diodo B5006

2.2.2 DISEÑO DEL ACONDICIONAMIENTO DEL RTD

En el diagrama de bloques de la Figura 2.10 se muestra el diagrama de bloques implementado para el acondicionamiento de los RTD, y así registrar los datos de la temperatura del producto, y la temperatura de refrigeración de la cámara de condensación.



Figura 2.10 Registro de datos del sensor RTD

2.2.2.1 Diseño de la fuente de corriente constante

Para realizar el acondicionamiento del RTD, se diseña una fuente de corriente constante de 5 mA. En la Figura 2.11 se detalla el circuito de la fuente de corriente constante.

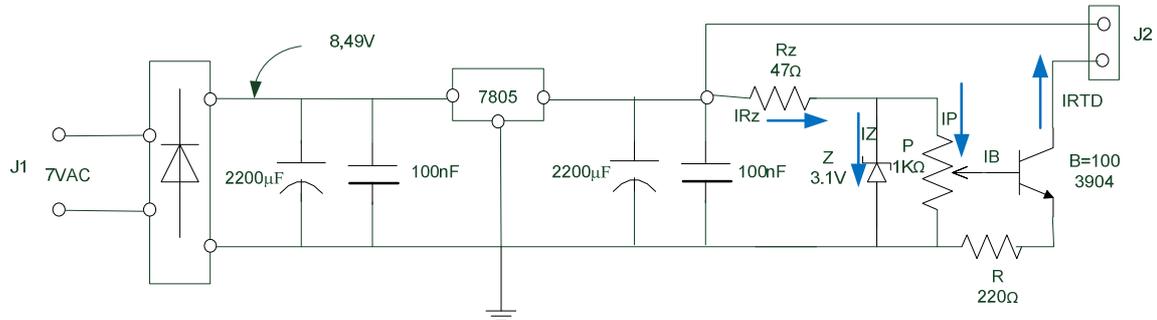


Figura 2.11 Circuito de la fuente de corriente constante

Se alimenta con una fuente de voltaje de $7V_{AC}$. Este voltaje se rectifica mediante el puente rectificador de diodos de 1,5 A y 50V, con capacitores de $2200\mu F$ y $100nF$ para disminuir el rizado de la fuente de voltaje.

El regulador 7805 permite obtener un voltaje de salida aproximado de 5V, el potenciómetro de precisión de $1K\Omega$ para regular la corriente constante de 5mA, y el transistor 2N3904 para switchear la fuente de corriente.

A continuación se diseña la fuente de corriente constante:

Datos:

$I_z = 40mA$; $I_{RTD} = 5mA$; $V_{BE} = 0,7V$; $\beta = 100$ (obtenidos por el fabricante).

$$R_z = \frac{V - V_z}{I_{Rz}} \quad \text{Ecuación 2.6}$$

$$V_R = I_{RTD} * R = 0.005 * 220 = 1.1V$$

$$V_B = V_R + V_{BE} = 1.1V + 0.7V = 1.8V$$

$$I_B = \frac{I_{RTD}}{\beta} = \frac{0.005}{100} = 50\mu A$$

$$I_P = \frac{V_z}{P} = \frac{3.1}{1000} = 3.1mA$$

$$I_{Rz} = I_z + I_p + I_B = 40mA + 33.1mA + 50\mu A = 43.1mA$$

$$R_z = \frac{5 - 3.1}{0.431} = 44.08\Omega$$

$$R_z = 44.08\Omega \begin{cases} \rightarrow R_z = 39\Omega \\ \rightarrow R_z = 47\Omega \end{cases}$$

$$R_z = 47\Omega //$$

El acondicionamiento de los dos RTD implementados en el liofilizador, presentan el mismo diseño.

2.2.2.2 Diseño del puente de wheatstone

El puente de wheatstone que se muestra en la Figura 2.12, a la salida de sus terminales, da una respuesta en voltaje (V_o), ante una variación de resistencia debida al cambio de la temperatura en la RTD.

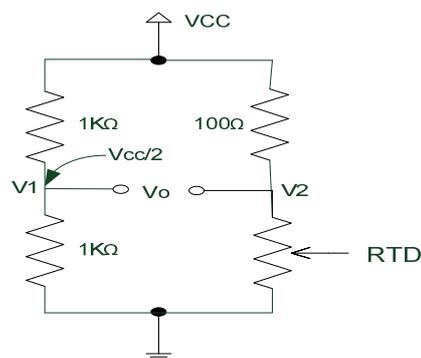


Figura 2.12 Circuito puente de wheatstone

$$V_o = V1 - V2$$

Ecuación 2.7

$$\text{RTD } (0^\circ\text{C}) = 100\Omega \implies V_o = 0V //$$

$$\text{RTD } \neq 100\Omega \implies V_o \neq 0V //$$

$$\text{RTD } \neq 100\Omega \implies V_o \neq 0V //$$

La Figura 2.13 detalla el acondicionamiento completo del sensor RTD.

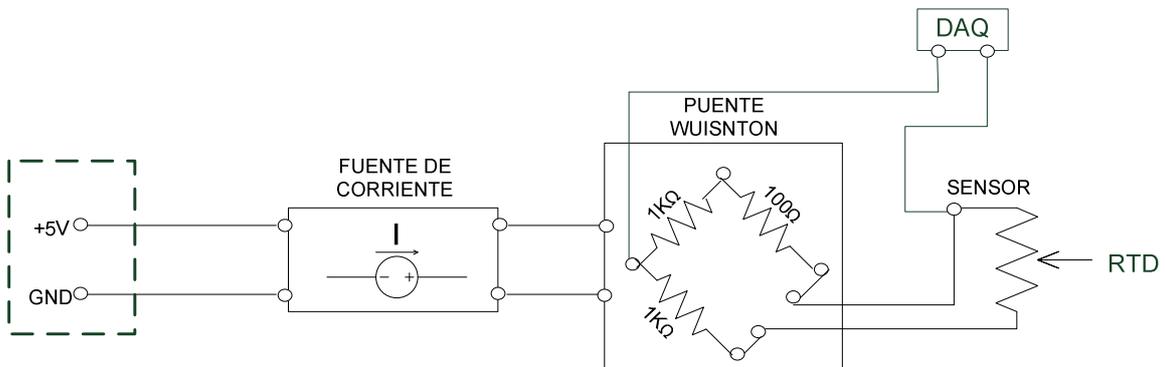


Figura 2.13 acondicionamiento del RTD

Se escogió la RTD modelo Pt100 debido a las siguientes características:

Metal	Resistividad $\mu\Omega/\text{cm}$	Coefficiente de t^0 $\Omega/^\circ\text{C}$	Intervalo útil de temperatura $^\circ\text{C}$	Resist 0°C Ω	Precisión $^\circ\text{C}$
Platino	9.83	0.003850	-200 a 950	25, 100, 130	0.01

Tabla 2.8 Características del RTD modelo Pt100.

2.2.3 SENSOR DE VACÍO

En la Figura 2.14 se muestra en un diagrama de bloques el circuito de control para el sensor de vacío.



Figura 2.14 Diagrama de bloques del sensor de vacío.

El sensor VSP62 con transductor de vacío, es utilizado para medir la presión de vacío del liofilizador Stokes, con salida de voltaje de 1.5 a 8.5 V. Esta señal de voltaje es adquirida por la tarjeta de adquisición de datos, y es visualizada mediante la PC. A continuación se detalla el sensor VSP62 en la Figura 2.15.



Figura 2.15 Sensor de vacío

Donde:

- Pin 1: Resistencia terminal de línea (3 K Ω a GND)
- Pin 2: Señal de salida 0-10V (Rango de medición: 1.5-8.5V)
- Pin 3: La tierra de señal AGND
- Pin 4: Fuente de alimentación 15-30V_{DC}
- Pin 5: Fuente común GND
- Pin 6: Protección

Para su funcionamiento requiere de una fuente de precisión de 24VDC, de acuerdo a las características mencionadas por el fabricante. Se detalla en la Figura 2.16 las conexiones eléctricas de este dispositivo.

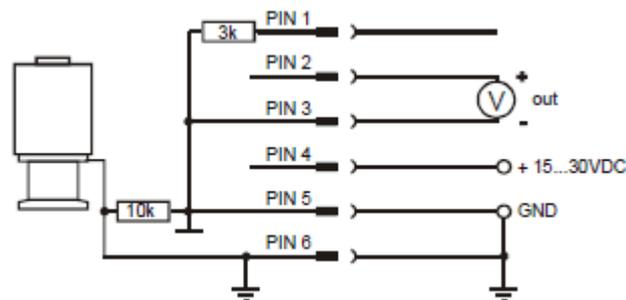


Figura 2.16 Conexiones eléctricas del sensor de vacío VSP62.

Por el Pin2 y Pin3 se obtendrá la señal de salida, la misma que es utilizada para el registro de datos⁶[THYRACONT].

2.3 SELECCIÓN DE LA FUENTE PARA EL SENSOR DE VACÍO

Esta fuente convierte el voltaje de entrada de 110VAC a los 24VDC, regulados. La fuente es tal como se indica en la Figura 2.17, para un mejor detalle ver el anexo 4.⁷

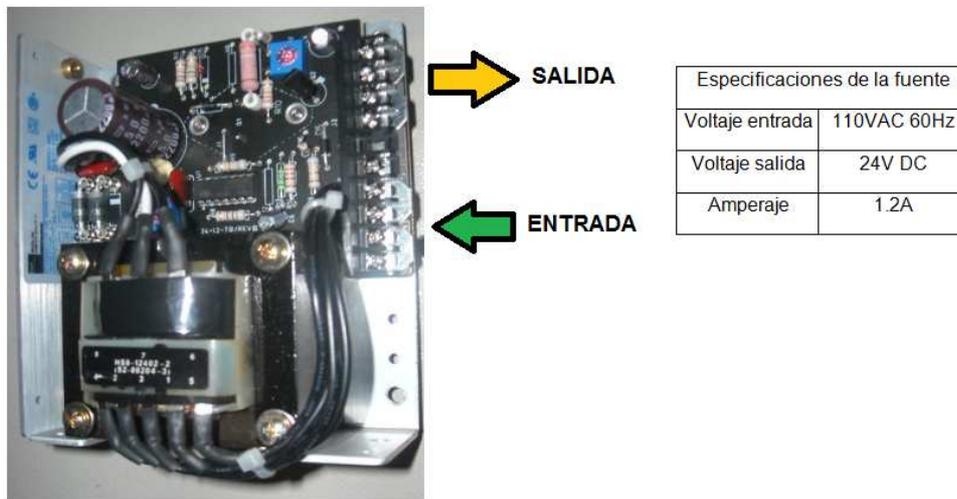


Figura 2.17 Fuente para la alimentación del sensor de vacío.

2.4 FUENTE DE PODER

La fuente de alimentación utilizada para este proyecto es la que se muestra en la Figura 2.18, y proporciona los siguientes rangos de voltaje y corriente:

⁶ http://www.thyracont.com/media/man_vsp62_lq.pdf

⁷

http://www.solahevidutysales.com/silver_line_series_single_multi_output_linears.htm

- a) Una fuente simétrica de voltaje regulado $\pm 9V$ utilizada para alimentar el acondicionamiento del termopar (J).
- b) Fuente de 12 voltios continúa para energizar el sistema de ventilación.
- c) Una fuente de 12V DC para energizar el control de los Mosfet de potencia.
- d) Dos fuentes de corriente de 5mA para alimentar los acondicionamientos de los sensores de temperatura RTD1 y RTD2.
- e) Fuente de 5V para la alimentación del control por ciclo integral mediante un PIC 16F873A. Todas estas fuentes mencionadas anteriormente se encuentran aisladas entre sí.



Figura. 2.18 Fuente de alimentación

En la Figura 2.19, se detalla la distribución de pines de los conectores que salen de la fuente de alimentación a la placa de acondicionamientos y a la placa de control en la Figura 2.20.

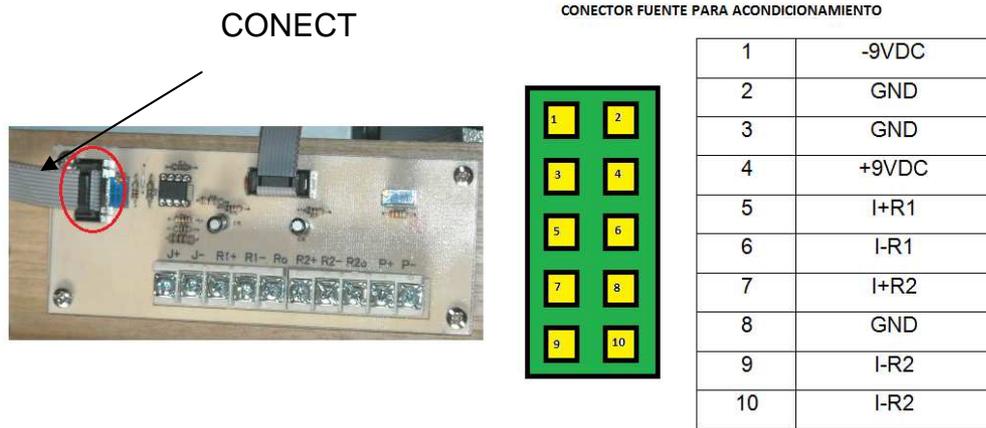


Figura 2.19 Alimentación a la placa de acondicionamientos

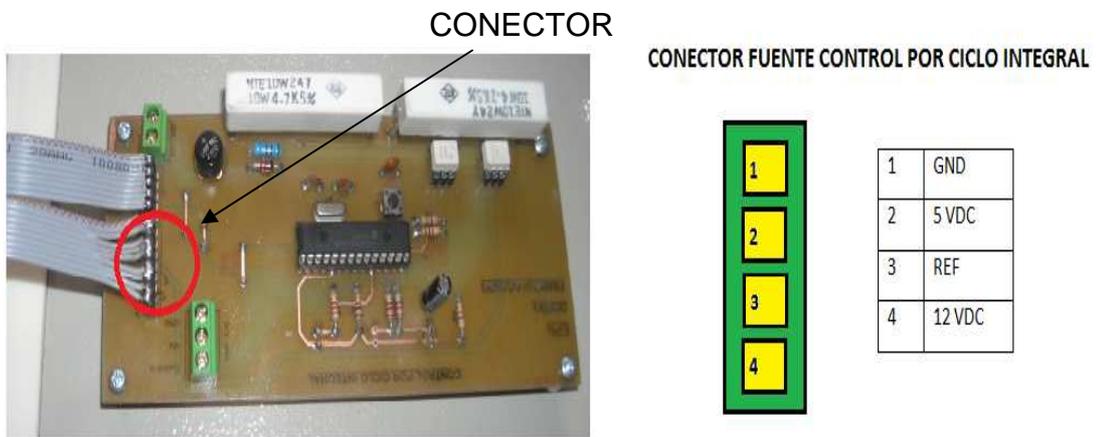


Figura 2.20 Alimentación a la placa de control

2.5 DIAGRAMA DEL CIRCUITO ELECTRICO LIOFILIZADOR

En plano de formato A2 de la Figura 2.21 y escala 1:1, se detalla el diagrama eléctrico total de la planta, con sus respectivas modificaciones implementadas en este proyecto de titulación.

En el siguiente capítulo se trata sobre el desarrollo de los programas y del algoritmo utilizado para hacer el control del sistema automatizado del liofilizador y la HMI diseñada en Labview.

CAPÍTULO 3

DISEÑO DEL SOFTWARE DEL SISTEMA

En este capítulo se diseña el software de soporte del sistema que busca ofrecer herramientas para la comunicación y visualización de sus variables más relevantes.

El desarrollo del software para la Interfaz Hombre-Máquina (HMI) se realizó en el programa Labview, mientras que para los microprocesadores se utilizó el programa MicroCode Studio.

La programación, diagramas de flujo y manejo del software desarrollado, para la HMI, y el pic 16F873A para el control por ciclo integral, se describen a continuación.

3.1 DESARROLLO DE LA INTERFAZ HOMBRE-MÁQUINA (HMI)

La Interfaz Hombre Máquina (HMI) es un medio que facilita y posibilita que un operador humano (usuario) pueda interactuar con un proceso, hoy en día con la ayuda de un computador y software, permitiendo la supervisión de las variables involucradas en el sistema.

En el desarrollo de las pantallas de la HMI el objetivo primordial que se buscó cumplir fue supervisar el sistema en forma amigable al operador, y que su empleo sea fácil e intuitivo.

3.1.1 PROGRAMA LABVIEW

Labview es una plataforma para el diseño y desarrollo de aplicaciones para adquisición de datos, control de instrumentos y automatización industrial.

Posee “Instrumentos Virtuales” Vis que contienen una interface interactiva de usuario, el panel frontal, que simula el panel de un instrumento físico. Se puede ingresar datos usando el teclado o el ratón y tener una visualización de los resultados en la pantalla del computador. El Panel Frontal es la interface hombre-máquina (HMI) de un VI.

Para el presente proyecto se desarrolló el panel frontal de la Figura 3.1.

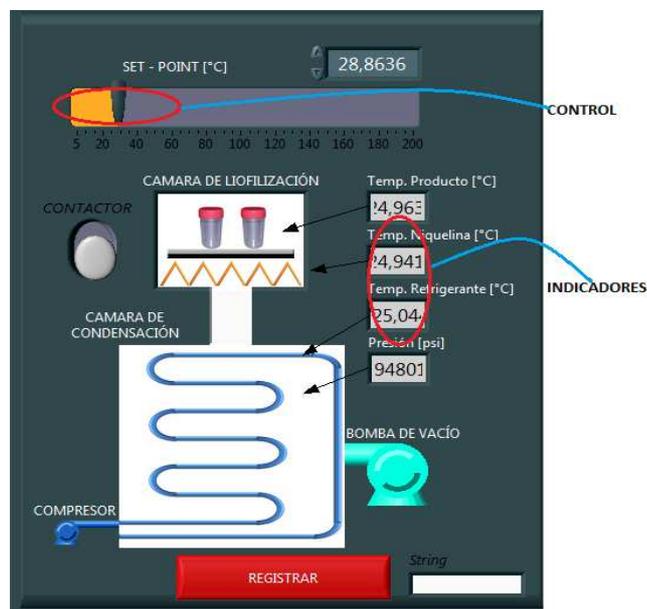


Figura 3.1 Panel Frontal del control del HMI.

3.1.1.1 Diagrama de bloques

El diagrama de bloques contiene el código fuente gráfico del VI. Posee funciones y estructuras que relacionan las entradas con las salidas creadas en el panel frontal.

En un diagrama se distinguen: Terminales, que representan los controles e indicadores del panel. Además, presenta funciones y SubVIs, que realizan ciertas tareas específicas.

Estructuras y cables determinan el flujo de los datos en el programa. En

general, cualquiera de estas partes en el diagrama de un VI se denomina NODO. Los nodos son elementos de ejecución del programa, pueden ser análogos a estatutos, funciones y subrutinas en lenguaje de programación basada en texto.

El diagrama de bloques de la Figura 3.2 muestra el código fuente correspondiente al panel de la Figura 3.1

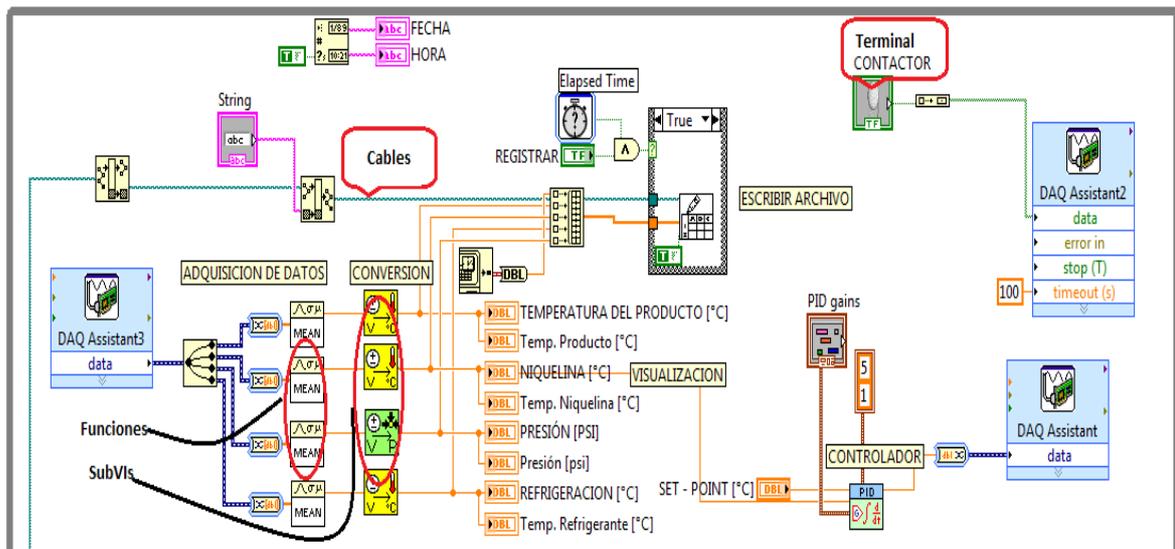


Figura 3.2 Diagrama de bloques del control HMI.

3.1.1.2 VI Utilizados en el HMI

Para realizar la HMI del control de la temperatura del aceite y registro de datos de la temperatura del producto, temperatura de refrigeración y presión de vacío, se utilizaron los VIs que se describen a continuación.

3.1.1.2.1 Create Folder

Crea una carpeta para guardar los archivos de registros de datos.

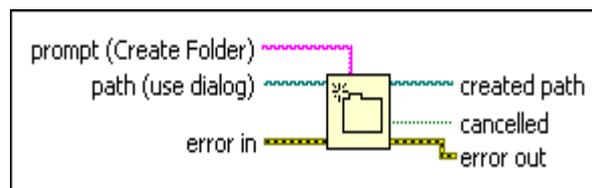


Figura 3.3 Crea una carpeta.

Se configuró para permitir abrir la dirección de la carpeta donde se direcciona los datos del proceso.

3.1.1.2.2 Build Path Function

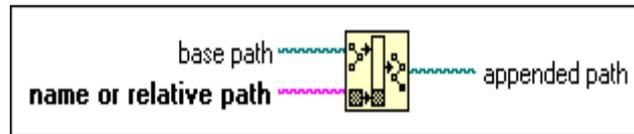


Figura 3.4 Crea una ruta de acceso.

Crea una ruta de acceso, esta función agrega el nombre con la que se guarda el archivo dentro de la carpeta especificada.

3.1.1.2.3 Write to spreadsheet file.vi

Esta herramienta sirve para abrir o crear el archivo antes de escribir en él, y lo cierra después.

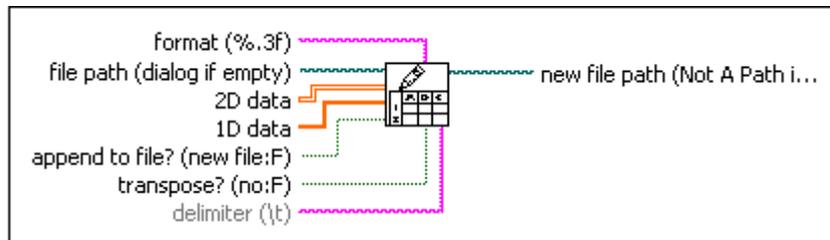


Figura 3.5 Vi para escribir los datos de la variable del proceso.

La configuración de este VI permite crear un archivo de texto de las temperaturas del producto, refrigeración y presión de vacío legible en las aplicaciones de hoja de cálculo.

3.1.1.2.4 Read from spreadsheet file.vi

Lee un número especificado de líneas o filas de un archivo de texto numérico a partir de una dirección especificada y convierte los datos en una matriz de segunda dimensión, de doble precisión de números, cadenas, o enteros.

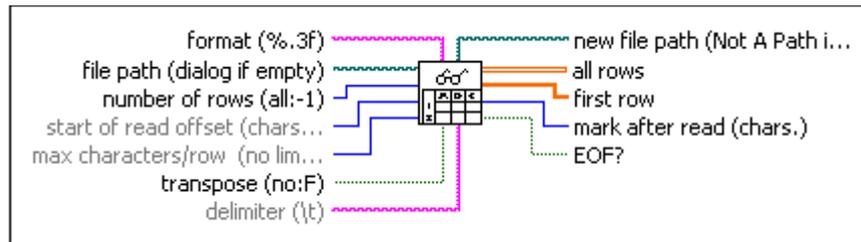


Figura 3.6 Vi para leer los datos guardados en un archivo.

Este VI permite leer los datos guardados en un archivo, y graficarlos para obtener la curva característica del proceso en forma global.

3.1.1.2.5 DAQ Assistant.

Crea, edita y ejecuta tareas con la tarjeta de adquisición de datos de NI (National Instrument).

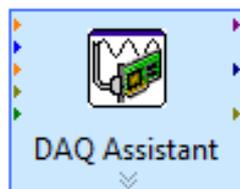


Figura 3.7 Vi para configurar entradas y salidas digitales y análogas.

Mediante este VI se configura las entradas análogas para leer los datos generados por los sensores rtd, termocupla y sensor de presión, configurar una salida análoga de voltaje para que sea entregada al microprocesador, y también genera una salida digital para activar las niquelinas por medio de un contactor de potencia.

3.1.1.2.6 Mean vi

Calcula la media de los valores de la secuencia de entrada X.

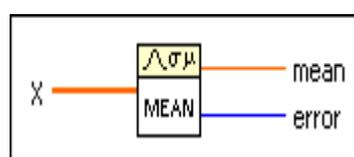


Figura 3.8 Calcula la media aritmética.

Este VI se configuro para atenuar el ruido producido por agentes externos, mediante software.

3.1.1.2.7 PID vi

El controlador PI fue programado utilizando el bloque PID de VI de la Figura 3.9, el cual implementa un algoritmo que es ideal para aplicaciones de control con realimentación.

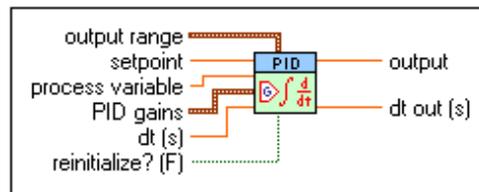


Figura 3.9 Control PID.

Este VI se configuró para un control proporcional integral. La salida de esta señal es adquirida por la tarjeta de adquisición de datos, mediante su salida análoga entrega un rango de voltaje que varía entre 1V a 5V al microprocesador.

3.1.1.3 Configuración de VI para Adquisición de Datos

Para la adquisición de datos se usa la librería de Data Acquisition de Labview DAQmx, que permite de una manera rápida y sencilla la configuración del NI 6009 para generar y recibir señales tanto analógicas como digitales.

3.1.1.3.1 Configuración de las entradas analógicas

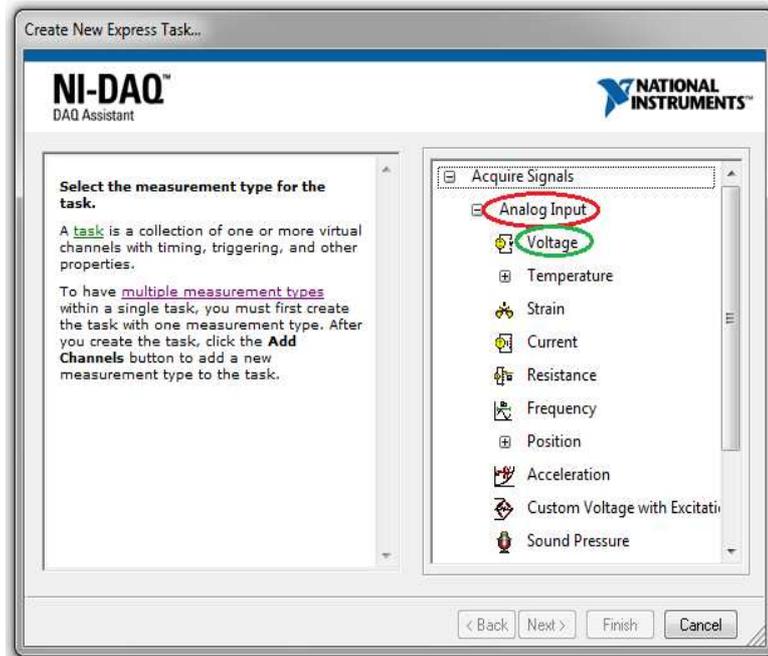


Figura 3.10 Configuración DAQ como entradas de voltaje.

Una vez seleccionado el tipo de señal que se quiere recibir, el DAQ assistant muestra los dispositivos conectados al ordenador y los respectivos canales por los que se puede obtener la señal.

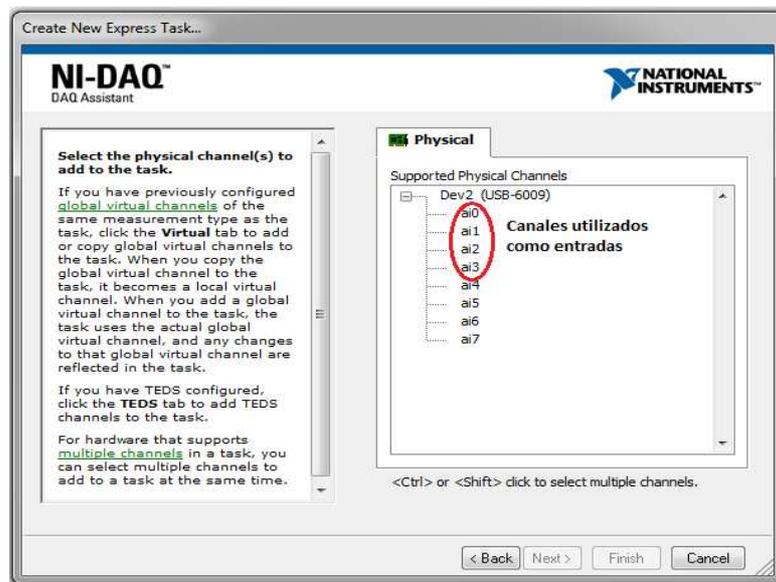


Figura 3.11 Configuración entradas análogas DAQ

Luego de escoger los canales por los que se quiere recibir las señales, el DAQ Assistant permite configurar el número y la frecuencia del muestreo, así como los rangos esperados de la señal a recibir.

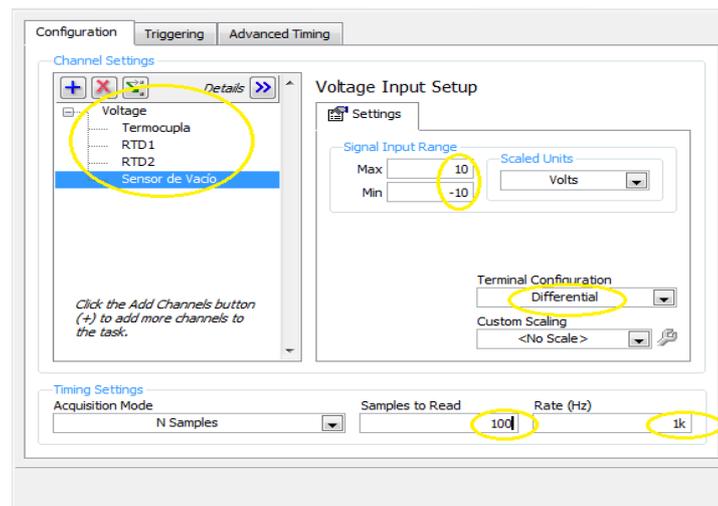


Figura 3.12 Configuración DAQ en modo diferencial.

Una vez terminado de configurar los datos, se procede a aceptar el asistente DAQ, y este automáticamente genera un SubVI cuya salida es la señal censada por él NI 6009.⁸

3.1.1.3.2 Configuración de salida análoga

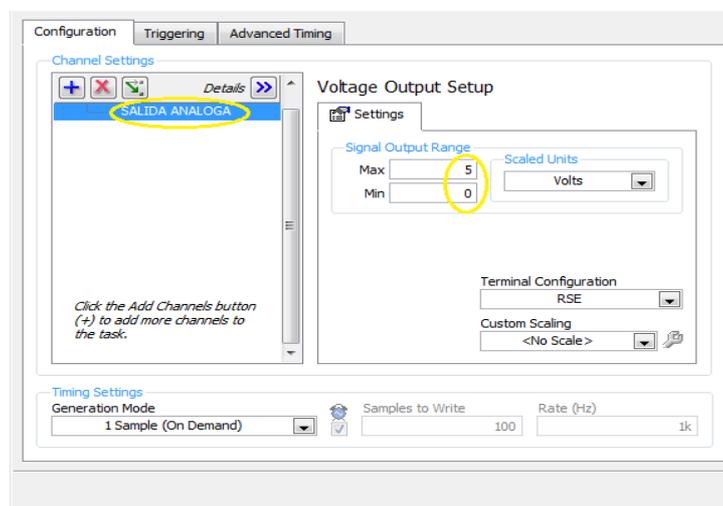


Figura 3.13 Configuración DAQ para salida análoga.

En DAQ se configura la salida análoga (A0), con un valor de 0V a 5V, para ser entregados por el puerto análogo al microprocesador.

⁸ www.ni.com

3.1.1.3.3 Configuración de salida Digital

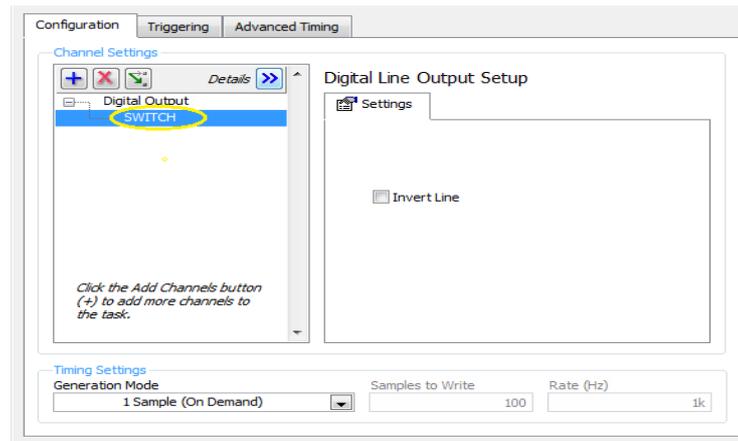


Figura 3.14 Configuración DAQ para salida digital.

Configura la salida digital (Line0) para cerrar el circuito eléctrico.

3.3.2 DESARROLLO DE LA HMI

La Interfaz Hombre-Máquina (HMI) para este proyecto permitirá supervisar el proceso de la máquina liofilizadora de forma global. La HMI deberá almacenar la información de las variables del proceso para tener históricos para cada una de ellas.

La HMI fue diseñada para permitir:

- En forma amigable visualizar el estado del proceso de liofilización en forma global, a través de un computador.
- Almacenar la información de las variables del proceso para tener históricos para cada una de ellas.
- La interacción entre el usuario y el sistema en todo momento.

El software elegido para realizar la HMI es Labview 2009.

La HMI implementada en este proyecto tiene cuatro páginas para realizar el monitoreo con los siguientes nombres: Bienvenida, información, monitoreo y

control, y analices de datos. Al abrir el programa en el computador, aparece la pantalla de la Figura 3.15.



Figura 3.15 Pantalla Principal.

OPCIÓN	DESCRIPCIÓN
Contraseña	Permite ingresar una contraseña.
Ingresar	Permite acceder a las demás páginas y al software del HMI interactiva con el usuario, después de haber ingresado correctamente la contraseña.
Salir	Permite salir del programa de la HMI.

Tabla 3.2 Descripción de la Pantalla Principal.

Al momento de ingresar la contraseña correctamente y hacer clic en la opción “Ingresar”, se visualiza la pantalla de la Figura 3.16.

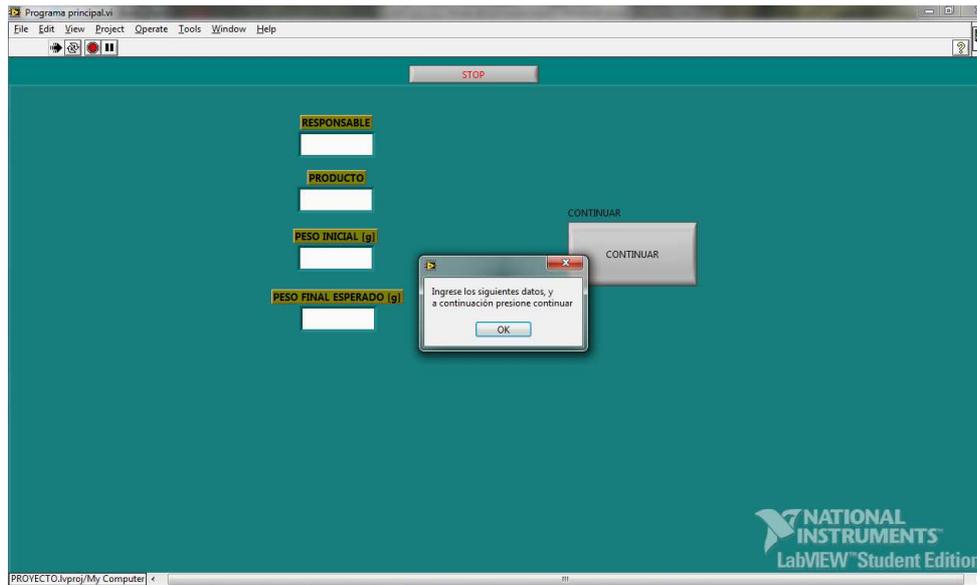


Figura 3.16 Pantalla Principal para el ingreso de parámetros.

OPCIÓN	DESCRIPCIÓN
Responsable	Permite ingresar el nombre del operario que va estar encargado de manipular el proceso.
Producto	Permite ingresar el nombre de la muestra que se va a deshidratar en el liofilizador.
Peso inicial	Permite ingresar el peso inicial de la muestra.
Peso final esperado	Permite ingresar el peso final esperado de la muestra, que es el 20% del peso inicial.

Tabla 3.3 Descripción Principal para el ingreso de parámetros.

Una vez ingresados los parámetros para el proceso de liofilización de acuerdo a la muestra a deshidratarse, al dar un clic en la opción “Continuar” se visualiza la pantalla de la Figura 3.17.

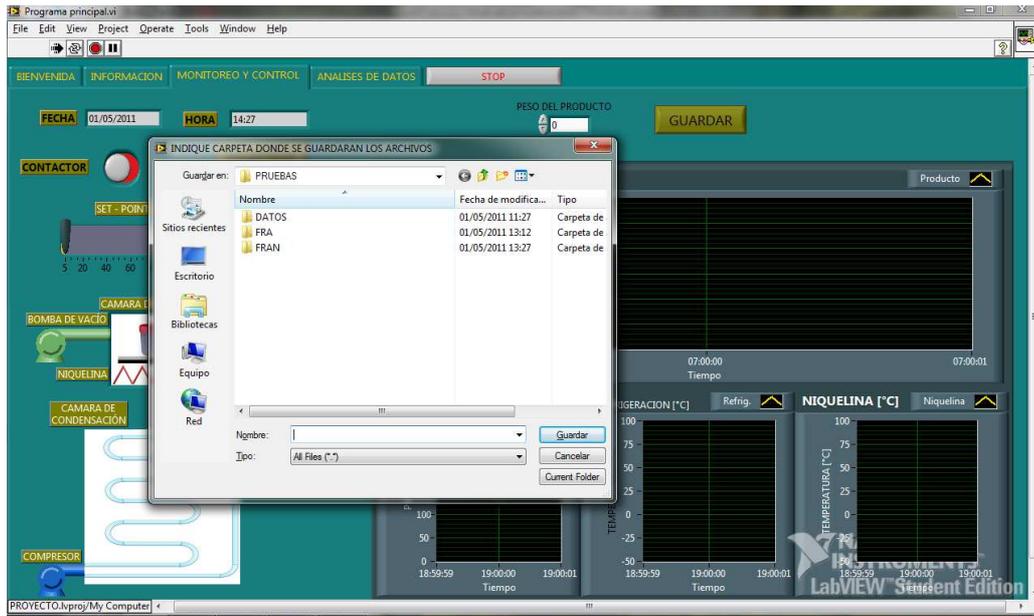


Figura 3.17 Pantalla Principal para guardar los parámetros.

Una vez seleccionado la ubicación donde se desea guardar el archivo de registro, la HMI permite tener acceso a las siguientes opciones:

- Opción de “Bienvenida”
- Opción de “Información”
- Opción de “Monitoreo y Control”
- Opción de “Análisis de datos”
- Opción “Salir”

3.3.2.1 Opción “Bienvenida”

Al ingresar a la opción “Bienvenida” se visualiza la pantalla de la Figura 3.15, la cual permite visualizar la información del título del proyecto.

3.3.2.2 Opción “Información”

Al ingresar a la opción de “Información” se visualiza la pantalla de la Figura 3.18, esta permite al usuario acceder a visualizar el estado de la información ingresada del operador y de la muestra a deshidratar.



Figura 3.18 Pantalla de Información.

3.3.2.3 Opción “Monitoreo y Control”

Al ingresar a la opción de “Monitoreo y Control” se visualiza la pantalla de la Figura 3.19.

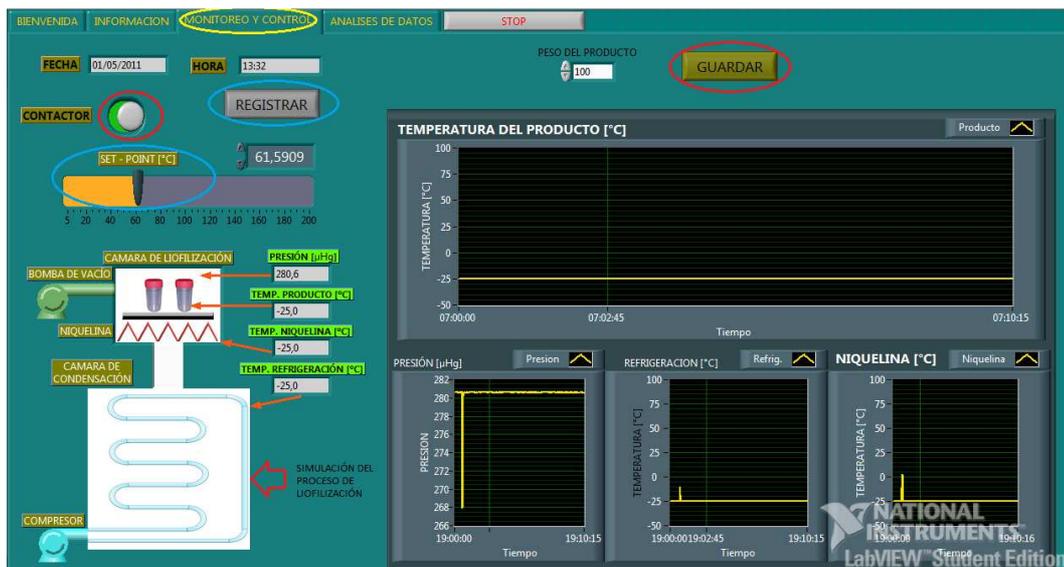


Figura 3.19 Pantalla de Monitoreo y Control.

OPCIÓN	DESCRIPCIÓN
Registrar	Permite guardar las variables del proceso las cuales son: temperatura del producto, temperatura de refrigeración, temperatura del aceite circulante por las placas de calentamiento, y la presión de vacío, en una hoja de datos del programa Microsoft Excel.

Guardar	Permite guardar manualmente al operario, los datos del peso del producto, los cuales son almacenados en otra hoja de datos del programa Microsoft Excel.
Contactador	Permite energizar al circuito de potencia.
Set Point	Permite determinar el valor de Set-Point de acuerdo a la aplicación a realizarse.
Gráficas en tiempo real	Permite visualizar la temperatura de la muestra a deshidratarse en tiempo real.

Tabla 3.4 Descripción de la Pantalla Principal.

3.3.2.4 Opción “Análisis de Datos”

Al ingresar a la opción de “Análisis de Datos” se visualiza la pantalla de la Figura 3.20.

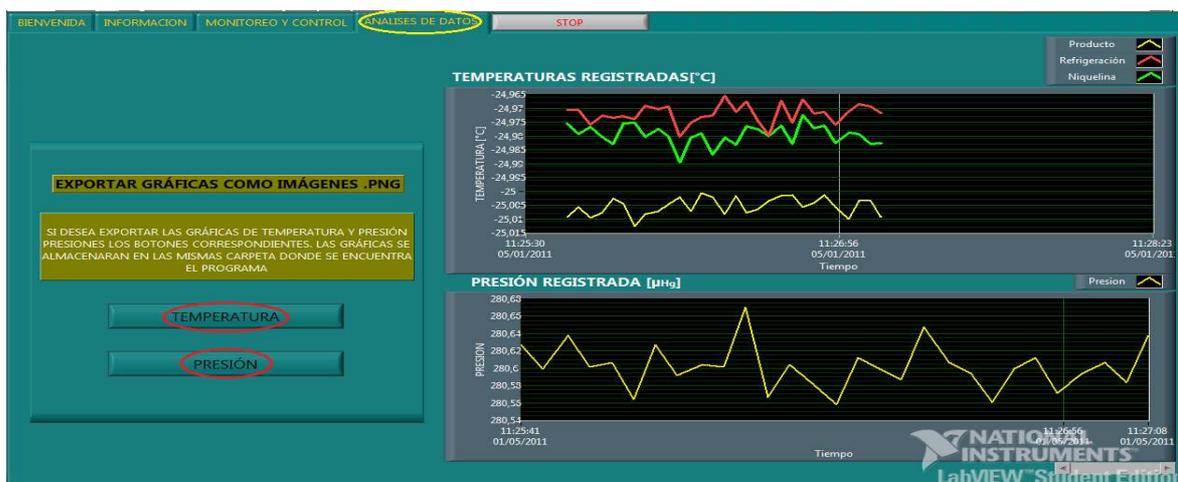


Figura 3.20 Pantalla de análisis de datos.

OPCIÓN	DESCRIPCIÓN
Temperatura	Permite al operario exportar gráficas de temperatura del producto, temperatura de refrigeración y temperatura del aceite circulante de las placas, y todas estas variables en una sola grafica como archivo tipo imagen.
Presión	Permite al operario exportar las graficas de presión de vacío, y se guardan dichas gráficas como archivo tipo imagen.

Tabla 3.5 Descripción del analices de datos.

3.3.2.5 Opción “Salir”

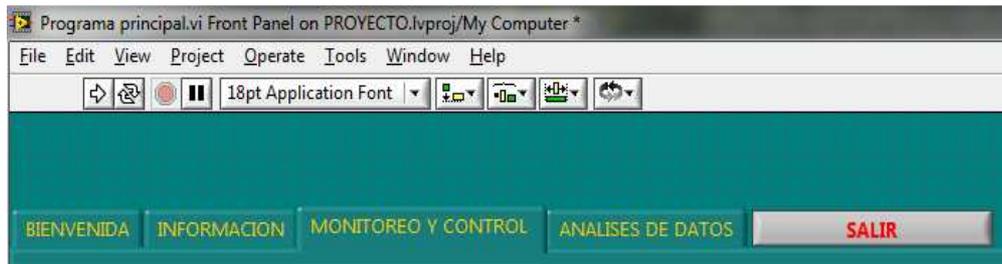


Figura 3.21 Pantalla Salir

OPCIÓN	DESCRIPCIÓN
Salir	Permite volver a la pantalla principal.

Tabla 3.6 Descripción de la Pantalla Salir.

3.3.3 CREACIÓN DE UN PAQUETE EJECUTABLE EN LABVIEW

Mediante este archivo ejecutable se ejecuta la aplicación en cualquier PC por medio de un dispositivo externo, para no tener inconvenientes en correr la aplicación se debe instalar **ron-time engine** que tiene la capacidad de abrir y correr cualquier VI de Labview. Para realizar el paquete ejecutable, se debe guardar la aplicación como un proyecto en Labview, y con la ayuda del comando **aplicación builder** se puede crear un ejecutable de cualquier VI.

Se creó este paquete con el objetivo que los operarios no puedan realizar ninguna modificación en el software, ya que los mismos no tienen acceso al código fuente en este caso solo panel frontal, y para reemplazar a la computadora designada ha este proyecto con otra PC en caso que esta sufra cualquier daño de software o hardware.

3.3.4 DIAGRAMA DE FLUJO DE LA HMI

En el diagrama de flujo mostrado en la Figura 3.22 se ilustra el funcionamiento de la HMI.

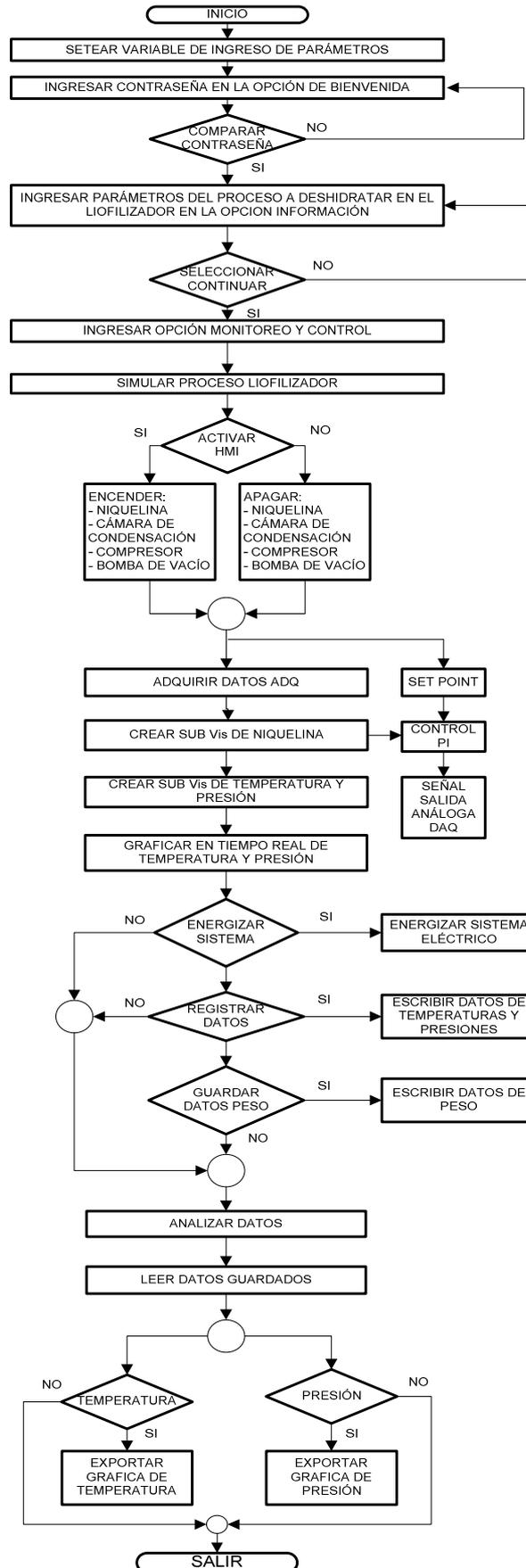


Figura 3.22 Diagrama de Flujo para el programa de La HMI.

3.2 DESARROLLO DEL PROGRAMA DEL PIC 16F873A PARA EL CONTROL POR CICLO INTEGRAL

Las tareas y funciones que ejecuta el microprocesador PIC 16F873A en el módulo de control son las siguientes:

Lee el puerto del conversor análogo digital en un rango de 1 a 5V, que es entregado por medio de la tarjeta de adquisición de datos. En el siguiente el microprocesador por el pòrticoA.0 recibe un voltaje análogo. De acuerdo al voltaje que recibe, se compara con una tabla para determinar cuántos ciclos serán activados dentro de un rango de 20 pasos, y así se tendrá un control del actuador por ciclos enteros. A continuación se detalla en la Tabla 3.7 los rangos de porcentaje y voltaje para el control por ciclo integral a través del microprocesador.

PASOS																					
V	%	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.25	5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.50	10	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.75	15	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
1	20	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
1.25	25	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0
1.50	30	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0
1.75	35	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0
2	40	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0
2.25	45	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0
2.50	50	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
2.75	55	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
3	60	1	0	1	1	0	1	0	1	1	0	1	0	1	1	0	1	0	1	1	0
3.25	65	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0
3.50	70	1	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	1	0
3.75	75	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0
4	80	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0
4.25	85	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0
4.50	90	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
4.75	95	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	100	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Tabla 3.7 Tabla de Control de Ciclo Integral

El microprocesador, de acuerdo al rango de voltaje, enviará una señal de salida de uno lógico a las compuertas del Mosfet de Potencia, para el control de la niquelina.

Después se detecta el cruce por cero. Al momento que la onda senoidal cruza por cero envía una señal de uno lógico al pòrticoB.0 del microprocesador para dar paso al flujo de datos, de acuerdo a la Tabla 3.7, para permitir encender y apagar los mosfet.

En el diagrama de flujo de la Figura 3.24 se ilustra el funcionamiento del programa grabado en el microprocesador PIC16F873A.

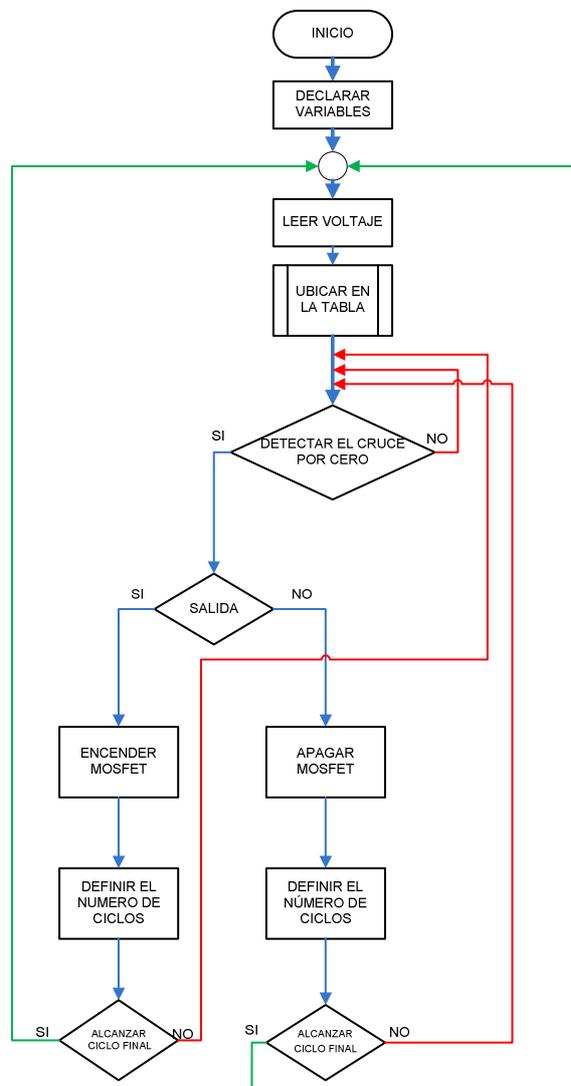


Figura 3.24 Diagrama de flujo del Control Por Ciclo Integral

A continuación se describe en lenguaje estructurado con más detalle el código del programa.

Declarar variables

Configurar puertos A, B como entradas o salidas
Encerar los puertos
Declarar variables
Cargar valores de algunas variables en la EEPROM
Encerar y dar valores iniciales a las variables

Fin tarea

Leer voltaje

Leer pórtilo A.0 del conversor análogo digital

Fin tarea

Ubicar en la tabla

Comparar y leer el voltaje del pórtilo A.0 con los valores de la tabla almacenada en la EEPROM

Fin tarea

Detectar el cruce por cero

Leer pórtilo B.0
Enviar valores lógicos por el pórtilo de salida B.1

Fin tarea

Incrementar

Cargar en el pórtilo B.1 un valor de 0 ó 1 lógico

Fin de tarea

Una vez diseñado el hardware y software necesario para la operación del sistema automatizado para el control del liofilizador, se procedió a su construcción e implementación realizando pruebas pertinentes así como de los programas que controlan y monitorean este sistema.

En el capítulo cuatro se reportan los resultados de las pruebas realizadas a todo el sistema de control automatizado para el control del liofilizador.

CAPÍTULO 4

PRUEBAS Y RESULTADOS

Diseñado el hardware y software del sistema automatizado de control del liofilizador “STOKES” descrito en los capítulos anteriores, en este capítulo se describe las pruebas y resultados obtenidos en los circuitos diseñados e implementados, para el módulo de control.

Las pruebas que se realizaron con el modulo de control son las siguientes:

- Pruebas de temperatura del producto.
- Pruebas de temperatura de refrigeración de la cámara de condensación.
- Pruebas de temperatura del aceite circulante por las placas de calentamiento.
- Pruebas de presión de vacío de la cámara de liofilización.
- Pruebas en la HMI.

En cada prueba se toma doce valores, con los cuales se calcula el valor promedio así como también la desviación estándar.

4.1 PRUEBAS DE TEMPERATURA DEL PRODUCTO

El objetivo de estas pruebas es analizar la respuesta obtenida por el sensor RTD Pt100 tipo tubo, utilizado para medir la temperatura de La muestra a deshidratar.

Para medir los valores de temperatura en grados centígrados en el producto a deshidratarse, se utilizó como referencia el sensor de temperatura de marca Digi-Sense existente en el DECAB de la EPN.

Todas estas medidas se realizaron empleando un baño termostático y un baño de hielo. Un ejemplo de cómo se tomo las medidas de temperatura se indica en la Figura 4.1.



Figura 4.1 Elemento Patrón de temperatura y baño termostático.

En la Tabla 4.1 se presenta los valores de lectura de temperatura medidos y obtenidos para esta prueba sobre el sensor. Para cada medición se tomó dos medidas.

DATOS PRUEBAS DEL PRODUCTO								
# Medida	Medida Patrón	RTD		Error relativo [%]		Promedio	Desviación Estándar	
		Dato A	Dato B	Dato A	Dato B		Dato A	Dato B
1	-0,07	-0,068	-0,069	2,86	1,43	-0,0685	0,00	0,00
2	-0,06	-0,063	-0,064	5,00	6,67	-0,0635	0,00	0,00
3	-0,06	-0,064	-0,058	6,67	3,33	-0,061	0,00	0,00
4	32,62	33,24	33,4	1,90	2,39	33,32	0,44	0,55
5	32,96	33,86	33,95	2,73	3,00	33,905	0,64	0,70
6	33,44	34,85	34,95	4,22	4,52	34,9	1,00	1,07
7	43,63	43,6	44,5	0,07	1,99	44,05	0,02	0,62
8	48,97	48,83	49,33	0,29	0,74	49,08	0,10	0,25
9	48,97	49,4	50,1	0,88	2,31	49,75	0,30	0,80
10	64,37	64,55	65,66	0,28	2,00	65,105	0,13	0,91
11	64,56	64,01	63,87	0,85	1,07	63,94	0,39	0,49
12	64,14	64,63	64,7	0,76	0,87	64,665	0,35	0,40

Tabla 4.1 Datos del sensor RTD Pt100 tipo tubo en el producto.

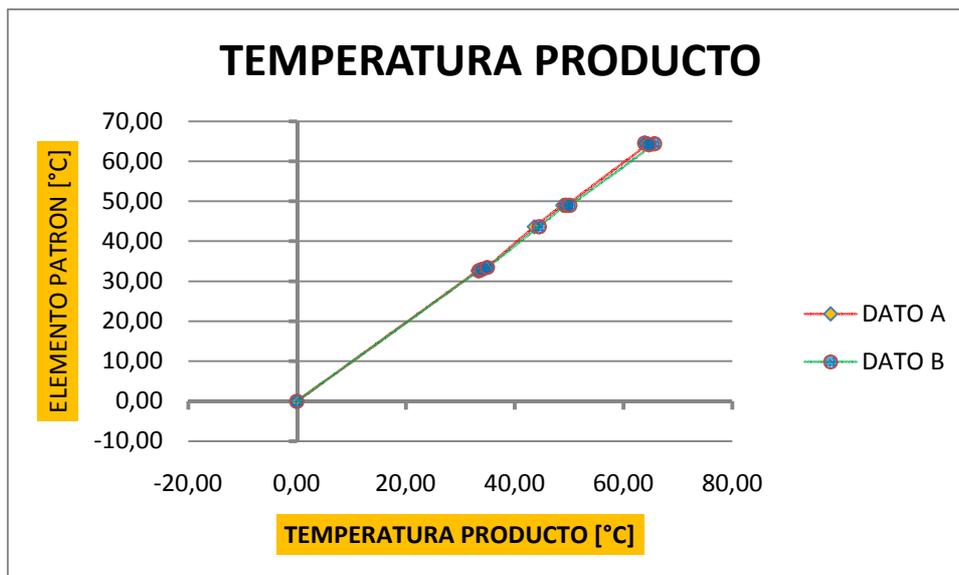


Figura 4.2 Curva de tendencia de calibración del sensor RTD Pt100 tipo tubo en el producto.

A partir de los valores de la Tabla 4.1 y Figura 4.2, se determina para la medición de temperatura en el producto que el error máximo de medición es del 6%, y la máxima desviación estándar registrada es del ± 1 °C, rangos que confirman su buen funcionamiento; ya que estos errores no afectan en la deshidratación del producto.

4.2 PRUEBAS DE TEMPERATURA DE REFRIGERACIÓN DE LA CÁMARA DE CONDENSACIÓN

Para medir los valores de temperatura en grados centígrados del sistema de refrigeración, se utilizó el termómetro instalado en el panel frontal de la maquina liofilizadora, como se detalla en la Figura 4.3 como medida patrón, y con el sensor de temperatura RTD Pt100 tipo arandela se tomó la medida de la temperatura de la cámara de condensación.

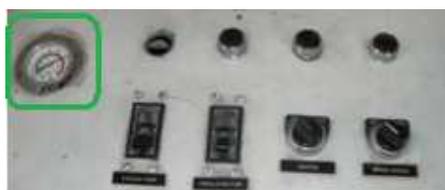


Figura 4.3 Termómetro de la maquina liofilizador.

En la Tabla 4.2 se presenta los valores de lectura de temperatura medidos y obtenidos para esta prueba. Para cada medición se tomó dos medidas.

DATOS PRUEBA DE TEMPERATURA DE REFRIGERACIÓN EN LA CÁMARA DE CONDENSACIÓN								
# Medida	MANOMETRO (°C)	RTD (°C)		Error relativo [%]		Promedio	Desviación Estándar	
		Dato 1	Dato 2	Dato 1	Dato 2		Dato 1	Dato 2
1	-17	-16,5	-16,8	2,94	1,18	-16,65	0,35	0,14
2	-19	-18,7	-19,1	1,58	0,53	-18,90	0,21	0,07
3	-21	-20,3	-20,7	3,33	1,43	-20,50	0,49	0,21
4	-23	-23,5	-23,5	2,17	2,17	-23,50	0,35	0,35
5	-25	-25,2	-25,2	0,80	0,80	-25,20	0,14	0,14
6	-28	-28,47	-28,47	1,68	1,68	-28,47	0,33	0,33
7	-32	-32,3	-32,3	0,94	0,94	-32,30	0,21	0,21
8	-38	-37,8	-37,8	0,53	0,53	-37,80	0,14	0,14
9	-38	-37,9	-38	0,26	0	-37,95	0,07	0
10	-38	-38	-38	0	0	-38,00	0	0
11	-36	-36,4	-36,5	1,11	1,39	-36,45	0,28	0,35
12	-40	-40,6	-40,3	1,50	0,75	-40,45	0,42	0,21

Tabla 4.2 Datos de temperatura del sensor RTD Pt100 tipo arandela en el sistema de refrigeración.

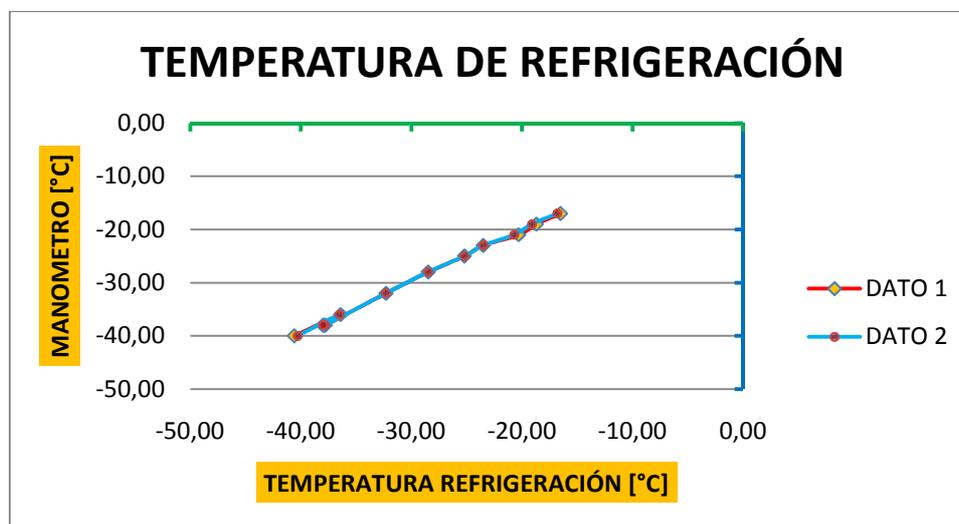


Figura 4.4 Curva de tendencia de calibración del sensor RTD Pt100 tipo arandela en el sistema de refrigeración.

Como se observa en la Figura 4.4 y de la Tabla 4.2 se determina para la medición de temperatura de refrigeración en la cámara de condensación, el error máximo de medición es del 3,3%, y la máxima desviación estándar es del $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$, rangos

que confirman su buen funcionamiento; ya que estos no afectan en el sistema de liofilización.

4.3 PRUEBAS DE TEMPERATURA DEL ACEITE CIRCULANTE POR LAS PLACAS DE CALENTAMIENTO

Para medir los valores de temperatura en grados centígrados del sistema de calentamiento del aceite circulante por las placas de calentamiento se utilizó la termocupla tipo J.

En la Tabla 4.3 se presenta los valores de lectura de temperatura medidos y obtenidos para esta prueba. Para la medición se tomó una medida. Debido a que no se dispone de un equipo patrón para medir temperatura. Por esta razón tampoco se realizó comparaciones de valores medidos, ni el cálculo de porcentaje de error, ni de la desviación estándar.

Se realizó una medida colocando un termómetro sobre las placas de calentamiento, lo que motiva a un ajuste. Se reflejan medidas de la efectividad del sistema de control. En la Tabla 4.3

TEMPERATURA DE LA NIQUELINA		
	SET-POINT 40,39°C	
# Medida	TERMOCUPLA J (°C)	TIEMPO (min)
1	7,2	0
2	7,48	1
3	15,8	3
4	27,4	4
5	34,7	5
6	37,7	6
7	40,2	7
8	40,64	8
9	40,36	15
10	40,4	21
11	40,63	40
12	40,33	48

Tabla 4.3 Datos de temperatura de la termocupla tipo J del sistema del aceite circulante por las placas de calentamiento.

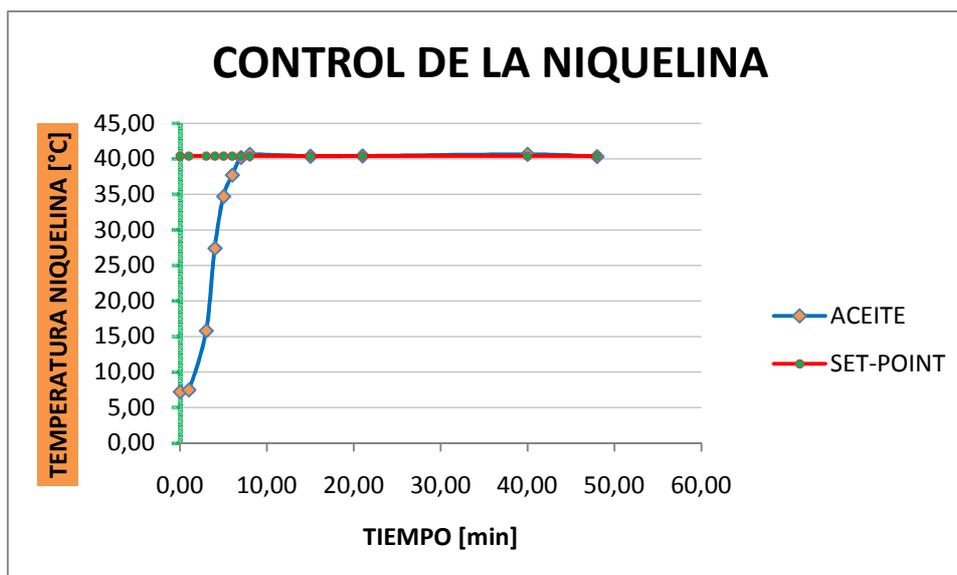


Figura 4.5 Curva de tendencia de calibración de la termocupla tipo J del aceite circulante por las placas de calentamiento.

En la Figura 4.5 se observa que la temperatura del aceite crece rápidamente hasta alcanzar el Set-Point determinado y permanece en el punto de consigna a 40,39°C. De aquí se concluye que el sistema de control por ciclo integral tiene una buena respuesta.

4.4 PRUEBAS DE PRESIÓN DE VACÍO DE LA CÁMARA DE CONDENSACIÓN

Para medir la presión de vacío de la cámara de condensación se implementó lo siguiente: un circuito divisor de voltaje en el rango de 1.5V a 8.5V, que es el voltaje de salida del sensor de vacío VPS62, que debió ser adquirido para la implementación.

Para la medida del vacío, en la HMI se implementó un algoritmo para representar en un valor numérico entendible para el operario en unidades de micrones de mercurio (μHg). Estas medidas no se realizaron debido a que el sensor de vacío no pudo ser adquirido dentro del plazo del proyecto.

En la Tabla 4.4 se presenta los valores de lectura de voltajes y presión obtenidos simulando que se estaba trabajando con el sensor de vacío VPS62, con el objetivo de que cuando se adquiriera el software de soporte esté listo. Para las mediciones de voltaje relacionadas con la presión de la HMI se obtuvieron los valores siguientes.

Pruebas con el sensor de vacío		
# Medida	Voltaje	Presión [μHg]
1	8,25	783626
2	7	38240
3	6,2	5180
4	6	4183,56
5	5,5	749,67
6	5	273,07
7	4,5	77,2
8	4	22,67
9	3,5	6,75
10	3	1,75
11	2,5	0,59
12	2	0,244
13	1,5	0,074

Tabla 4.4 Datos con el sensor de vacío.

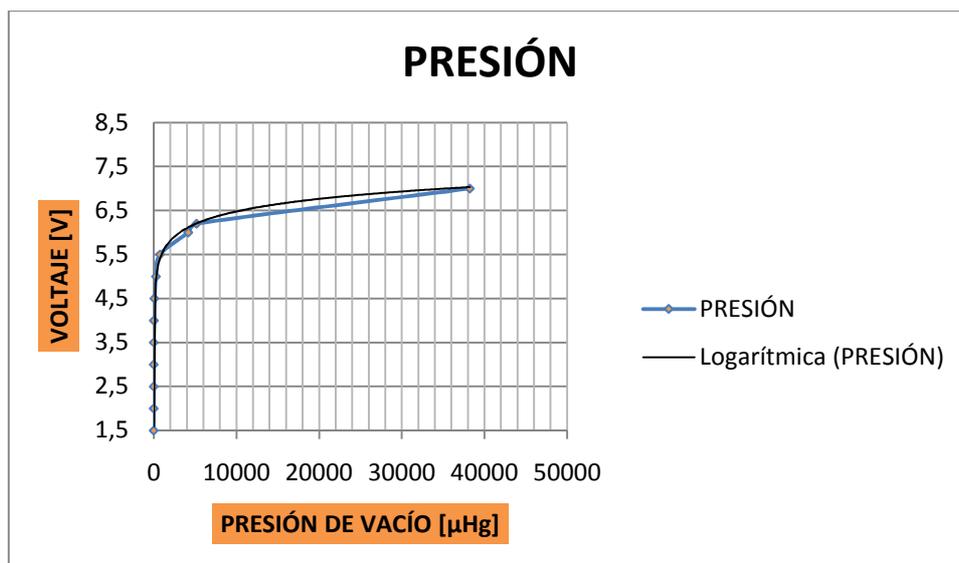


Figura 4.6 Curva de tendencia de la presión de vacío.

4.5 PRUEBAS EN LA HMI

Para verificar el funcionamiento del sistema HMI completo, se selecciono un proceso normal de trabajo. Para comenzar a realizar esta prueba se realiza los siguientes pasos:

4.5.1 AJUSTES PREVIOS

- Primero se energizó a la planta liofilizadora a un sistema de 220V
- Se activó el breaker general del sistema eléctrico
- Se encendió la PC y se corre la aplicación de la HMI.
- Se energizó al sistema de refrigeración hasta alcanzar una temperatura de -40 °C.
- La muestra que se introduce a la cámara de liofilización debe estar congelada a la misma temperatura de -40°C.
- Se energiza el sistema de la bomba de vacío y se cierra el sistema de la cámara de liofilización para alcanzar un vacío en el rango de 300 μ Hg a 200 μ Hg, como se muestra en la Figura 4.7.



Figura 4.7 Medición del vacío.

- Alcanzado estos parámetros se activa el switch de nombre contactor de la HMI, permitiendo así el funcionamiento del sistema de control.
- Luego se setea el set point por medio de la HMI a la temperatura determinada de acuerdo a la aplicación de la muestra a deshidratarse.

4.5.2 TRABAJO HMI

Con los datos obtenidos en el computador la HMI los interpreta para que dichos datos sean visualizados para la supervisión de los mismos.

En la Figura 4.8 se muestra los nombres de los controles e indicadores de la HMI.

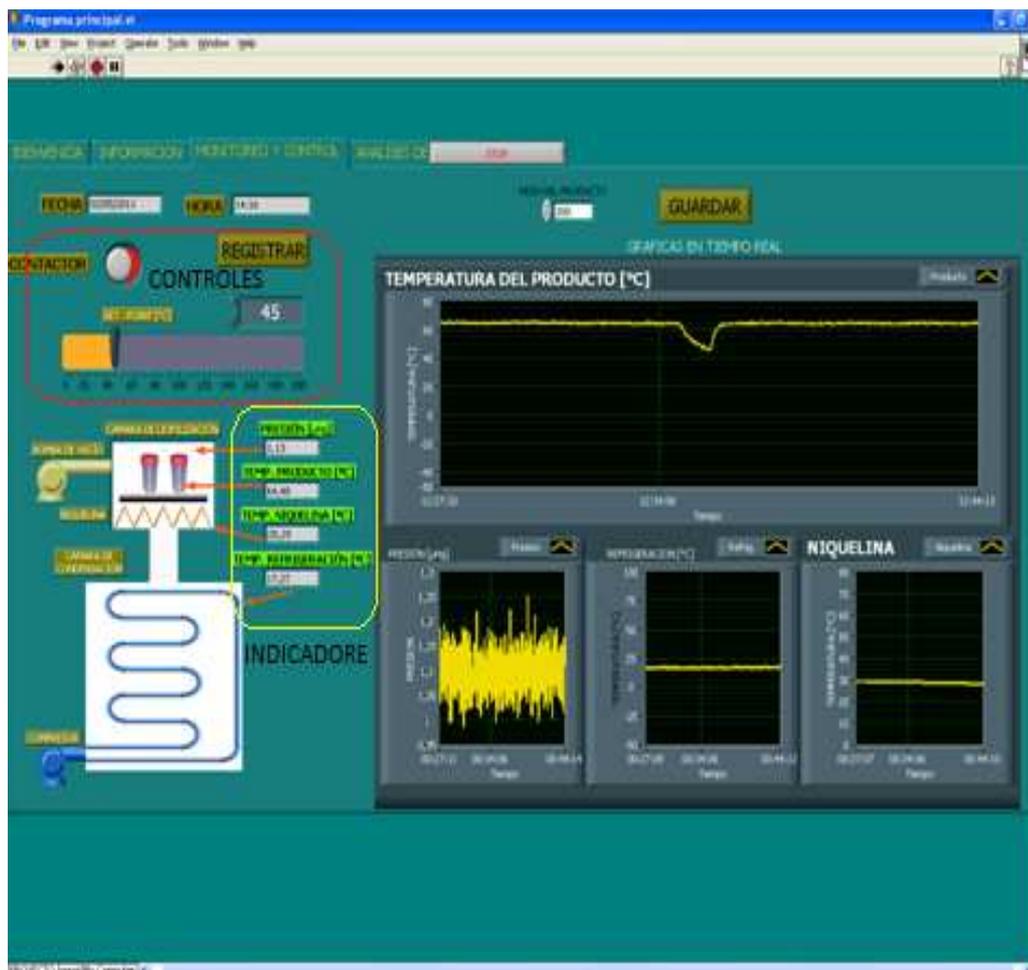


Figura 4.8 Pantalla HMI.

En la Figura 4.9 y Figura 4.10 se muestran el sistema de control y los registros de temperatura y presión.

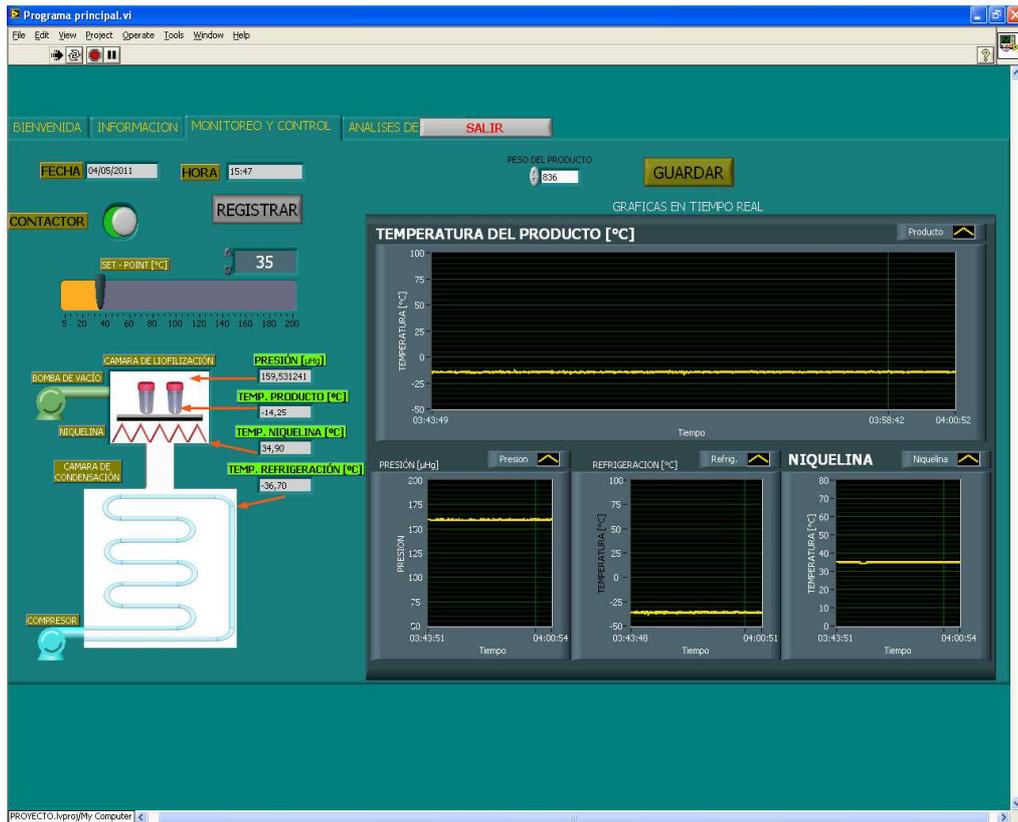


Figura 4.9 Registro de temperatura de la HMI.

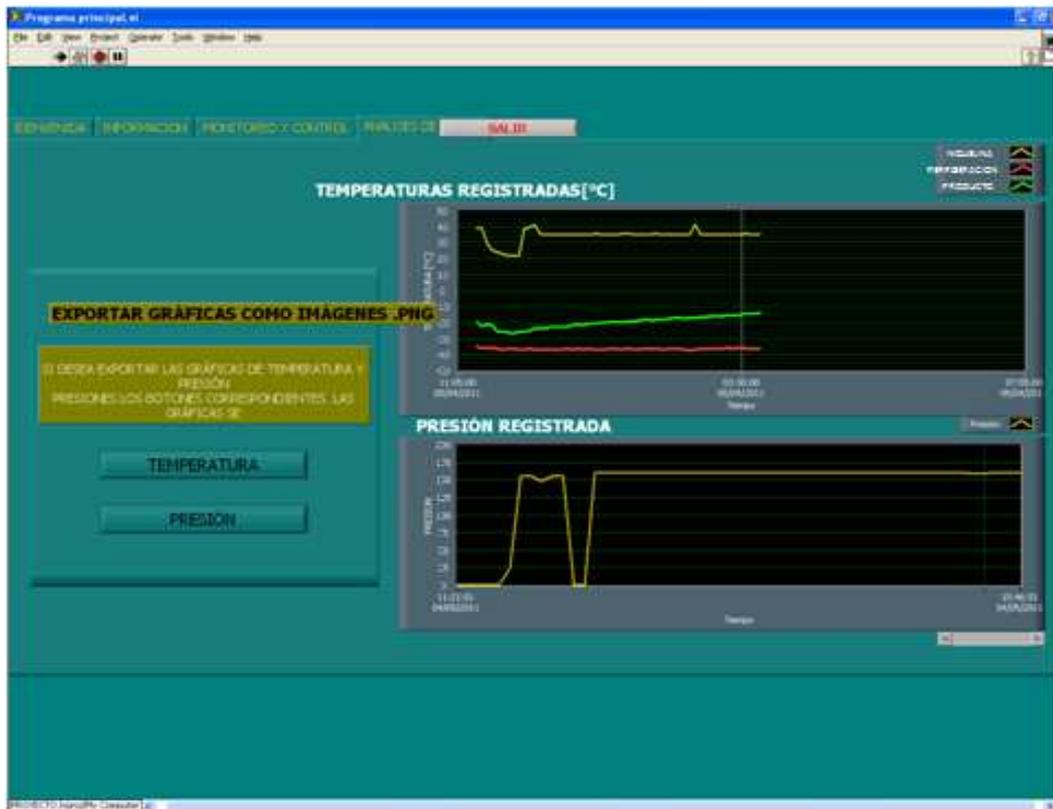


Figura 4.10 Análisis de datos de la HMI.

4.5.3 REGISTRO DE ANALISES DE RESULTADOS

En la Tabla 4.5 se muestran los datos guardados en hoja del programa Excel, durante un periodo de cuatro horas los datos registrados de la temperatura del producto, temperatura de refrigeración, temperatura del aceite circulante por las placas de calentamiento durante el proceso de liofilización. Todos estos datos se registran automáticamente carpeta en la que el operario seleccionó en el disco duro de la PC.

	RESPONSABLE:	O. ACUÑA	
	FECHA:	04/05/2011	
	HORA:	11:16	
	PRODUCTO:	FRUTILLA	
	PESO INICIAL:	1080	
	PESO FINAL ESPERADO:	210	
HORA:	TEMP. DEL PRODUCTO:	TEMP. DE REFRIGERACION:	TEMP. DEL ACEITE:
11:21:52	38,882906	-34,932327	-19,372746
11:26:52	39,39974	-35,966419	-21,896285
11:31:52	29,246847	-35,966419	-21,024179
11:36:52	25,14367	-36,030056	-21,395288
11:41:52	24,277823	-36,49142	-25,644482
11:46:52	22,732498	-36,570966	-25,792926
11:51:52	22,081064	-36,300511	-26,145479
11:56:52	21,664749	-36,49142	-26,609365
12:01:52	21,506852	-36,555057	-25,718704
12:06:52	38,287986	-36,698239	-25,700149
12:11:52	40,055057	-36,411875	-25,013598
12:16:52	40,866115	-36,745966	-23,751828
12:21:52	35,195612	-36,793693	-23,733273
12:26:52	34,900525	-36,650511	-23,473497
12:41:52	34,93245	-36,761875	-22,731279
12:46:52	34,875072	-36,300511	-22,36017
12:51:52	34,849618	-36,761875	-21,729286
12:56:52	34,8988	-36,49142	-21,191178
13:01:52	34,930724	-36,730057	-21,321066
13:06:52	34,949706	-36,507329	-20,801514
13:11:52	35,076111	-36,745966	-20,337628
13:16:52	35,095956	-37,016421	-19,947964
13:21:52	34,884994	-36,714148	-20,170629
13:26:52	34,906996	-36,539148	-19,502634

Tabla 4.5 Datos almacenados en Excel de temperatura de la máquina liofilizadora.

En la Figura 4.11 se muestran las gráficas de la Tabla 4.5, las cuales son las que se almacenaron en la carpeta que el operario seleccionó.

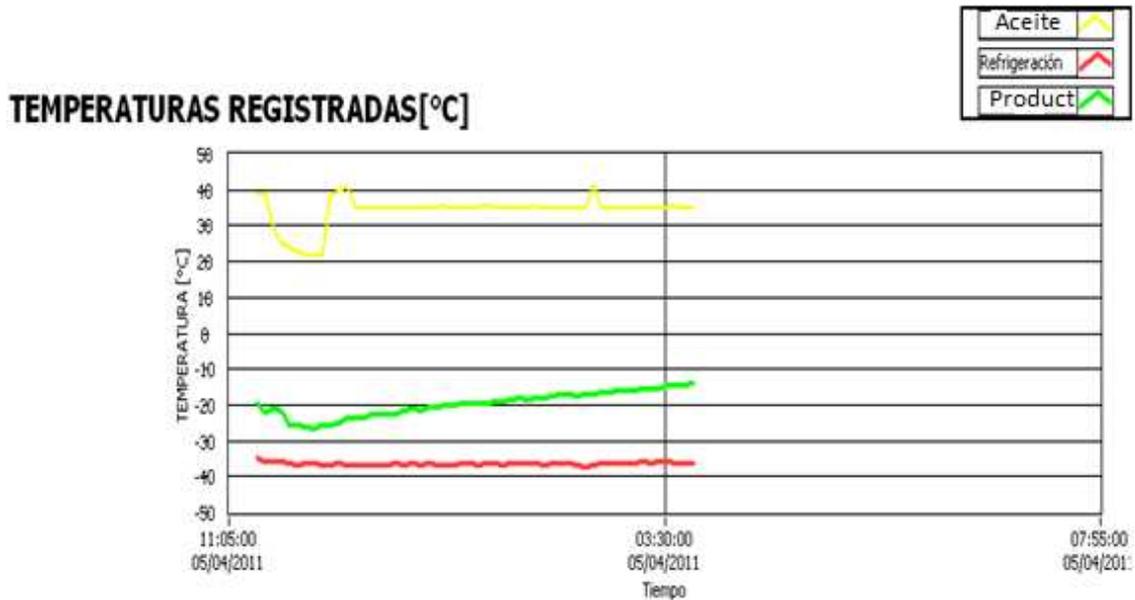


Figura 4.11 Pantalla HMI.

En la Tabla 4.6 se muestran los datos almacenados manualmente por el operario referente al peso del producto a deshidratar durante el proceso de liofilización. Estos datos se almacenan en la misma carpeta que haya seleccionado el operario.

RESPONSABLE:	O. ACUÑA
FECHA:	04/05/2011
HORA:	11:17
PRODUCTO:	FRUTILLA
PESO INICIAL:	1080
PESO FINAL ESPERADO:	210
HORA:	PESO PRODUCTO:
11:20:44	1080
11:33:01	998
11:47:09	985
11:55:53	980
12:04:47	975
12:19:22	967
12:22:26	965
13:19:47	925
13:43:18	907
14:14:27	886
14:58:12	855
15:26:25	836
15:50:13	819

Tabla 4.6 Datos almacenados en Excel del peso del producto a deshidratarse.

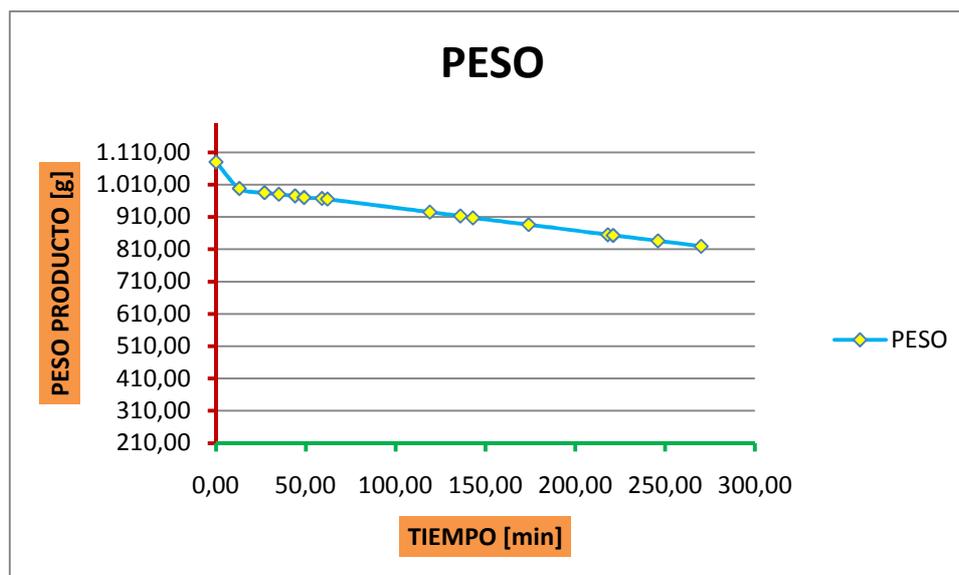


Figura 4.12 Curva característica del peso.

En la Figura 4.12 se muestra el proceso de liofilización de Frutilla, su peso decrece mientras avanza el proceso.

4.6 POSIBILIDADES DE REEMPLAZAR LA BALANZA MECÁNICA POR UNA ELECTRÓNICA

El Equipo cuenta con un dispositivo de pesaje, balanza Mettler, con una escala continua de iluminación para determinar la lectura, ubicado dentro de la cámara de vacío. La capacidad total de la escala es de 2000 gramos (4.4 libras). La precisión de la escala es de 0,2 gramos, con graduaciones de escala de 1 gramo y facilidad de lectura de 0,1 gramo.

Lecturas de cargas intermitentes o continuas son posibles para la determinación de la pérdida del peso.

Se investigó una balanza electrónica que cumpla con las características mencionadas anteriormente de la balanza mecánica, que funciona actualmente el liofilizador Stokes.

En el mercado existe una amplia gama de balanzas electrónicas, que se aproximan a las características requeridas, entre ellas tenemos balanza de precisión XA y balanza electrónica Microweigh.

4.6.1 BALANZAS DE PRECISIÓN XA

Son balanzas muy eficientes que ayudan a garantizar la conformidad en los entornos de trabajo regulados e incorporan características de seguridad, aplicaciones de pesaje y soluciones de gestión de datos. Proporcionan conectividad total a redes y dispositivos periféricos y se integran fácilmente en sistemas existentes. Debido a la factibilidad de conectividad con otros dispositivos, se puede realizar la interface de comunicación mediante RS232, o mediante bluetooth. Se lo puede implementar fácilmente con la ayuda del software Labview. Tiene un costo de 1200 dólares.⁹

En la Figura 4.13 se muestra la balanza de precisión XA.



Figura 4.13 Balanza de precisión XA

La innovadora célula de pesaje MonoBloc garantiza una alta precisión de medición. Se aseguran unos resultados rápidos y fiables independientemente del entorno de trabajo como se detalla en la Tabla 4.7.

⁹ http://es.mt.com/es/es/home/products/Laboratory_Weighing_Solutions/Precision_Balances/Excellence-Precision/XA_Precision/XA16001L_Prec.html

CARACTERÍSTICAS Y ESPECIFICACIONES ESTANDAR	
SmartScreen	Pantalla táctil monocroma
MonoBloc	Célula de pesaje de alto rendimiento, con protección contra sobrecarga
Aplicaciones	Pesaje porcentual, estadísticas y recuento de piezas
FACT	Ajuste interno y linealización
Conectividad	RS232C incorporada, ranura para segunda interfaz (Bluetooth / RS232C)
Capacidad máxima	16.1 kg
Legibilidad	0.1 g
Desviación de linealidad	0.2 g
Peso mínimo	8 g
Tiempo de estabilización	1.5 s

Tabla 4.7 Resultados del entorno de trabajo de la balanza de precisión XA.

4.6.2 BALANZA ELECTRONICA MICROWEIGH

De acuerdo a las características mencionadas anteriormente de la balanza electrónica Microweigh, es una de las que efectúa las características para la implementación de este proyecto, en caso de intercambiar este tipo de mecanismo. Debido a que permite una interface con un PC, o con otros dispositivos externos, y mediante el computador se puede registrar los datos con la ayuda del software Labview.

En la Figura 4.14 se muestra la balanza de precisión XA.



Figura 4.14 Balanza de precisión Microweigh.

BALANZA DIGITAL marca MICROWEIGH modelo B-5000.- capacidad máxima: 5.000 grs; resolución: 0,5 grs; con sensor electromagnético y compensación de baja temperatura; con interface RS232C; teclado de 4 teclas para on/off, calibración, unidades y tara; chequeo de errores, etc. Tiene un costo de 1490 dólares americanos más IVA.¹⁰

4.7 MANTENIMIENTO

Acción eficaz para mejorar aspectos operativos relevantes de una maquina tales como funcionalidad, seguridad, productividad, etc. Otorga la posibilidad de racionalizar costos de operación. El mantenimiento debe ser tanto periódico como permanente, preventivo y correctivo.

4.7.1 MANTENIMIENTO CORRECTIVO

Este mantenimiento se dará cuando exista una falla en el equipo, y consiste en corregir el error o los errores, ya sea físico o de cualquier tipo presentados en la planta.

4.7.2 MANTENIMIENTO PREVENTIVO

Es el mantenimiento que tiene por misión mantener un nivel de servicio determinado en los equipos, programando las intervenciones de sus puntos vulnerables en el momento más oportuno. Es aquel que se hace con anticipación y de manera programada con el fin de evitar desperfectos o daños en los dispositivos.

¹⁰ <http://www.insbal.com/productos.php?categoria=Balanzas>

4.7.3 PROGRAMA DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO DE LAS INSTALACIONES DEL LIOFILIZADOR “STOKES”.

En la Tabla 4.8, Tabla 4.9 y Tabla 4.10 se muestran programas de mantenimiento preventivo para el sistema eléctrico, refrigeración, bomba de vacío y la PC. El significado de la periodicidad es el siguiente: D (diario), L (quincenal), M (mensual), A (anual), Q (cada 5 años) y X (cada diez años).¹¹[starMedia]

SISTEMA ELÉCTRICO	
OPERACIÓN	PLAZOS
Lubricación y limpieza de los contactores	A
Comprobación interruptores y disyuntores verificando funcionamiento y maniobra	A
Comprobación del correcto funcionamiento de los automatismos de protección	A
Verificación del aislamiento eléctrico	A
Verificación de respuesta de sensores mediante elemento patrón	A
Limpieza de hardware y software de la computadora	A

Tabla 4.8 Programa de mantenimiento del sistema eléctrico.

SISTEMA DE REFRIGERACIÓN	
OPERACIÓN	PLAZO
Control de nivel de refrigerante mediante los manómetros	A
Limpieza de los depósitos de purga	A
Contraste y ajuste de los termómetros y manómetros	A
Limpieza de condensadores	A
Limpieza de evaporadores	A

Tabla 4.9 Programa de mantenimiento del sistema de refrigeración.

¹¹ <http://html.rincondelvago.com/mantenimiento-de-instalaciones.html>

BOMBA DE VACÍO	
OPERACIÓN	PLAZO
Verificación del equipo de purga de los incondensables	A
Engrase de cojinetes de motores y ventiladores.	A
Verificación del nivel de aceite	D
Extracción de aceite	M

Tabla 4.10 Programa de mantenimiento de la bomba de vacío.

Para finalizar este capítulo, de los resultados reportados se pudieron comprobar el funcionamiento y validez del equipo diseñado, y del software implementado.

En el capítulo quinto, se presentan con las conclusiones y recomendaciones del trabajo realizado.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos durante las pruebas se puede extraer las siguientes conclusiones:

- Como conclusión principal del presente proyecto de titulación se puede afirmar que, el automatizar una maquina, permite ahorrar energía, tiempo, evitar fallas humanas, optimizar el proceso, obtener el mayor rendimiento de la maquina ya que esta puede trabajar las 24 horas sin la presencia de un operador.
- El sistema de monitoreo, control y registro desarrollado cumple satisfactoriamente los objetivos planteados. El usuario podrá contar con la facilidad de cambiar el Set-Point de trabajo de temperatura en función de las necesidades que requiera la muestra del producto que se va a deshidratar, permite visualizar en tiempo real las magnitudes de las temperaturas y presión en los diferentes puntos de la planta, así como también el registro de las mismas, y guardarlos en un archivo para ser analizados posteriormente.
- La potencia entregada a la niquelina mediante un controlador de temperatura por ciclo integral, es directamente proporcional al número de ciclos completos, presenta armónicos con amplitudes relativamente pequeñas que al introducirse en la red no causan problemas posteriores (como receteo del PC, microcontrolador; DAQ NI 6009, etc).

- El uso de Mosfet (IRFP 450) permite tener una respuesta rápida en el switcheo, así como también conectarlos en paralelo para controlar mayores potencias y evitar el calentamiento excesivo de los semiconductores que provocaría un bajo rendimiento y deterioro paulatino de los mismos.
- La implementación del control de la niquelina por ciclo integral, aumenta la vida útil de los dispositivos electromecánicos (contactores), ya que no se encuentran en un régimen de conmutación continua, y además que la corriente RMS es menor a la nominal durante todo el proceso de secado.
- Utilizando fuentes independientes aisladas y blindadas para el acondicionamiento de cada sensor, se consigue reducir significativamente las interferencias tanto de origen eléctrico como magnético.
- El software implementado en este proyecto, potencializa el funcionamiento normal del liofilizador, permitiendo una interface grafica, amigable con el operador.
- El uso de la tarjeta de adquisición de datos USB6009, facilita la comunicación del HMI.

5.2 RECOMENDACIONES

De la experiencia adquirida durante la elaboración de este proyecto se pueden dar las recomendaciones siguientes:

- Se recomienda colocar un UPS o por lo menos un regulador de voltaje a la computadora que esta monitoreando y registrando los datos de la planta,

para evitar daños oportunos de los mismos y echar a perder la muestra que está en proceso de deshidratación.

- Para que el control de la niquelina se mantenga en el rango seteado al Set-Point, se debe instalar el sistema de refrigeración de agua, a la bomba circulante del aceite, en caso de no hacerlo la temperatura del sistema se incrementara, debido a que la bomba circulante genera energía de calor transmitiendo al aceite, aunque la niquelina esté desenergizada.
- Se recomienda al PC que está destinado a trabajar en este proceso no se debe instalar otros tipos de programas o software.
- En caso de lograr adquirir una balanza electrónica, se recomienda implementarla en el proyecto, debido al Hardware y Software permiten su implementación, con esto se permitiría registrar automáticamente el peso de la muestra.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] <http://es.scribd.com/doc/16404179/LiofilizaciF3n>
- [2] Mafart, Pierre, 1994, Ingeniería Industrial de Alimentos, Acribia S.A., España.
- [3] http://www.thyracont.com/en/products/index/vacuum_gauges_itemid_81.html
- [4] <http://www.wikiciencia.org/electronica/electricidad/ttemperatura/index.php>
- [5] Cook Norman, 2001, Curso práctico de refrigeración y Aire Acondicionado, IRAGRA S.A. Madrid.
- [6] http://www.thyracont.com/media/man_vsp62_lq.pdf
- [7] http://www.solahevidutysales.com/silver_line_series_single_multi_output_linears.htm
- [8] www.ni.com
- [9] http://es.mt.com/es/es/home/products/Laboratory_Weighing_Solutions/Precision_Balances/Excellence-Precision/XA_Precision/XA16001L_Prec.html
- [10] <http://www.insbal.com/productos.php?categoria=Balanzas>
- [11] <http://html.rincondelvago.com/mantenimiento-de-instalaciones.html>
- [12] Floyd, Thomas, 2008, Basic Operational Amplifiers and Linear Circuits, Pearson, México.
- [13] Boylestad, Robert; Nashelsky, Louis, 2006, Electrónica de Teoría de Circuitos, Quinta Edición, Prentice Hall, México.
- [14] NATIONAL INSTRUMENTS, 2006, Labview Básico I Introducción, USA.
- [15] www.icmaster.com

ANEXOS

ANEXO 1

AD620