



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

DEPARTAMENTO ACADÉMICO DE INGENIERÍA EN CONTROL Y AUTOMATIZACIÓN

Propuesta de Automatización de un Túnel Criogénico

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO EN CONTROL Y AUTOMATIZACIÓN

P R E S E N T A N:

LUIS ANTONIO CARRANZA ESPINOZA
OSCAR ARMANDO FLORES SERRANO
ADRIÁN ANTONIO MONTES DE OCA ORTEGA

ASESOR TÉCNICO

M. en C. IVONE CECILIA TORRES RODRÍGUEZ

ASESOR ESTRUCTURAL

M. en C. PEDRO FRANCISCO HUERTA GONZÁLEZ





México, D. F.

Mayo de 2014

RESUMEN

La presente tesis presenta una propuesta de automatización para un Túnel Criogénico de la empresa ITUMI Instalaciones SA de CV, que mediante un controlador lógico programable y una HMI se facilita la operación y mantenimiento de dicho equipo además de disminuir fugas de refrigerante a su salida haciendo más segura el área de trabajo de los operarios.

Se describen los métodos de congelación que existen en la actualidad para posteriormente explicar a detalle la construcción, operación y problemáticas del túnel criogénico de ITUMI.

Se presentan tres propuestas de automatización como solución a las problemáticas y la justificación de la elección de una de ellas. Se desarrollaron pruebas experimentales sobre el comportamiento actual del equipo con el objetivo de conocer el comportamiento en arranque y operación de la temperatura en diferentes zonas del túnel.

En base a la propuesta seleccionada se establecen requerimientos que debe cumplir el proyecto de automatización. Una vez establecidos estos requerimientos se desarrolla la Ingeniería y se crea una nueva filosofía de operación del equipo.

La validación de esta propuesta se realiza con la programación de un controlador lógico programable y una interfaz hombre máquina disponibles en los las instalaciones de ESIME Zacatenco en los Laboratorios de Ingeniería en Control y Automatización.

DEDICATORIA



Luis Antonio Carranza Espinoza

A mi familia que siempre me ha apoyado y enseñado el valor de trabajo

Oscar Armando Flores Serrano

Dedico esta tesis en agradecimiento a mis padres que me han apoyado incondicionalmente a través de todos mis años de estudios.

Gracias Mamá por todos tus consejos y palabras de motivación, que hicieron que nunca me rindiera aún en los momentos más difíciles.

Gracias Papá por enseñarme que en la vida como en el Frontenis no importa cuántas veces seas derrotado, lo importante es no dejar de intentar

Adrián Montes de Oca Ortega

Agradezco a Dios por la oportunidad de haberme realizado en esta etapa de mi vida.

Con mucho cariño a mis padres que a través del tiempo me han enseñado a seguir adelante a pesar de todos los conflictos que puedan existir.

A mis amigos que han puesto su confianza en mí.

ÍNDICE DE CONTENIDO

OBJETIVO	1
INTRODUCCIÓN.....	1
JUSTIFICACIÓN.....	2
ESTADO DEL ARTE.....	3
EQUIPOS DE CONGELACIÓN	3
CONGELADORES DE PLACAS.....	3
CONGELADORES POR CONVECCIÓN DE AIRE	4
TÚNELES DE CONGELACIÓN CONVENCIONALES.....	4
CONGELADORES CONTINUOS CON BANDA TRANSPORTADORA DEL PRODUCTO.....	5
CONGELADORES DE LECHO FLUIDO.....	6
CONGELADORES POR INMERSIÓN.....	6
CONGELADORES POR EVAPORACIÓN DE FLUIDOS CRIOGÉNICOS	6



CRIOGENIA	7
DESCRIPCIÓN GENERAL DE UN TUNEL CRIOGÉNICO	8
CAPÍTULO 1 Descripción y Problemáticas del Túnel Actual	9
1.1 DESCRIPCIÓN DEL TUNEL REALIZADO EN ITUMI.....	10
1.1.1 PRINCIPIO DE OPERACIÓN.....	10
1.1.2 CONSTRUCCIÓN Y FUNCIONAMIENTO DE COMPONENTES	11
1.2 PROBLEMÁTICAS DE LA AUTOMATIZACIÓN ACTUAL.....	30
CAPÍTULO 2 Propuestas, Pruebas Experimentales y Elección de Algoritmos de Control.....	31
2.1 PROPUESTAS DE AUTOMATIZACIÓN	32
2.1.1 PROPUESTA 1.....	32
2.1.2 PROPUESTA 2.....	34
2.1.3 PROPUESTA 3.....	36
2.1 ELECCIÓN DE LA PROPUESTA	38
2.2 PRUEBAS EXPERIMENTALES DE COMPORTAMIENTO ACTUAL	39
2.2.1 PRUEBAS AL ARRANQUE	39
2.2.2 PRUEBAS EN OPERACIÓN	41
2.3 ALGORITMOS DE CONTROL.....	45
2.3.1 SEGUNDO LAZO DE CONTROL – CONTROLADOR 2	45
2.3.2 TERCER LAZO DE CONTROL – CONTROLADOR 3.....	50
CAPÍTULO 3 Desarrollo de la Ingeniería.....	51
3.1 ELEMENTOS DE AUTOMATIZACIÓN.....	52
3.1.1 ELEMENTOS PRIMARIOS.....	52
3.1.2 ELEMENTOS DE TRANSMISIÓN.....	64
3.1.3 ELEMENTOS FINALES	65
3.1.4 ELEMENTO CONTROLADOR.....	66
3.1.5 RESUMEN DE LOS ELEMENTOS DE LA AUTOMATIZACIÓN.....	68
3.2 DIAGRAMA DE TUBERÍA E INSTRUMENTACIÓN.....	74
3.2.1 INYECCIÓN.....	74
3.2.2 DISTRIBUCIÓN	74
3.2.3 EXTRACCIÓN.....	75
3.3 CIRCUITO DE FUERZA.....	75
3.3.1 DIAGRAMA ELÉCTRICO.....	75



3.3.2	CÁLCULO DE CORRIENTE ELÉCTRICA	77
3.3.3	SELECCIÓN DE CONTACTORES, PROTECCIONES Y CALIBRE DE CONDUCTORES PARA LOS MOTORES ARRANCADOS A TENSIÓN PLENA	80
3.3.4	SELECCIÓN DE PROTECCIONES Y CALIBRE DE CONDUCTORES PARA LOS MOTORES OPERADOS CON DRIVE.....	82
3.3.5	SELECCIÓN DE PROTECCIONES Y CALIBRE DE CONDUCTORES PARA LA FUENTE DE ALIMENTACIÓN.....	84
3.3.6	SELECCIÓN DE INTERRUPTOR MANUAL GENERAL, PROTECCION GENERAL Y CALIBRE DE CONDUCTORES.....	85
3.4	CIRCUITO DE CONTROL	86
3.4.1	SALIDAS DIGITALES	86
3.4.2	ENTRADAS DIGITALES	88
3.4.3	SALIDAS ANALÓGICAS.....	90
3.4.4	ENTRADAS ANALÓGICAS	91
3.4.5	ALIMENTACIÓN DEL PLC	92
3.4.6	ELECCIÓN DE LA FUENTE PODER	92
3.4	TABLERO DE CONTROL.....	94
CAPÍTULO 4 Filosofía de Operación		97
4.1	OPERACIÓN REQUERIDA DEL EQUIPO.....	97
4.1.1	ENCENDIDO GENERAL.....	97
4.1.2	OPERACIÓN.....	97
4.1.3	MODO DE ARRANQUE	98
4.1.4	MODO DE EXCESO DE FRIO.....	99
4.1.5	MODO DE CONGELACIÓN	99
4.1.6	TÉRMINO	99
4.1.7	ESTADO DE EMERGENCIA.....	99
4.1.8	MANTENIMIENTO	100
4.2	DIAGRAMA DE FLUJO	101
4.2.1	ALGORITMO PRINCIPAL.....	101
4.2.2	ALGORITMO DE ESTADO DE EMERGENCIA PRESENTE.....	102
4.2.3	ALGORITMO DE OPERACIÓN	103
4.2.4	ALGORITMO DE CONTROL DE TEMPERATURA DE ARRANQUE AUTOMÁTICO	104



4.2.5	ALGORITMO DE CONGELACIÓN.....	105
4.2.6	ALGORITMO DE CONGELACIÓN MANUAL.....	106
4.2.7	ALGORITMO DE CONGELACIÓN AUTOMÁTICA	107
4.2.8	ALGORITMO DE CONTROL DE TEMPERATURA AUTOMÁTICO	108
4.2.9	ALGORITMO DE TÉRMINO.....	109
4.2.10	ALGORITMO DE MANTENIMIENTO.....	109
CAPÍTULO 5 Programa y HMI.....		124
5.1	ENTRADAS Y SALIDAS FÍSICAS.....	111
5.2	DESARROLLO DEL PROGRAMA	112
5.2.1	RUTINA PRINCIPAL.....	112
5.2.2	OPERACIONES.....	115
5.2.3	OPERACIÓN ARRANQUE AUTOMÁTICO	116
5.2.4	OPERACIÓN EXCESO DE FRIO.....	118
5.2.5	OPERACIÓN DE CONGELACIÓN.....	119
5.2.6	CONGELACIÓN MANUAL.....	120
5.2.7	CONGELACIÓN AUTOMÁTICA	122
5.2.8	MANTENIMIENTO	125
5.2.9	LIMPIEZA.....	126
5.2.10	PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO.....	127
5.2.11	ESTADO DE EMERGENCIA EN MANTENIMIENTO.....	129
5.2.12	ESTADO DE EMERGENCIA EN OPERACIÓN	130
CAPÍTULO 6 Costo del Proyecto.....		183
6.1	CATÁLOGO DE CONCEPTO	184
6.2	CATÁLOGO DE COSTOS DE INGENIERÍA	186
CONCLUSIÓN		187
BIBLIOGRAFÍA.....		188



ÍNDICE DE FIGURAS

ESTADO DEL ARTE	4
Figura 1. Congelador de placas horizontal.....	4
Figura 2. Túnel de consagración convencional por convención de aire en continuo	5
Figura 3: Congelador continuo con banda transportadora de producto.....	6
Figura 4. Esquema de principio de túnel de congelación de lecho de fluido.....	7
Figura 5. Esquema de principio de un túnel de congelación de nitrógeno líquido. ..	8
Figura 6. Esquema de Túnel MESSER.....	10
CAPITULO 1	11
Figura 1.1 Zonas del Túnel	13
Figura 1.2 Soportes Generales	14
Figura 1.3 Planchas montadas con soportes internos	15
Figura 1.4 Esquinas Prismáticas.....	16
Figura 1.5 Campana	16
Figura 1.6 Canaleta.....	17
Figura 1.7 Canaleta y Campana Instaladas	17
Figura 1.8 Banda de Acero Inoxidable 304	18
Figura 1.9 Cama de la banda transportadora.	19
Figura 1.10 Motor trifásico de inducción asíncrono con rotor tipo jaula de ardilla de 1HP	19
Figura 1.11 Caja Reductora	20
Figura 1.12 Cadena montada sobre catarina.....	20
Figura 1.13 Cadena montada en Catarina de la Caja	21
Figura. 1.14 Chumacera con cadena montada.....	21
Figura 1.15 Montaje de Cadena.....	22
Figura 1.16 Eje giratorio montado entre 2 chumaceras.	23



Figura 1.17 Catarina montada en eje.....	24
Figura 1.18 Catarina y Banda acoplados	24
Figura 1.19 Rodamientos de Nylamid.	25
Figura 1.20 Rodamiento Nylamid montado en eje giratorio de la Banda Transportadora.....	25
Figura 1.21 Tanque de Nitrógeno Líquido.....	26
Figura 1.22 Instrumentación de la alimentación del Nitrógeno líquido.....	27
Figura 1.23 Esquema de Alimentación de Nitrógeno líquido.	28
Figura 1.24 Tubería de Distribución del Nitrógeno Líquido.	29
Figura 1.25 Partes de un soplador Radial.....	30
Figura 1.26 Vista isométrica de Ventilador.....	31
Figura 1.27 Motor de 1HP acoplado a un Ventilador	32
Figura 1.28 Extractor 5HP.....	33
Figura 1.29 Sentido de giro de Motores y Movimiento de Refrigerante	33
Figura 1.30 UDC3200	34
Figura 1.31 STD 5000.....	34
Figura 1.32 Válvula de control proporcional.....	35
Figura 1.33 Lazo de Control de Temperatura	35
Figura 1.34 Tablero de Control	36
CAPITULO 2	38
Figura 2.1 Distribución de nuevos sensores de temperatura Propuesta 1.....	40
Figura 2.2 Diagrama Propuesta 1	40
Figura 2.3 Distribución de nuevos sensores de temperatura Propuesta 2.....	42
Figura 2.4 Diagrama Propuesta 2	42
Figura 2.5 Distribución de nuevos sensores de temperatura Propuesta 3.....	44
Figura 2.6 Diagrama Propuesta 3	45
Figura 2.7 Ubicación de sensores de Temperatura	46
Figura 2.8. Comportamiento de Temperatura	48
Figura 2.9 Comportamiento de Temperaturas al cambio de velocidad en sopladores 50	
Figura 2.10 Comportamiento de Temperaturas al cambio de velocidad en sopladores	52
Figura 2.11 Curva en forma de S y Parámetros de Identificación	53
Figura 2.12 Diagrama de Simulink de Excitación de la Planta a Lazo Abierto.....	54
Figura 2.13 Simulación del Comportamiento de la Planta a Lazo Abierto	55



Figura 2.14 Diagrama de Simulink de Control FeedBack de la Planta.....	56
Figura 2.15 Respuesta del Sistema Controlado Sintonizado con las Constantes encontradas con segundo método de Ziegler-Nichols	56
Figura 2.16 Respuesta del Sistema Controlado Sintonizado con las Constantes encontradas con el Auto tune de MatLab.....	57
CAPITULO 3	58
Figura 3.1 Termómetro de Vidrio	60
Figura 3.2 Termómetro Bimetálico	61
Figura 3.3 Termómetros actuados por líquido	62
Figura 3.4 Termómetros actuados por vapor	63
Figura 3.5 Curvas de Resistencia Relativa de varios metales/temperatura	64
Figura 3.6 Elementos de sondas de resistencia de platino (bobina y sustrato de película metálica)	65
Figura 3.7 Tipos de Sondas y Conexiones	66
Figura 3.8 Partes de una Termoresistencia	66
Figura 3.9 Circuito de Puente de Wheatstone para Sonda de Resistencia de Dos hilos	67
Figura 3.10 Circuito de Puente de Wheatstone para Sonda de Resistencia de Tres hilos	67
Figura 3.11 Circuito de Puente de Wheatstone para Sonda de Resistencia de Cuatro hilos.....	68
Figura 3.12 Termopar con Referencia a Temperatura del Hielo	69
Figura 3.13 Curvas Características fem/temperatura de los termopares	69
Figura 3.14 Tubos de protección y vainas para termopares	71
Figura 3.15 Campo de medida de Instrumentos de Temperatura.....	72
Figura 3.16 Diagrama de Tubería Instrumentación	LAMINA 1
Figura 3.17 Circuito de Fuerza.....	LAMINA 2
Figura 3.18 Primer bloque de salidas a relevador.....	96
Figura 3.19 Segundo bloque de salidas a relevador	97
Figura 3.20 Entradas Digitales.....	98
Figura 3.21 Salidas Analógicas.....	100
Figura 3.22 Circuito Eléctrico de Entradas Analógicas	102
Figura 3.23 Alimentación PLC	103
Figura 3.24 Circuito de Control	LAMINA 3
Figura 3.25 Tablero de Control	LAMINA 4



CAPITULO 4	108
Figura 4.1 Algoritmo Principal	113
Figura 4.2 Algoritmo de Estado de Emergencia Presente	114
Figura 4.3 Algoritmo de Operación	115
Figura 4.4 Algoritmo de Control de Temperatura de Arranque Automático	116
Figura 4.5 Algoritmo de Congelación	117
Figura 4.6 Algoritmo de Congelación Manual	118
Figura 4.7 Algoritmo de Congelación Automática	119
Figura 4.8 Algoritmo de Control de Temperatura Automático	120
Figura 4.9 Algoritmo de Término	121
Figura 4.10 Algoritmo de Mantenimiento	122
CAPITULO 5	124
Figura 5.1 Rutina Principal	128
Figura 5.2 Pantalla de Bienvenida	129
Figura 5.3 Pantalla de Menú Principal	129
Figura 5.4 Subrutina de Operación	131
Figura 5.5 Pantalla de Operaciones	131
Figura 5.6 Subrutina de Operación de Arranque Automático	133
Figura 5.7 Pantalla de Operación Arranque Automático	133
Figura 5.8 Subrutina de Operación Exceso de Frío	134
Figura 5.9 Pantalla de Operación por Exceso de Frío	135
Figura 5.10 Subrutina de Operación de Congelación	136
Figura 5.11 Pantalla de Menú de Congelación	137
Figura 5.12 Subrutina de Congelación Manual	139
Figura 5.13 Pantalla de Congelación Manual	140
Figura 5.14 Subrutina de Congelación Automática	143
Figura 5.15 Pantalla de Congelación Automática	144
Figura 5.16 Subrutina de Mantenimiento	145
Figura 5.17 Pantalla de Menú de Mantenimiento	146
Figura 5.18 Subrutina de Limpieza	147
Figura 5.19 Pantalla de Túnel en Limpieza	147
Figura 5.20 Subrutina de Pruebas de Funcionamiento	149
Figura 5.21 Pantalla de Pruebas de Funcionamiento	150
Figura 5.22 Subrutina de Estado de Emergencia en Mantenimiento	151



Figura 5.23 Pantalla de Estado de Emergencia de Mantenimiento	152
Figura 5.24 Subrutina de Estado de Emergencia	154
Figura 5.25 Pantalla de Estado de Emergencia	155

ÍNDICE DE TABLAS

CAPITULO 2.....	38
Tabla 1. Comportamiento de la Temperatura en Zonas de Inyección, Distribución y Descarga.	47
Tabla 2. Comportamiento de Temperaturas al cambio de Velocidad de Sopladores 49	
Tabla 3. Cambio de Temperatura en la Zona de Descarga al cambio de velocidad en Extractor.....	51
CAPITULO 3.....	58
Tabla 4. Características de Sondas de Resistencia.....	65
Tabla 5. Tabla Descriptiva de los Elementos de la Automatización	77
Tabla 6. Cálculo de la corriente nominal de un Motor 1HP.....	86
Tabla 7. Cálculo de la corriente nominal de la carga	87
Tabla 8. Cálculo de la corriente nominal de la carga	88
Tabla 9. Corriente Nominal de la Fuente de Alimentación.....	89
Tabla 10. Valores de Corriente de Breaker en base al modelo del Drive.....	92
Tabla 11. Calibres de conductor en base al modelo de Drive Baldor	93
CAPITULO 5.....	124
Tabla 12. Entradas y Salidas Físicas.....	126
Tabla 13. Parámetros de los Objetos de la HMI	157
CAPITULO 6.....	183
Tabla 14. Cotización de los Elementos	184
Tabla 15. Cotización por Horas de Trabajo	186



OBJETIVO

Desarrollar una propuesta de automatización y una Interfaz Hombre Máquina de un túnel criogénico para aprovechar el uso de N₂ como refrigerante; dicha automatización será realizada mediante el uso de un controlador lógico programable.

INTRODUCCIÓN



ITUMI Instalaciones SA de CV es una empresa dedicada a la instalación y puesta en marcha de equipos de refrigeración como lo son los túneles criogénicos. Hoy en día ITUMI desea mejorar el funcionamiento de sus túneles ya que existen varias tareas que aún se realizan de forma manual lo que genera un consumo de refrigerante elevado.

Es por ello que ITUMI Instalaciones SA de CV se ha planteado el objetivo de automatizar un túnel criogénico logrando un mejor uso de refrigerante; este trabajo es de importancia para la empresa pues con ello lograría satisfacer las demandas de los clientes actuales y la generación de nuevos.

Durante el presente trabajo se exponen los métodos utilizados en la actualidad para la congelación de alimentos y su funcionamiento. Se explicará el método de la criogenia y los túneles criogénicos. Se explicará cómo ITUMI realiza sus propios túneles criogénicos y las razones por las cuales existe un desperdicio de refrigerante dando pie a la creación de una automatización que solucione este problema.

JUSTIFICACIÓN

ITUMI Instalaciones SA de CV se encuentra en una etapa de crecimiento como empresa; es por ello que requiere de nuevas ideas y proyectos que le brinden prestigio.

ITUMI tiene como pilares a sus proyectos de equipos de congelación por lo que es necesaria la creación de una nueva automatización de sus túneles criogénicos. Este nuevo proyecto generará los siguientes beneficios a la empresa:

- Se disminuirá el consumo de refrigerante lo que el cliente verá como una reducción de costos en su producción.
- El funcionamiento del túnel será automático lo que provocará aceptación de los operarios y del cliente por su fácil operación.



- Las condiciones de los operarios serán seguras ya que se disminuirán las fugas de refrigerante que es causante de daños al sistema respiratorio.

ESTADO DEL ARTE

A continuación se describen los equipos que existen en la actualidad que permiten la congelación de alimentos [1].

EQUIPOS DE CONGELACIÓN

Los equipos de congelación se pueden dividir en los siguientes grupos principales en función del medio utilizado para la transmisión de calor.

- Metal: congeladores de placas.
- Aire (medio gaseoso): congeladores de aire forzado.
- Líquido: congeladores por inmersión.
- Líquidos vaporizados: congeladores por convección forzada de vapores de líquidos criogénicos.

CONGELADORES DE PLACAS

El producto es comprimido ligeramente entre placas planas metálicas (Figura 1), dentro de las cuales está circulando y vaporizándose un fluido frigorígeno. El estrecho contacto entre el producto envasado y las placas metálicas proporciona un buen coeficiente de transmisión de calor, lo que se traduce en tiempos de congelación relativamente cortos.

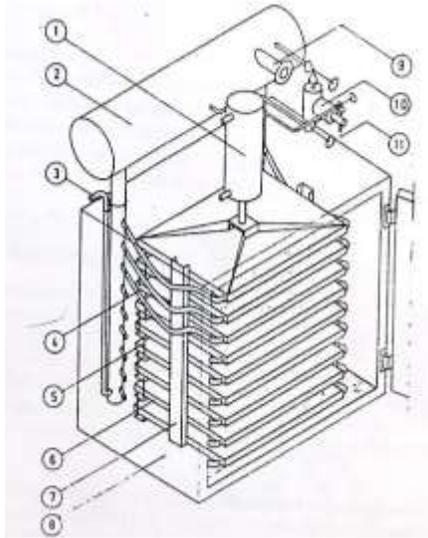


Figura 1. Congelador de placas horizontal. 1: Cilindro hidráulico. 2: Separador de líquido. 3: Desescarche por gas caliente. 4: Tubos de distribución. 5: Bulones de ensamblaje. 6: Placas. 7: Guías. 8: Armario aislado. 9: Aspiración. 10: Válvula de flotador. 11: Entrada de líquido.

CONGELADORES POR CONVECCIÓN DE AIRE

La congelación por convección forzada de aire se realiza en túneles de congelación convencionales, congeladores continuos con banda o cinta transportadora y congeladores de lecho fluido.

TÚNELES DE CONGELACIÓN CONVENCIONALES

Estas instalaciones normalmente fijas, son diseñadas con gran potencia frigorífica y son capaces de enfriar el aire a bajas temperaturas entre -30 y -40 ° C. Este aire enfriado circula a velocidades entre 2 y 7 m/seg a través del producto depositado a granel en bandejas colocadas, bien en estanterías fijas (túneles discontinuos) o bien colocando estas bandejas en carritos que circulan lentamente por el interior del túnel (Figura 2) accionadas por un sistema de arrastre (túneles continuos).

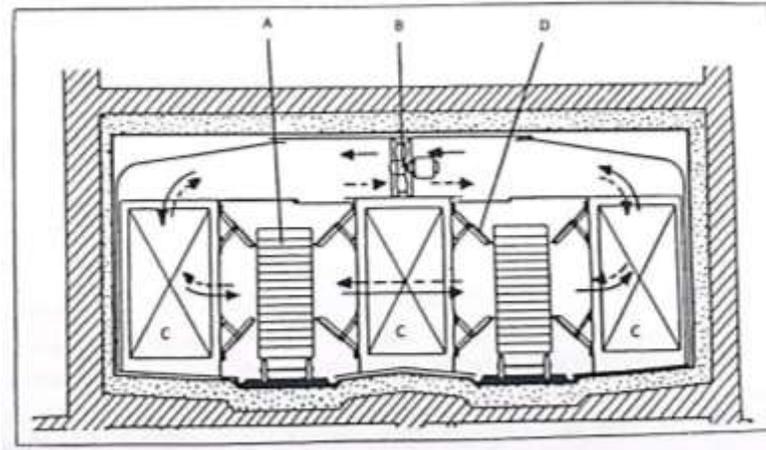




Figura 2. Túnel de consagración convencional por convención de aire en continuo (Sistema Trolleys). A: Carros con las bandejas de productos. B: Ventiladores. C: Evaporadores. D: Sistema de regulación del flujo de aire.

CONGELADORES CONTINUOS CON BANDA TRANSPORTADORA DEL PRODUCTO.

En estos equipos de congelación (Figura 3) el producto se deposita uniformemente sobre una banda transportadora que circula a una velocidad previamente fijada según el tiempo necesario para la congelación. El flujo de aire previamente enfriado atraviesa la capa del producto congelando individualmente a medida que este va avanzando dentro del túnel, el aire enfriado en los evaporadores pasa verticalmente a través de la capa de producto congelándose individual y rápidamente con menores pérdidas de peso.

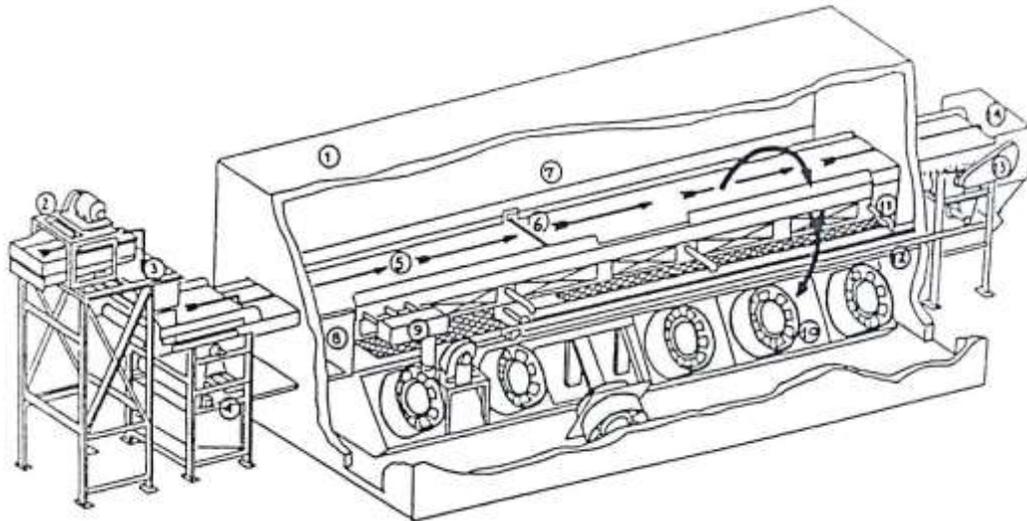


Figura 3: Congelador continuo con banda transportadora de producto. 1: Pared aislada del túnel. 2: Vibrador. 3: Tolva de carga. 4: Banda de secado. 5: Banda de congelación a velocidad regulable. 6: Distribución del producto. 7: Zona de aire forzada. 8: Evaporador. 9: Aire a gran velocidad. 10: Ventiladores de flujo regulable. 11: Agua de escarache. 12: Tuberías de alimentación del evaporador. 13: Regulador de la velocidad de la banda. 14: Tolva de descarga.

CONGELADORES DE LECHO FLUIDO

Están basados en el principio de fluidificación. Las partículas del producto con una forma y dimensiones homogéneas son sometidas a una corriente de aire vertical, ascendente y a una velocidad suficiente según el tipo de producto, de forma que este se eleve en el aire formando una capa o lecho de producto que se desplaza sin ninguna ayuda mecánica, comportándose como un fluido (Figura 4).

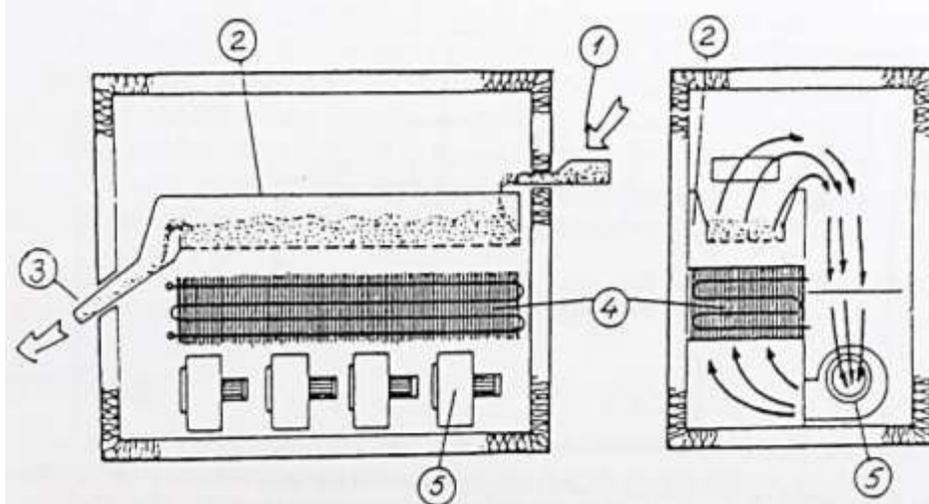


Figura 4. Esquema de principio de túnel de congelación de lecho de fluido. 1: Entrada del producto. 2: Zona de desplazamiento y congelación del producto. 3: Salida del producto congelado. 4: Evaporadores. 5: Ventiladores.

CONGELADORES POR INMERSIÓN

La congelación por inmersión en estos equipos se realiza por la inmersión o rociado del producto con el fluido congelante que permanece líquido durante el proceso. Los fluidos utilizados suelen ser salmueras o soluciones de propileno glicol enfriados, debiendo protegerse el producto con un envase totalmente impermeable para evitar efectos indeseables en las propiedades del producto, como su olor, sabor, entre otros.

CONGELADORES POR EVAPORACIÓN DE FLUIDOS CRIOGENICOS

Los más ampliamente utilizados son el nitrógeno líquido y antes de su prohibición por motivos ecológicos los hidrocarburos halógenos.

-Congeladores de nitrógeno líquido.

El nitrógeno líquido se pulveriza a la presión atmosférica (-196°C) sobre el producto a congelar que circula sobre una banda transportadora metálica. El nitrógeno se evapora y es evacuado a la atmosfera después de haber servido mediante convección forzada para enfriar y congelar el producto. (Figura 5). La elevada velocidad de congelación permite obtener productos vegetales congelados con una textura inmejorable mientras que con otros tipos de productos parece ser muy pequeña la diferencia en calidad obtenida en comparación con otros métodos de congelación.

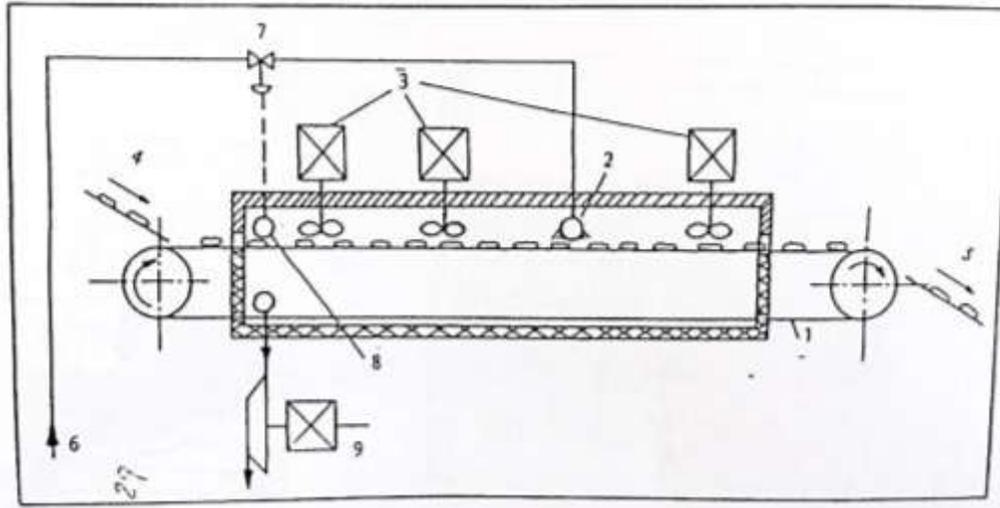


Figura 5. Esquema de principio de un túnel de congelación de nitrógeno líquido. 1: Cinta transportadora de producto. 2: Boquillas de pulverización. 3: Ventiladores. 4: Entrada de producto. 5: Salida de producto. 6: Alimentación de nitrógeno. 7: Válvula de regulación termostática. 8: Elemento termostático. 9: Evacuador de nitrógeno

Como se mencionó anteriormente el proyecto que se propone es la automatización de un túnel criogénico; este método de congelación será descrito con detalle a continuación.

CRIOGENIA

Una de las ramas de la ingeniería moderna, que más ha llamado la atención en los últimos años es la criogenia con la que se pueden lograr temperaturas

extremadamente bajas. Para ello se hace uso de un criógeno como el nitrógeno líquido, el cual es un poderoso refrigerante. La eficacia del nitrógeno líquido es tal que el tiempo de congelación es corto con lo que se producen cristales de hielo muy pequeños lo que evita daños en los alimentos congelados. La criogenia en alimentos hace que estos no presenten pérdidas al eliminar el goteo que se presenta con otros métodos de conservación [2].

Los alimentos deben congelarse tan cuidadosamente como sea posible para que al descongelarse permanezcan frescos y apetitosos cuando se sirvan. Un requisito previo para ello es la "congelación rápida". El agua contenida en las células debe congelarse rápidamente para asegurar la formación de cristales de hielo muy pequeños que no dañen la estructura de las células que conforman a los productos.

DESCRIPCIÓN GENERAL DE UN TUNEL CRIOGÉNICO

Un túnel de congelación consiste básicamente en una cinta transportadora dentro de un armazón aislado térmicamente. Los alimentos son transportados y enfriados sobre dicha cinta rociados con nitrógeno líquido por unos inyectores situados en un extremo o en el centro del túnel. Su construcción es modular y existen en diferentes medidas permitiendo un rango muy amplio de producciones, desde 100 a 3000 kg/h dependiendo de su tamaño. Estos túneles trabajan con todo tipo de alimentos como los son pescados, carnes, frutas, productos de pastelería, pizzas, etcétera.

El N₂ líquido a una temperatura de -196 °C vaporiza en contacto con los alimentos absorbiendo el calor que aquellos desprenden. La temperatura del N₂ en vapor permite la transferencia de calor con los alimentos logrando una congelación rápida obteniendo productos congelados en los que se conservan la textura, color y sabor de los productos frescos originales, con la ventaja adicional de minimizar las pérdidas de agua y la deshidratación durante el proceso.

El funcionamiento y regulación general de este tipo de túneles se basa en controlar dos factores:

- La velocidad de transporte del producto en el interior del túnel que será función de las dimensiones y características del alimento. En general basta un paso de 3 a 5 minutos para conseguir si congelación o refrigeración, según se desee.
- El caudal de nitrógeno líquido que se realiza por medio de una válvula de control y es rociado con ayuda de boquillas o espreas cuya posición puede variar con objeto de conseguir el perfil térmico más adecuado en el interior del túnel.

En la Figura1 se puede observar un esquema general de un túnel realizado por la empresa MESSER quienes dividen su túnel en zonas y con equipo de circulación del refrigerante [3].





Figura 6. Esquema de Túnel MESSER

CAPÍTULO 1

Descripción y Problemáticas del Túnel Actual



1.1 DESCRIPCIÓN DEL TUNEL REALIZADO EN ITUMI

A continuación se detalla la construcción de un túnel criogénico elaborado por ITUMI Instalaciones SA de CV. Esta empresa construye túneles de distintas dimensiones y con características distintas, haciendo distinción entre ellos de acuerdo a su longitud. Para el desarrollo de esta descripción se toma como referencia un túnel de seis metros. Esta explicación servirá como base para el desarrollo de una nueva automatización.

1.1.1 PRINCIPIO DE OPERACIÓN

El producto es depositado en una banda transportadora con velocidad variable que circula dentro del túnel, el fluido criogénico circula a lo largo del equipo permitiendo la congelación del producto [4].

En el túnel se observan las siguientes tres zonas:

- a) Zona de inyección o esparado.

En esta zona el alimento es sometido a la inyección directa de nitrógeno que viene de evaporarse; el centro de esta sección se localiza por debajo de un cabezal de espreas aproximadamente a un metro de la entrada del túnel. La cantidad de Nitrógeno líquido inyectado al túnel es gobernada a través de un controlador de temperatura. Este dispositivo monitorea la temperatura en esta zona del interior del túnel y envía una señal sobre la válvula de control neumática la cual regula la cantidad de refrigerante necesario en forma automática.

- b) Zona de circulación o distribución del gas.

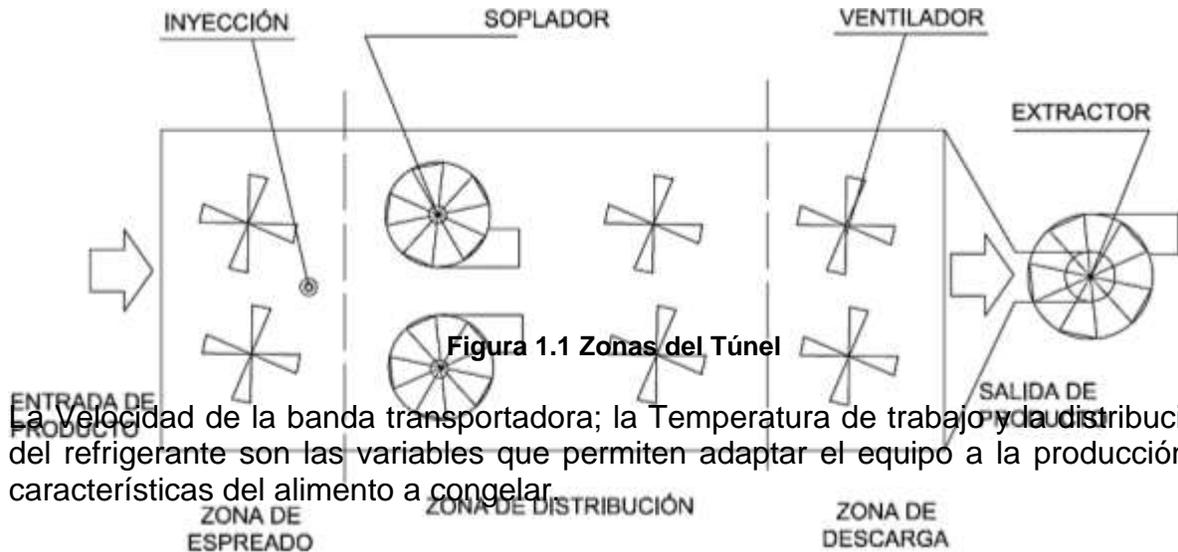
En esta zona el sistema de ventiladores y sopladores se ocupa de distribuir y aprovechar el nitrógeno gaseoso que se inyectó en la zona de esparado esperando que realice el intercambio térmico con el producto que no se produjo en la primera zona.

- c) Zona de descarga.

Es la sección más cercana a la salida de producto, es la zona del túnel en donde se instala una campana de extracción de gas a fin de generar la circulación del nitrógeno y expulsarlo hacia la atmósfera una vez que ha sido usado; esta expulsión se realiza con un extractor.

Al final de esta zona el producto puede ser recogido por los operarios o pasar a otro equipo acoplado al túnel.

En la Figura 1.1 se pueden observar las tres zonas de un túnel de seis metros de longitud. Se observan ubicados los ventiladores, sopladores y extractor colocados en la sección donde realizan su tarea.



La Velocidad de la banda transportadora; la Temperatura de trabajo y la distribución del refrigerante son las variables que permiten adaptar el equipo a la producción y características del alimento a congelar.

1.1.2 CONSTRUCCIÓN Y FUNCIONAMIENTO DE COMPONENTES

1.1.2.1 ESTRUCTURA.

La estructura de este tipo túnel cuenta con los siguientes elementos:

Soportes Generales.

Son piezas construidas con acero inoxidable 304 que dan soporte a todo el túnel. Son denominadas “patas” y se colocan cuatro de ellas por cada tres metros de longitud de túnel. La forma geométrica de estos soportes se puede observar en la Figura 1.2.





Figura 1.2 Soportes Generales

Plancha Superior y Plancha Inferior

Estos elementos son el techo y piso del túnel respectivamente. Son estructuras construidas con acero inoxidable rellenas de espuma de poliuretano como aislante térmico. La espuma de poliuretano se obtiene con la mezcla en proporción 1:2 de Isocianato y Resina de Polioli.

Soportes Internos

Estos elementos de acero inoxidable con forma de prisma rectangular son colocados a lo largo y en los extremos del túnel con la finalidad de sostener a la plancha superior. En la Figura 1.3 se puede observar la ubicación de estos soportes.

Puertas

Son estructuras construidas en acero inoxidable rellenas de espuma de poliuretano como aislante térmico. Existen cuatro puertas en un túnel de seis metros. Cada segmento de túnel de tres metros es abierto por dos puertas. En la plancha superior se coloca un interruptor eléctrico de posición por cada puerta para poder conocer su estado.





Figura1.3 Planchas montadas con soportes internos

Esquinas prismáticas.

Son estructuras colocadas en las cuatro esquinas del túnel; su función principal es dar soporte al sistema de la banda transportadora que se detallará en apartados posteriores. En la Figura 1.4 se observa que en estas esquinas también se encuentran instalados botones de paro de emergencia que están al alcance inmediato de los operarios.



Figura 1.4 Esquinas Prismáticas

Campana

Es un elemento colocado al final de túnel con la finalidad de captar el refrigerante que no es utilizado en la congelación. La campana es conectada con tubo de PVC hacia un extractor. Como se aprecia en la Figura 1.5, la campana se encuentra instalada justo en el borde de salida del túnel.



Figura 1.5 Campana

Canaleta

Canaleta de acero inoxidable que recorre el largo del túnel por el centro. Con esta canaleta se transportan los cables de alimentación y control eléctrico para el funcionamiento del túnel. En la Figura 1.6 se observa que los cables de los

dispositivos eléctricos son llevados hacia la canaleta a través de tubos licuatite para poder ser transportados hacia el tablero de control.



Figura 1.6 Canaleta

En la Figura 1.7 se observan la campana y la canaleta montadas; en esta imagen se aprecian mangueras empotradas al final de la canaleta; estas mangueras son trasladadas hacia el tablero de control.



Figura 1.7 Canaleta y Campana Instaladas

1.1.2.2 BANDA TRANSPORTADORA

El túnel criogénico cuenta con una banda transportadora cuya función principal es transportar el producto a congelar a través del equipo; cuenta con un variador de velocidad que permite establecer tiempos de permanencia del producto frente al Nitrógeno dependiendo del grado de congelación deseado y de las características del alimento.

El sistema de la banda transportadora será descrito y desglosado en componentes fundamentales a continuación:

Banda.

La Banda transportadora consta de una banda sin fin de acero inoxidable 304 como la que se observa en la Figura 1.8 en la cual se colocan los alimentos para ser transportados sobre ella.

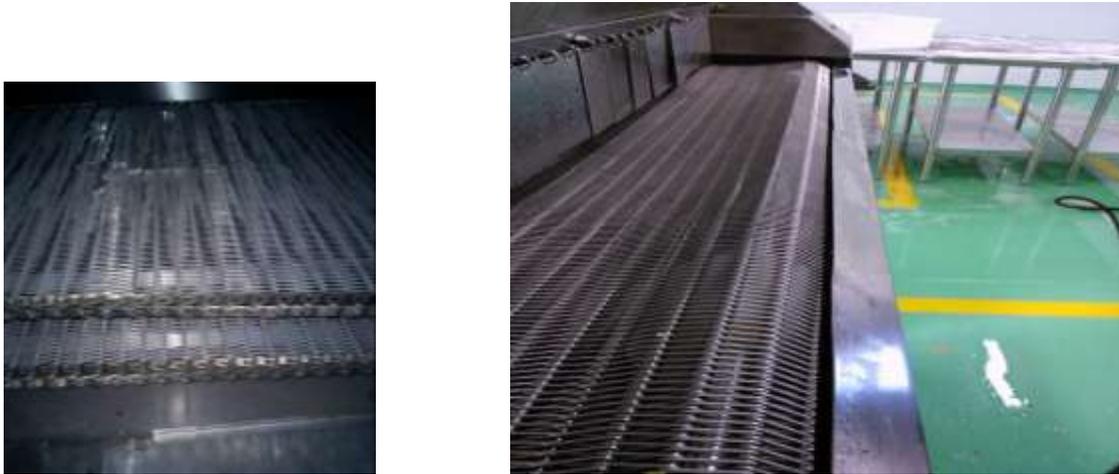


Figura 1.8 Banda de Acero Inoxidable 304

Cama

Comprende una estructura metálica formado por placas de acero inoxidable 304 que forman cuadrados a lo largo de todo el túnel, esta estructura se puede apreciar de mejor forma en la Figura 1.9 y que además esta sirve como refuerzo para la banda transportadora, en otras palabras es el esqueleto de la banda transportadora.



Figura 1.9 Cama de la banda transportadora.

Motor Trifásico.

La banda transportadora cuenta con un Motor Trifásico de inducción asíncrono con rotor tipo jaula de ardilla de 1 HP que se encarga de proporcionar el movimiento a toda la banda con la ayuda de una caja reductora Ver Figura 1.10.



Figura 1.10 Motor trifásico de inducción asíncrono con rotor tipo jaula de ardilla de 1HP

Caja reductora.

Una caja reductora de velocidad es acoplada a la flecha del motor como se puede apreciar de mayor forma en la Figura 1.11 obteniendo en su flecha de salida una velocidad menor y un torque mayor; este reductor es de la marca BALDOR teniendo como entrada máxima un motor de 1 HP de; una razón de conversión de velocidad de 50:1 y un torque máximo de 1242 Lb-in. El control de la velocidad del motor está gobernado por un variador que se ubica en el gabinete de control.



Figura 1.11 Caja Reductora

Cadena.

El túnel ocupa una cadena que se monta sobre una Catarina como se ve en la Figura 1.12 montada en la flecha de salida de la caja reductora transportadora y sobre una Catarina montada en el eje de la banda como se aprecia en la Figura 1.13.



Figura 1.12 Cadena montada sobre catarina.



Figura 1.13 Cadena montada en Catarina de la Caja

Chumacera de pared

Las chumaceras de pared son los soportes para el eje giratorio de la banda. Se encuentran ubicadas en la pared interna de las esquinas prismáticas como se observa en la Figura 1.14.



Figura. 1.14 Chumacera con cadena montada.

A continuación podemos observar en la figura 1.15 a la cadena montada en el eje de salida de la caja reductora y en el eje de movimiento de la banda. Se puede observar la chumacera montada y un tornillo de ajuste de tensión de la banda.

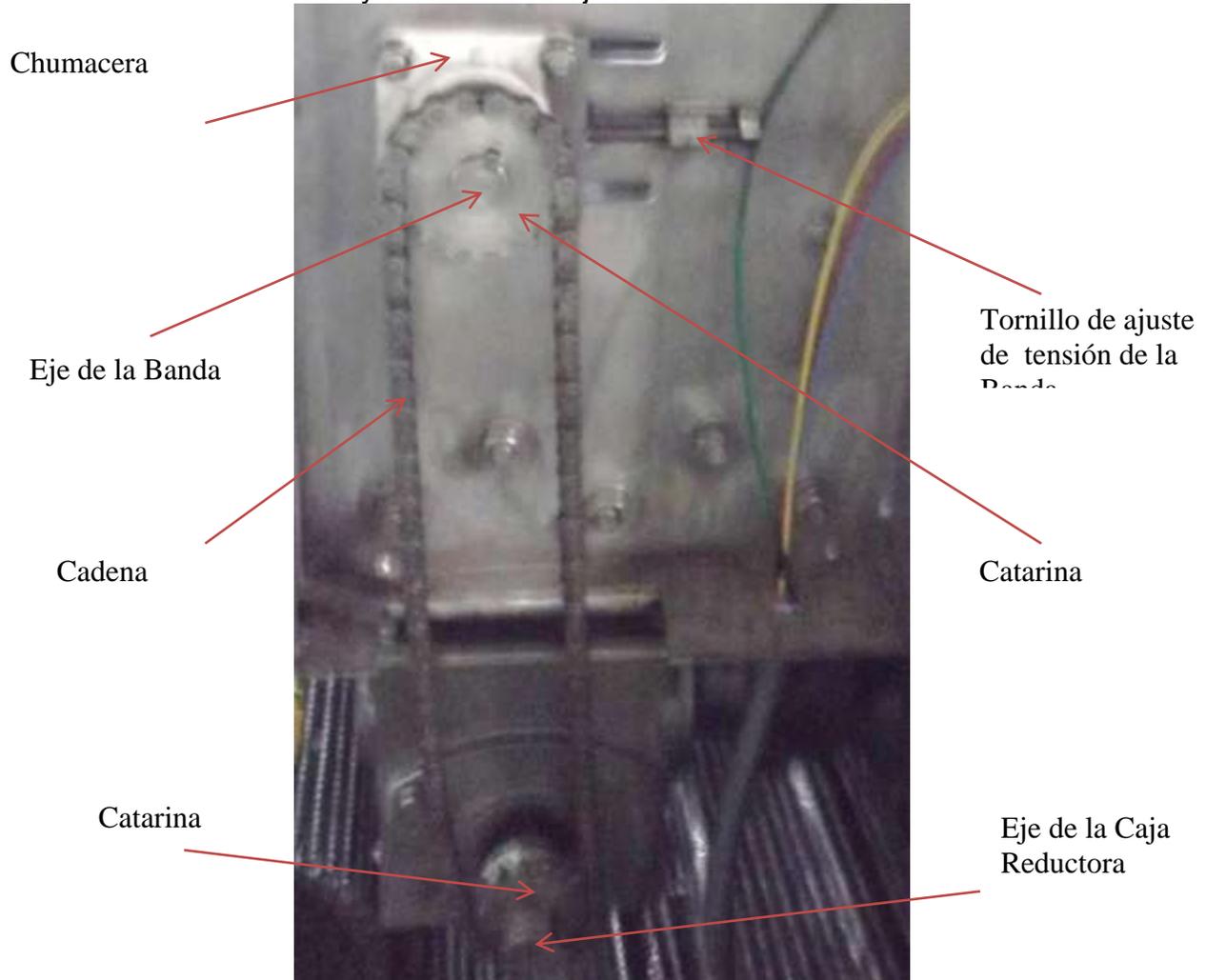


Figura 1.15 Montaje de Cadena.

Eje giratorio

Consiste en un tubo de acero inoxidable 304 que se empotra sobre las chumaceras colocadas en las esquinas prismáticas como el que se puede observar en la figura 1.16.



Figura 1.16 Eje giratorio montado entre 2 chumaceras.

Catarinas

Son engranes con dientes en V como los mostrados en la Figura 1.17 sirven para transmitir el movimiento a la banda transportadora.

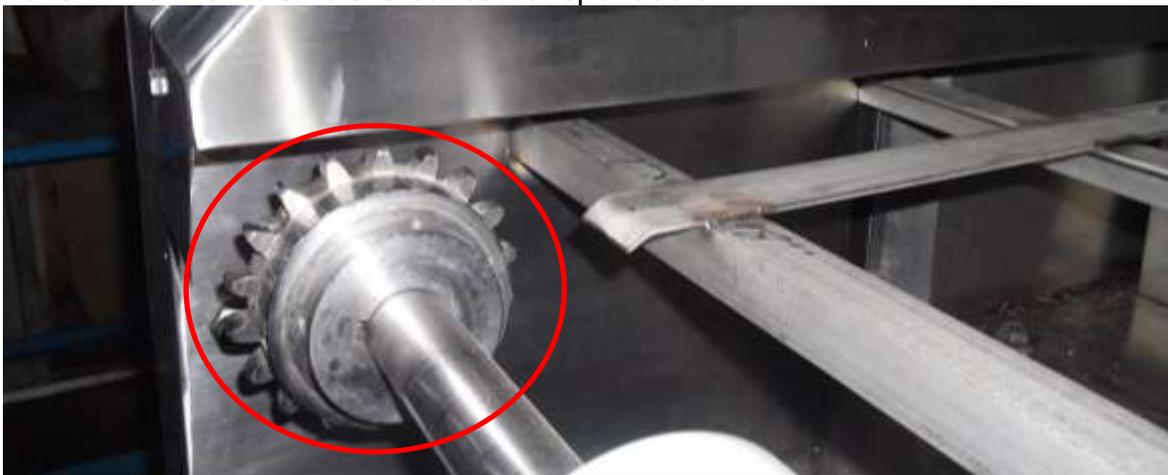


Figura 1.17 Catarina montada en eje

Como se observa en la figura 1.18 los dientes de las catarinas y los extremos de la banda se acoplan perfectamente.

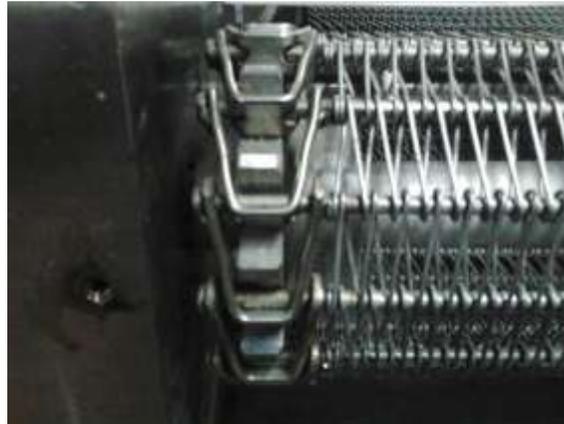


Figura 1.18 Catarina y Banda acoplados

Rodamientos de Nylamid

Los Rodamientos de Nylamid son cilindros de plástico como los mostrados en la Figura 1.19. Que se encuentran ubicados en el eje horizontal que está instalado entre las chumaceras de pared como se aprecia en la Figura 1.20; su función es de facilitar la circulación que realiza la banda a lo largo del Túnel. Son resistentes al impacto y absorben cargas que pueden llegar a fracturar los dientes de algún engrane metálico.



Figura 1.19 Rodamientos de Nylamid.



Figura 1.20 Rodamiento Nylamid montado en eje giratorio de la Banda Transportadora.
1.1.2.3 INYECCIÓN DEL NITRÓGENO LÍQUIDO

La inyección del N_2 comienza por un tanque de almacenamiento de N_2 líquido como el que se muestra en la Figura 1.21 Los tanques de nitrógeno líquido utilizados por ITUMI cuentan con su propios sistemas de monitoreo y control; dichos tanques se encuentran presurizados entre 3 y 4kgf/cm².



Figura 1.21 Tanque de Nitrógeno Líquido

El tanque de nitrógeno líquido se encuentra conectado al túnel a través de una tubería de 3 cm de diámetro cubierta por una tubería de PVC rellena de espuma de poliuretano. Sobre la tubería de alimentación de N_2 líquido se encuentra instalada la siguiente instrumentación que se observa en la Figura 1.22



Figura 1.22 Instrumentación de la alimentación del Nitrógeno líquido.

Para la descripción del tren de válvulas de la alimentación del N₂ en estado líquido, se tomara como referencia el esquema de la Figura 1.23 que se muestra a continuación:

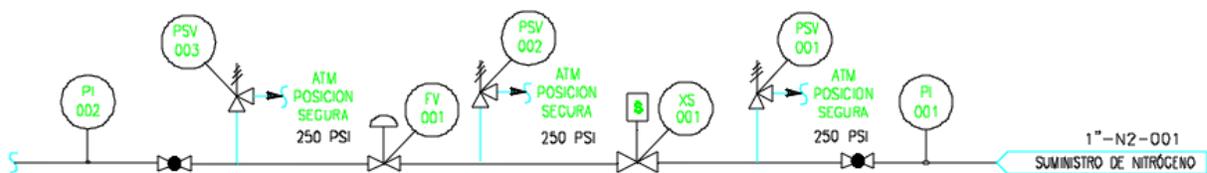


Figura 1.23 Esquema de Alimentación de Nitrógeno líquido.



A la entrada está ubicado un manómetro con una escala de **0 a 200 PSI** para medir la presión a la que entra el N_2 líquido al principio de la tubería.

Seguido del primer manómetro se encuentra ubicada una válvula de globo para cerrar manualmente el flujo del N_2 líquido.

Después de la primera válvula de regulación manual se tiene instalado una válvula de alivio para liberar sobrepresión en la tubería.

Seguida de la primera válvula de alivio se encuentra localizada una válvula solenoide que se abre cuando se pone en marcha la inyección del N_2 líquido mediante el tablero de control. Esta válvula funge como un elemento de seguridad con el que se cierra el flujo de N_2 líquido.

Al centro de la tubería está ubicada una válvula proporcional modelo 24577S de la marca Baumann de EMERSON con la que mediante un transmisor de presión y su respectiva señal de control se logra regular el flujo de entrada de N_2 líquido al Túnel Criogénico.

La inyección de flujo de N_2 entra al Túnel mediante una tubería de 3cm de diámetro para llevar el N_2 a un cabezal de espreas que se encuentra ubicado a un metro de la entrada del túnel. Como se puede ver en la Figura 1.24 esta tubería está conformada por 2 tubos paralelos que cuentan con 5 espreas distribuidas a lo largo de ellos, estos 2 tubos se encuentran ubicados de manera perpendicular al trayecto de los alimentos en el Túnel.

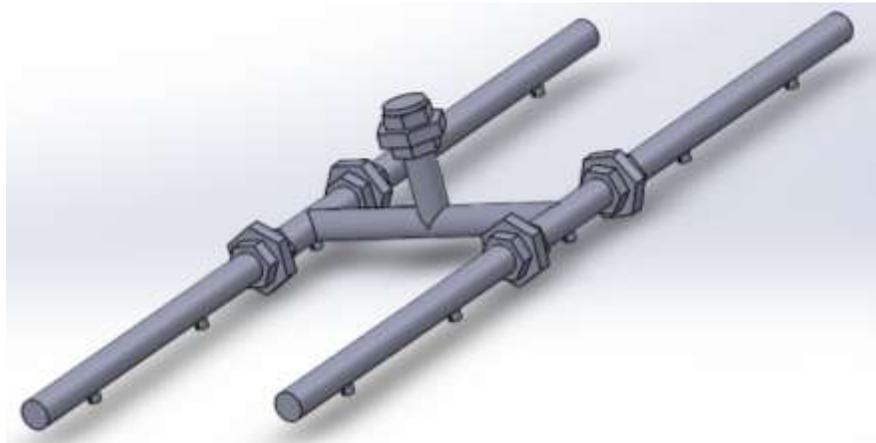


Figura 1.24 Tubería de Distribución del Nitrógeno Líquido.

Después de la válvula controladora existe una válvula de alivio para liberar presión sobre la línea.

Seguido de la segunda válvula de alivio se encuentra instalada una válvula de globo para cerrar manualmente el flujo del N_2 líquido.

Finalmente en la última sección de la tubería de alimentación del N_2 líquido se encuentra instalado un manómetro del tipo bourdon con un rango de presión de **0 a 200 PSI** para medir la presión a la que entra el N_2 líquido en el túnel.

1.1.2.4 DISTRIBUCIÓN DEL NITROGENO GASEOSO

Una vez que se ha inyectado el nitrógeno líquido y este se ha transformado en gas es necesario distribuirlo por todo el túnel. Se debe procurar una pequeña nube a la salida del equipo para evitar que el aire entre al túnel.

El ingreso de aire y humedad al túnel provoca que este se caliente y por ende un mayor consumo de Nitrógeno.

Para lograr esta tarea de distribución se cuentan con tres elementos:

Sopladores

La función principal de los sopladores colocados en el túnel es impulsar el nitrógeno gaseoso a lo largo del túnel. Los sopladores utilizados son de tipo radial y son accionados cada uno por un motor de inducción trifásico con rotor tipo jaula de ardilla de 2 HP. En la Figura 1.25 observan se observa la forma y partes principales de un soplador radial.

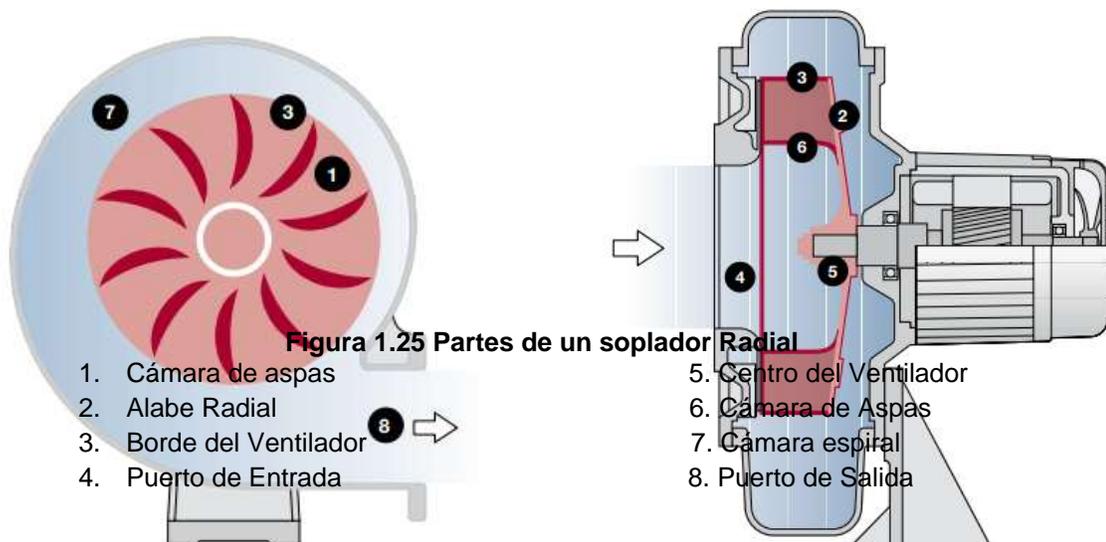


Figura 1.25 Partes de un soplador Radial

- | | |
|-------------------------|--------------------------|
| 1. Cámara de aspas | 5. Centro del Ventilador |
| 2. Alabe Radial | 6. Cámara de Aspas |
| 3. Borde del Ventilador | 7. Cámara espiral |
| 4. Puerto de Entrada | 8. Puerto de Salida |

El soplador toma el nitrógeno gaseoso acumulado en el centro del túnel y lo empuja hacia la misma dirección en la que circula la banda transportadora. Los sopladores son de vital importancia para la correcta distribución del nitrógeno pues en su ausencia el refrigerante comienza a fugarse por la entrada del túnel.

Existen dos sopladores montados en un túnel que son colocados a un costado de la inyección de nitrógeno. Estos sopladores son construidos con acero inoxidable 304 para poder ser montados en el interior del túnel. El flujo de salida de cada soplador es de 2300m³/h.

Los sopladores cuentan con un variador de velocidad que permite aumentar o disminuir el flujo de nitrógeno gaseoso que circula por el túnel. Cabe aclarar que este flujo no tiene relación con la temperatura a la que el túnel esté operando, es decir, no está involucrado en ningún lazo de control de la temperatura. ITUMI hace uso de los variadores de manera manual pues dependiendo del ambiente donde se instale se hacen modificaciones en la velocidad de los sopladores.

Ventiladores

La función de los ventiladores es proyectar la nube de nitrógeno hacia el producto que está siendo movido a través de la banda transportadora. El sentido de giro y la forma de estos ventiladores distribuidos en el túnel permiten que el nitrógeno no se eleve y que el contacto con el producto sea el adecuado.

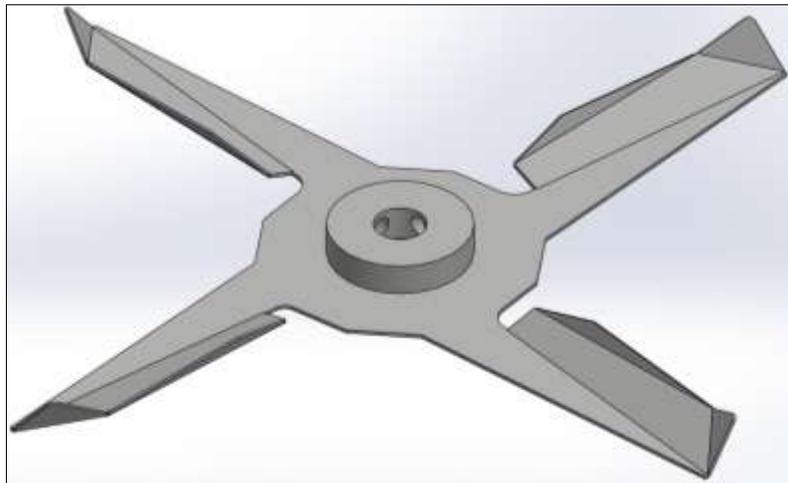


Figura 1.26 Vista isométrica de Ventilador

Se puede observar en la Figura 1.29 que el equipo cuenta con seis ventiladores cuyo sentido de giro depende de la posición que ocupen en el túnel. Se colocan pares de ventiladores con sentido de giro opuesto para que las corrientes de refrigerante que arrojen choquen y se proyecten al producto.

Cada ventilador es accionado por un motor trifásico con rotor tipo jaula de ardilla de 1HP. Como se puede observar en la Figura 1.27 los motores se colocan en la parte superior del túnel dejando libre la flecha en el interior en la que se montan los ventiladores.

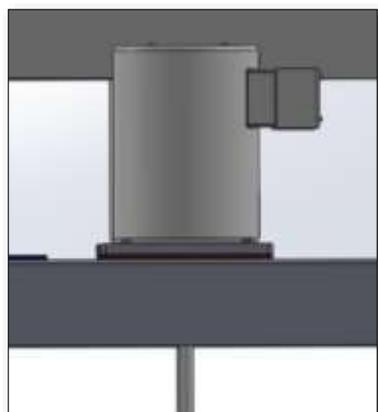


Figura 1.27 Motor de 1HP acoplado a un Ventilador

Estos motores son operados a tensión plena y no son parte de algún lazo de control de temperatura del túnel por lo que su funcionamiento es totalmente independiente.

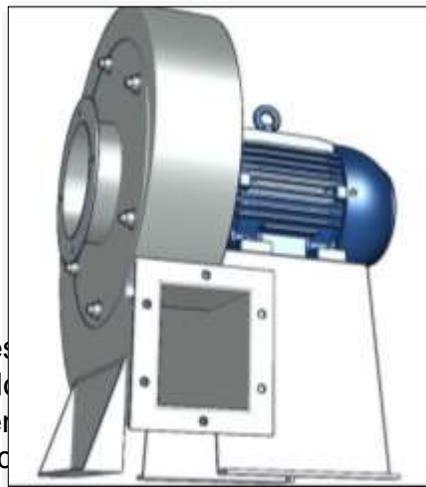
Extractor

Un extractor es colocado al final del túnel con la finalidad de eliminar el exceso de nitrógeno que es aventado por los sopladores. Como se había mencionado en apartados anteriores; la extracción se realiza a través de una campana montada en la zona de descarga. La salida de la campana es llevada por tubería de PVC de 4” hacia la entrada del extractor que expulsa el exceso hacia la atmósfera. Estos equipos se encuentran instalados en el exterior.

Este extractor es de suma importancia para la seguridad de los operarios y personal en general pues la fuga del nitrógeno gaseoso puede causar graves daños a la salud.

El extractor es accionado por un motor de inducción con rotor tipo jaula de ardilla de 5 HP. Este motor está conectado a un driver que es configurado manualmente por el personal de ITUMI y el valor de velocidad depende de pruebas experimentales. Como se puede observar en la Figura 1.28 el extractor es de tipo centrífugo y es construido con una carcasa en acero y un ventilador de alabes rectos radiales. El flujo de salida de este extractor es de 3500 m³/h.

El funcionamiento de esta máquina es igual al de los sopladores; lo que los distingue es la función desempeñada puesto que uno sirve como impulsor y otro como extractor.



Como se ha descrito en este apartado, el nivel de nitrógeno en el túnel depende de la velocidad a la que operan los sopladores y el extractor. Los valores de velocidad de estos elementos se controlan generalmente mediante drives y ninguno depende del valor de nitrógeno presente al momento de operar el túnel.

En la Figura 1.29 se observa en color azul el movimiento que realiza el refrigerante con ayuda de los elementos de distribución y en color rojo el sentido de giro de cada uno de los motores.

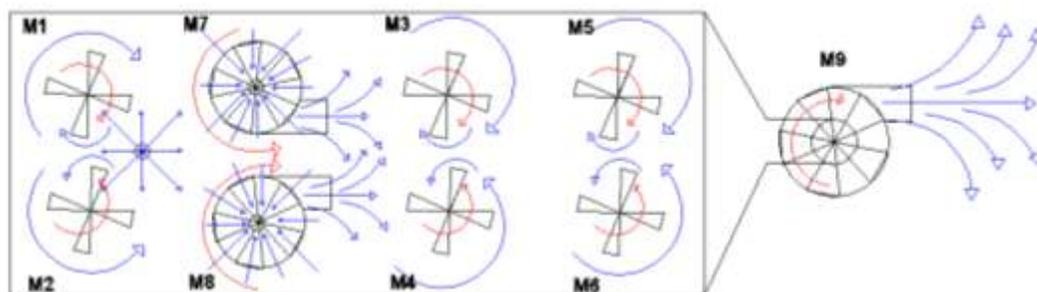


Figura 1.29 Sentido de giro de Motores y Movimiento de Refrigerante
1.1.2.5 CONTROL DE TEMPERATURA

Para mantener el túnel a una temperatura específica, ITUMI Instalaciones realiza un lazo de control en el que se encuentran los siguientes elementos:

-Sensor de temperatura RTD PT100 de 3 hilos como elemento primario. Este componente es colocado en la zona de inyección o esparido.

-Controlador universal de temperatura UDC3200 de Honeywell (Ver Figura 1.30). Este dispositivo es capaz recibir como retroalimentación directamente la señal eléctrica de un PT100 sin necesidad de un transmisor y es capaz de generar una señal de control eléctrica normalizada de 4@20 mA de acuerdo a sus propios algoritmos de control.



Figura 1.30 UDC3200

-Transductor de Corriente a Presión STD 5000 de Thermo Electron Corporation (Ver Figura 1.31) con una entrada eléctrica de corriente normalizada 4@20 mA y una salida de 3@15 psig y una alimentación de 20 psig.



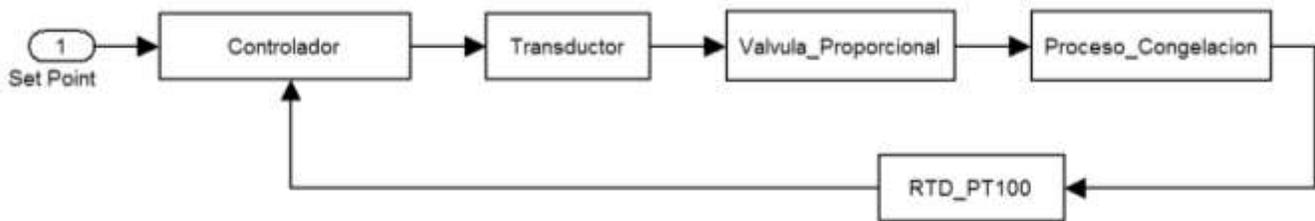
Figura 1.31 STD 5000

-Válvula de control proporcional BAUMANN 24577 (Veri Figura 1.32) de tipo igual porcentaje; cuenta con un $C_v=8.5$ y de diámetro de tubería igual a 1". Este elemento final de control es el encargado de inyectar la cantidad de nitrógeno dispuesta por el controlador.



Figura 1.32 Válvula de control proporcional.

En la siguiente figura se muestra el lazo de control de Temperatura del túnel:



1.1.2.6 TABLERO DE CONTROL

A un lado del túnel, se encuentra el tablero de control. La alimentación del tablero es trifásica a 220 VCA a 60 Hz. En él se encuentran visibles los siguientes elementos:

- Drives de la marca BALDOR. Se instalan estos dispositivos para variar la velocidad de los motores de sopladores, extractor y banda.
- Controlador de temperatura de la marca HONEYWELL
- Botones de Operación
- Lámparas Indicadoras

Dentro del Tablero se encuentran cableados los circuitos de control y fuerza para la operación del túnel. En él se montan los controladores HONEYWELL, los variadores, los botones y luces indicadoras que hacen posible la operación del equipo.



Figura 1.34 Tablero de Control

1.2 PROBLEMÁTICAS DE LA AUTOMATIZACIÓN ACTUAL

De acuerdo a lo descrito anteriormente, la operación de un túnel depende de los siguientes factores:

- Velocidad de los Sopladores y Extractor para la distribución del nitrógeno gaseoso.
- Lazo de Control de Temperatura para la inyección de N_2 .
- Velocidad de la Banda para el tiempo de exposición del alimento al nitrógeno.

ITUMI Instalaciones realiza la automatización de sus túneles tomando estos factores de manera aislada provocando los siguientes problemas:

- La elección de la velocidad de los motores que activan a los sopladores, y extractor se realiza de forma manual cuando el túnel está montado y en funcionamiento, Este procedimiento provoca pérdida de tiempo cuando se desea echar a andar un túnel puesto que los valores de operación se obtienen a prueba y error.
- No es posible conocer a ciencia cierta si la distribución del refrigerante es la adecuada pues únicamente se cuenta con un sensor de temperatura.
- Al no existir ninguna relación entre la temperatura del túnel y la velocidad de los elementos de distribución del Nitrógeno existen pérdidas de refrigerante. Si la



distribución no es la adecuada puede provocar fugas de refrigerante que entran en contacto con los operarios lo que les puede provocar daños en el sistema respiratorio.

CAPÍTULO 2

Propuestas, Pruebas Experimentales y Elección de Algoritmos de Control



2.1 PROPUESTAS DE AUTOMATIZACIÓN

Para poder atacar las problemáticas descritas en el capítulo anterior se desarrollará un nuevo proyecto de automatización con el que se pretende lograr lo siguiente:

- Arrancar y operar al equipo de forma automática y manual.
- Mejorar la distribución del nitrógeno gaseoso provocando un mejor aprovechamiento del refrigerante.
- Mantener al túnel en condiciones seguras para los operarios.

A continuación se plantean propuestas que buscan enlazar las variables de velocidad de los elementos de distribución del refrigerante y la temperatura del túnel con lo que se pretende aprovechar al N_2 de mejor manera. El aprovechamiento del N_2 implica disminuir las fugas de refrigerante que entra en contacto con los operarios y disminuir la cantidad de N_2 aventado a la atmósfera. Todas las propuestas requieren de un controlador que se encargue de la lógica de arranque y operación del túnel.

2.1.1 PROPUESTA 1

Para mejorar la distribución de refrigerante se sugiere añadir dos sensores de temperatura en zonas específicas. Uno será ubicado entre la zona de distribución y la zona de descarga justo en medio de los cuatro ventiladores. El otro sensor de temperatura será colocado en la zona de descarga justamente en la parte posterior al área de entrega del producto como se puede apreciar en la Figura 2.1. Se recuerda que el SENSOR 1 ya existe en la automatización actual.

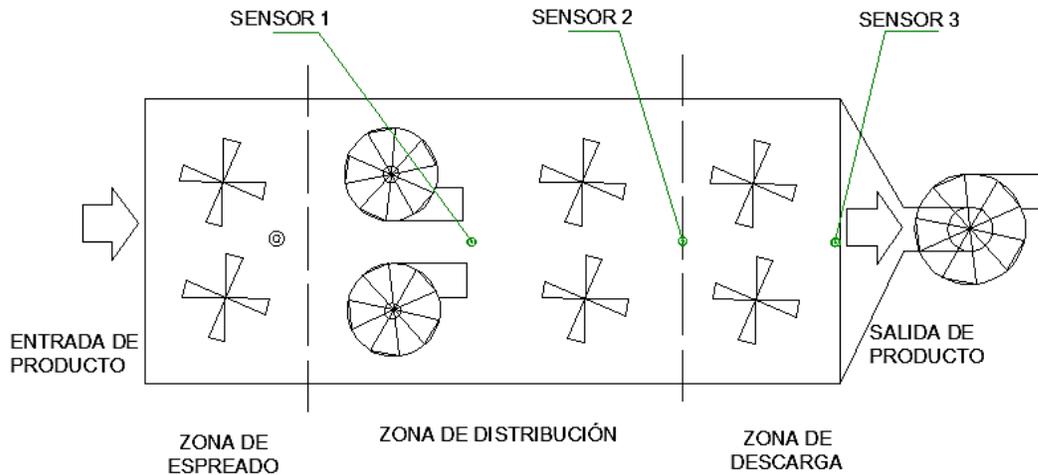


Figura 2.1 Distribución de nuevos sensores de temperatura Propuesta 1

Con esta distribución de los nuevos sensores de temperatura se logrará crear un sistema de control conformado por tres lazos cerrados de control como se muestra en el Figura 2.2.

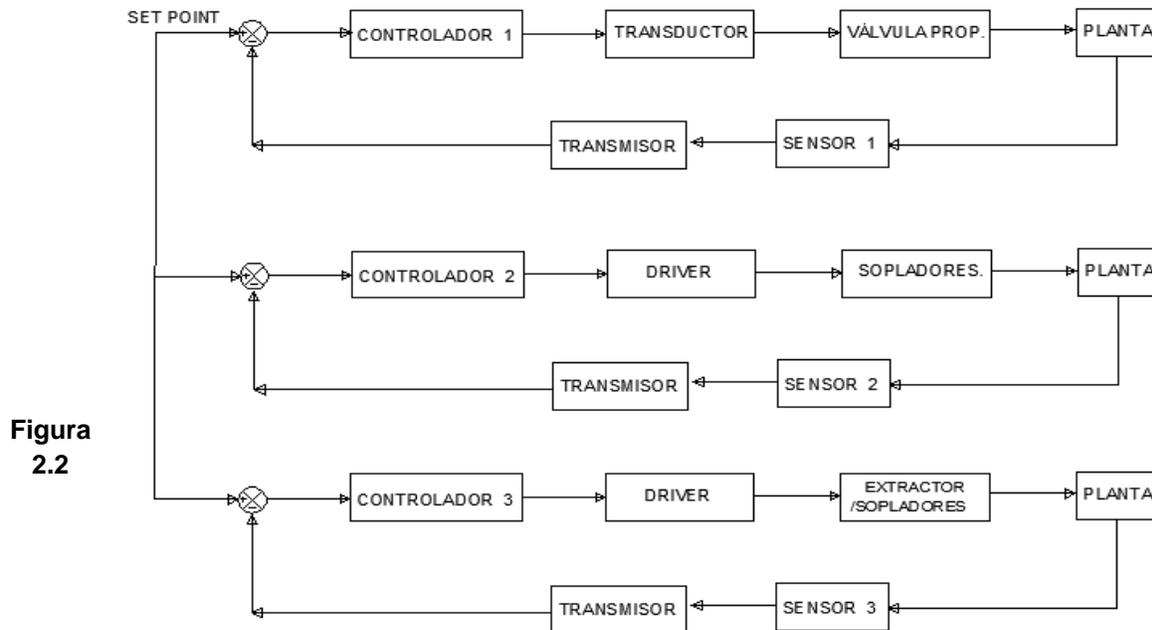


Figura 2.2

Diagrama Propuesta 1

Se contará con tres lazos de control cerrado; cada lazo de control contará con un elemento final de control único, tendremos un solo Set-Point (temperatura requerida por operario) que es la entrada de punto de ajuste para los tres lazos de control.

El primer lazo de control contará con un “controlador 1”; como elemento final de control tendrá a la Válvula de Flujo de N₂ líquido y para realizar la medición de la temperatura tendremos al SENSOR1.

En el segundo lazo se contará con un “controlador 2; como elemento final de control a los tendrá a los sopladores y para medir la temperatura se empleará al SENSOR 2.



En el tercer lazo tendremos un “controlador 3”; como elemento final de control al extractor y para realizar la medición de temperatura se contará con el SENSOR 3.

Ventajas:

- Mediante la implementación de los tres sensores se logra una medición de la temperatura en tres zonas a lo largo del túnel con lo que se tienen datos para lograr a distribución de refrigerante.

Desventajas.

- Cada lazo de control verá por mantener la temperatura de su zona igual al set point con lo que se podría observar pérdida de refrigerante.
- Debido a que aún no estamos empleando un medio para poder medir la pérdida del refrigerante, se sigue poniendo en riesgo la salud de operarios por la fuga de N2.

2.1.2 PROPUESTA 2

Se sugiere utilizar un nuevo elemento primario de medición de temperatura colocado entre la zona de distribución y descarga. En la Figura 2.3 se observa la ubicación del sensor que sirve como elemento primario del lazo de control de temperatura ya existente (SENSOR1) y del nuevo sensor de temperatura (SENSOR 2).

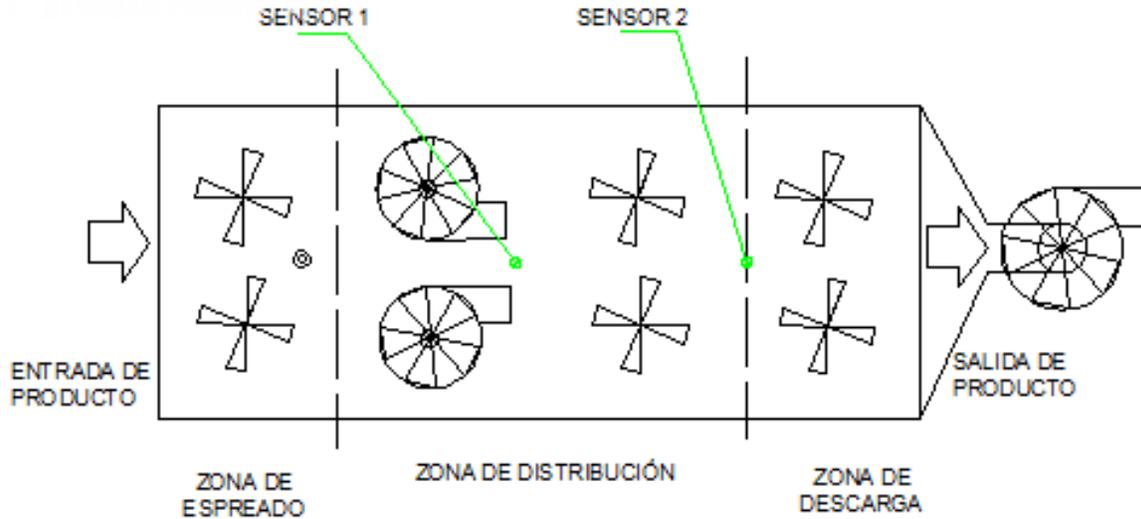


Figura 2.3 Distribución de nuevos sensores de temperatura Propuesta 2

Se mantiene el lazo de control de temperatura de inyección de N2 haciendo que la respuesta del primer sensor de temperatura sea el punto de ajuste de un segundo lazo de control que regulará el accionar de los sopladores y extractor.

En la Figura 2.4 se puede observar el enlace entre los lazos de control.

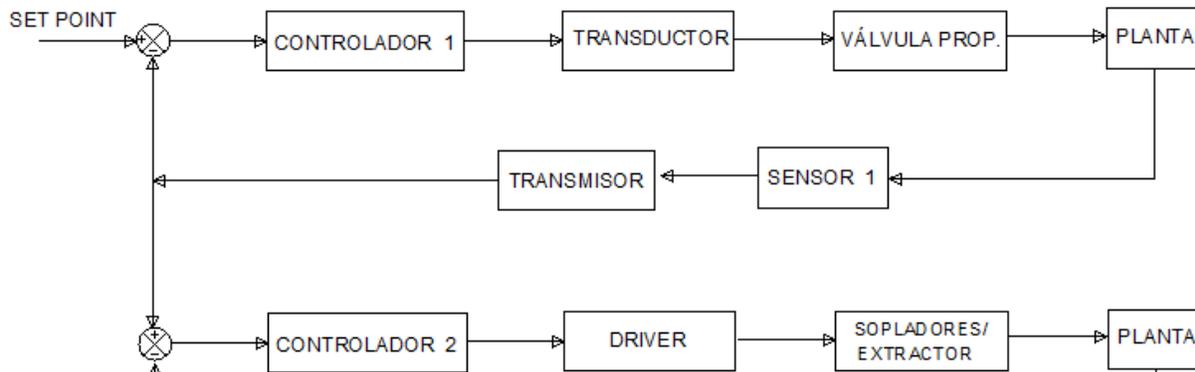


Figura 2.4 Diagrama Propuesta 2

Con este nuevo lazo de control se pretende mejorar la distribución del refrigerante logrando que la temperatura sea homogénea a lo largo del túnel.

Ventajas

- Puesto que el punto de ajuste del segundo lazo de control es la respuesta del sensor del primer lazo de control, los sopladores y extractor tratarán de distribuir refrigerante que ya se encuentra dentro del túnel.

Desventajas

- Existe una dependencia de la rapidez de respuesta del SENSOR 1 para que el segundo lazo pueda accionar de manera adecuada.



-
- No existe ningún elemento que nos permita saber si existe fuga de refrigerante a la salida del túnel.

2.1.3 PROPUESTA 3

Para lograr la distribución de refrigerante se sugiere utilizar como elementos primarios el sensor de temperatura ya existente y dos nuevos; uno colocado entre las zonas de distribución y descarga y el otro justo en la salida del túnel. Esta distribución se puede observar en la Figura 2.5.

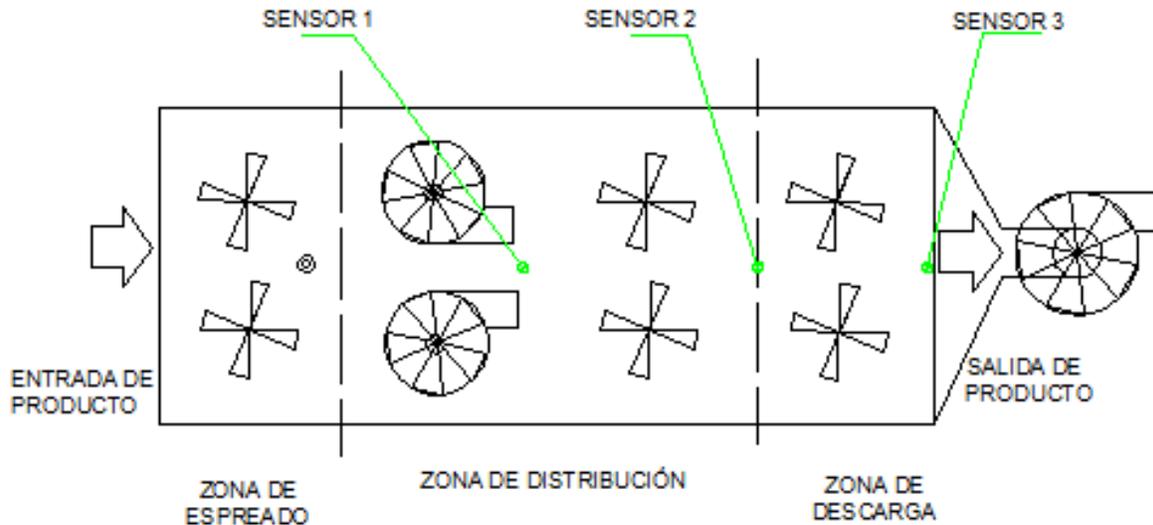


Figura 2.5 Distribución de nuevos sensores de temperatura Propuesta 3

Se debe mantener el lazo de control de temperatura ya existente que regula la inyección de nitrógeno al túnel.

Un segundo lazo de control contará con el SENSOR 2 como elemento primario. Este lazo tendrá como punto de ajuste a la temperatura escogida por el operario y accionará a los sopladores quienes se encargarán de distribuir al refrigerante.

Un tercer lazo de control cuyo elemento primario es el SENSOR 3 nos servirá para monitorear la temperatura en la zona de descarga y aumentar la velocidad del extractor cuando exista fuga de refrigerante.

Se considera que este tercer lazo de control no podrá alcanzar el setpoint escogido por el operario ya que el elemento primario se encuentra justo a la salida del producto expuesto en mayor medida a la temperatura ambiente.

Este lazo de control tendrá como punto de ajuste la temperatura escogida por el operario menos un valor β que deberá ser encontrado experimentalmente. Cuando la temperatura en esta zona sea menor al setpoint- β podremos afirmar que existe fuga de refrigerante.

Los dos primeros lazos de control verán por mantener la temperatura de la zona de inyección y distribución iguales al setpoint escogido por el usuario mientras que el tercer lazo de control verá por mantener la temperatura de la zona de descarga igual al setpoint- β . Con estas consideraciones la distribución del refrigerante varía de acuerdo a la zona del túnel.

En la Figura 2.6 se observa de manera general cómo se enlazarían los lazos de control.

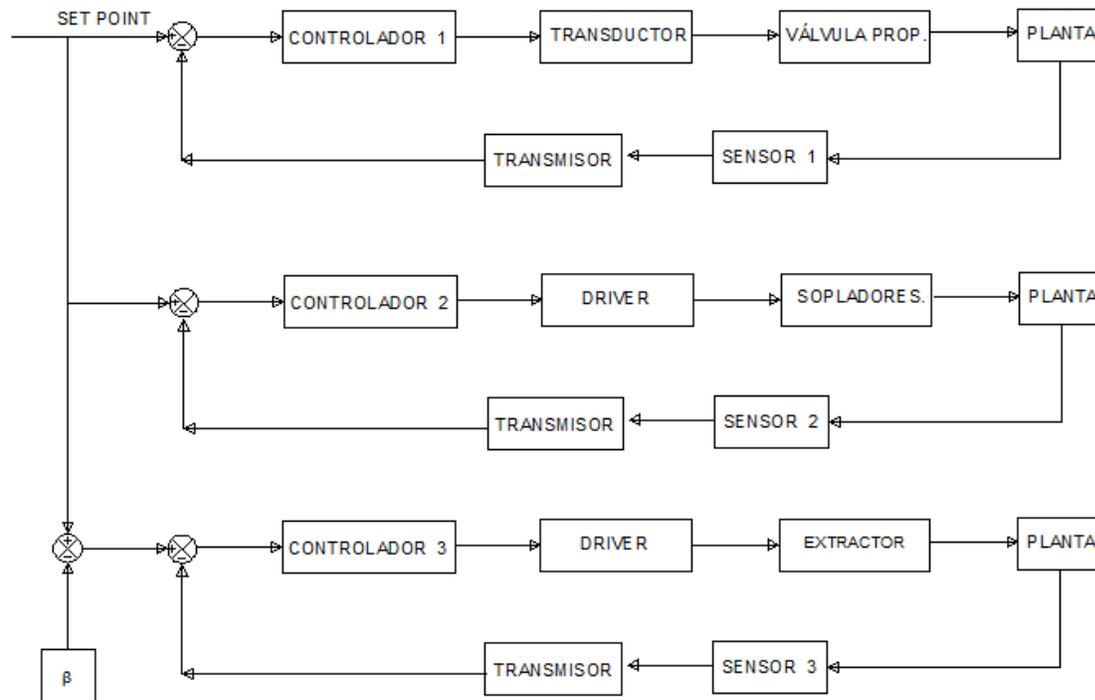


Figura 2.6 Diagrama Propuesta 3

Ventajas

- Se toma en cuenta la interacción que tiene el túnel con el exterior.
- Se puede conocer la existencia de fuga de refrigerante en la salida con ayuda del SENSOR 3.
- Se realiza una distribución de refrigerante de acuerdo a la zona del túnel

2.1 ELECCIÓN DE LA PROPUESTA

Después de haber analizado las ventajas y desventajas de las propuestas, se optó por la Propuesta 3 que ofrece la solución de las problemáticas del túnel actual. Esta solución es el pilar de la automatización pues es la idea que hace de este túnel un equipo innovador.

2.2 PRUEBAS EXPERIMENTALES DE COMPORTAMIENTO ACTUAL

Las siguientes pruebas se realizaron el 6 de noviembre de 2013 con un túnel criogénico instalado en la empresa VICTORIA ubicada en Tizayuca Estado de México.

El objetivo de estas pruebas fue de conocer el comportamiento en arranque y operación de la temperatura en diferentes zonas de un túnel de seis metros teniendo en mente que la Propuesta 3 fue la elegida como solución de la automatización.

Para lograr lo anterior se contó con el siguiente equipo:

- Dos sensores de temperatura tipo RTD PT100.
- Dos indicadores de temperatura.
- Gabinete de conexión.

Se puede observar en la Figura 2.7 en donde fueron ubicados los sensores de temperatura. El SENSOR 1 es elemento primario del único lazo cerrado de control existente en el túnel. Se colocaron el SENSOR 2 y SENSOR 3 en las zonas indicadas porque es en donde la propuesta indica que se tomarán los datos de la nueva automatización.

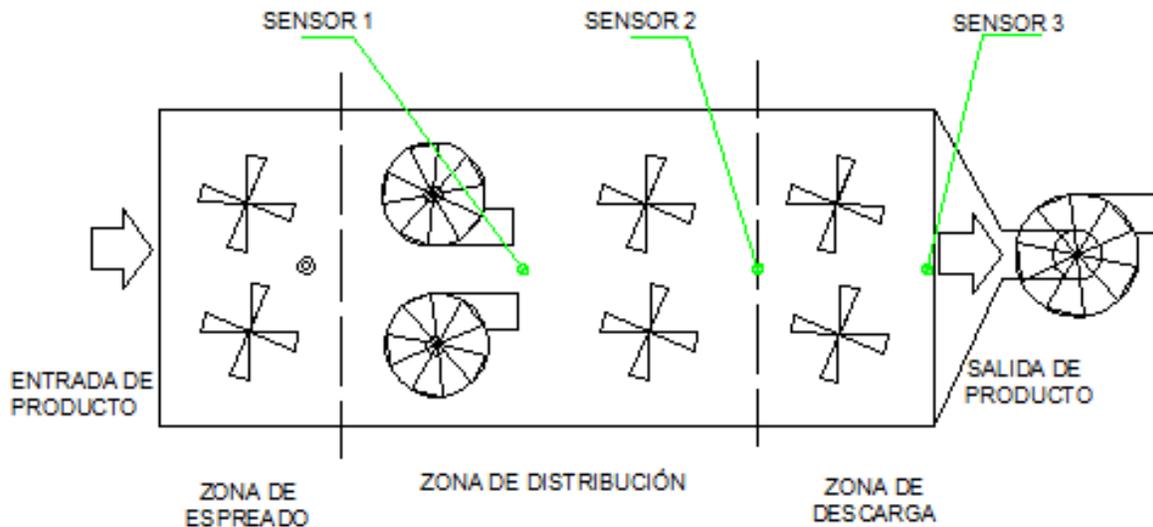


Figura 2.7 Ubicación de sensores de Temperatura

Es importante señalar que el lazo de control ya existente no será modificado en esta nueva automatización. Únicamente se desarrollaron las pruebas pensando en la implementación de los dos nuevos lazos de control.

2.2.1 PRUEBAS AL ARRANQUE

Se arrancó el túnel para llegar a una temperatura de trabajo de $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Los operarios realizan este arranque por etapas, esto significa que disminuyen la temperatura de set point por pasos de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta alcanzar la temperatura de trabajo deseada.

Se leyeron las temperaturas de cada uno de los sensores cada 30 segundos para conocer el comportamiento de la temperatura en estas zonas. Los resultados se muestran en la Tabla 1.



Tabla 1. Comportamiento de la Temperatura en Zonas de Inyección, Distribución y Descarga.

COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA			
TIEMPO min	Inyección °C	Distribución °C	Descarga °C
0.5	-4	1.9	2.9
1	-5	1.8	2.9
1.5	-5	1.8	2.9
2	-6	1.8	2.8
2.5	-7	1.8	2.8
3	-9	1.1	2.5
3.5	-10	-1.2	0.9
4	-14	-4.4	-0.6
4.5	-17	-7.6	-2.3
5	-19	-10.2	-3.6
5.5	-25	-17.2	-9.4
6	-30	-23.6	-13
6.5	-34	-27.9	-15.9
7	-37	-32.2	-19.2
7.5	-40	-34.4	-21.7
8	-43	-40.4	-28
8.5	-46	-41.1	-28.5
9	-47	-42.1	-30.5
9.5	-48	-42.5	-33
10	-49	-42.9	-33.4
10.5	-49	-42.9	-34
11	-50	-43	-34

 Set Point: -20 °C

 Set Point: -40 °C

 Set Point: -50 °C

El túnel había sido enfriado minutos antes; es por esta razón que los valores iniciales no fueron cercanos a la temperatura en el ambiente en ese instante.

En la Figura 2.5 se puede observar el comportamiento de las temperaturas en forma de gráfica.





Figura 2.8. Comportamiento de Temperatura

Se puede observar que las Temperaturas en la Zona de Distribución y Descarga no logran alcanzar el valor de Set Point igual a $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$. La diferencia promedio entre la Temperatura de Inyección y Distribución es de $6.84\text{ }^{\circ}\text{C}$ y entre la Temperatura de Inyección y Descarga es de $13.84\text{ }^{\circ}\text{C}$ mientras que cuando el set point es alcanzado la diferencia entre estas zonas es de $7\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $16\text{ }^{\circ}\text{C}$ respectivamente.

2.2.2 PRUEBAS EN OPERACIÓN

Una vez arrancado el túnel con un Set Point igual a $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ se procedió a realizar cambios en los elementos de distribución y así observar el comportamiento de las Temperaturas en las diferentes zonas del equipo **a lazo abierto**. El valor inicial de la velocidad de los sopladores fue de 28 Hz en el variador mientras que la del extractor fue de 15 Hz en el variador. Se recuerda que actualmente estos valores de velocidad se obtienen a través pruebas experimentales gastando tiempo y refrigerante en observar si el producto salía en buenas condiciones y sin fuga de nitrógeno.

2.2.2.1 Respuesta al Cambio de Velocidad de Sopladores

Se modificó el valor de la velocidad en los sopladores de un valor inicial de 28 Hz a un valor de 60 Hz. Se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 2.

Tabla 2. Comportamiento de Temperaturas al cambio de Velocidad de Sopladores

Tiempo min	Inyección $^{\circ}\text{C}$	Distribución $^{\circ}\text{C}$	Descarga $^{\circ}\text{C}$
0	-50	-44.4	-35.6
0.5	-50	-44.4	-35.6
1	-50	-44.8	-35.6



1.5	-50	-45.6	-36
2	-50	-46.5	-36.8
2.5	-50	-47	-37.5
3	-50	-47.7	-38.1
3.5	-50	-48	-38.6
4	-50	-48.4	-38.9
4.5	-50	-48.7	-39.2
5	-50	-48.9	-39.5
5.5	-50	-49.1	-39.7
6	-50	-49.2	-39.9
6.5	-50	-49.3	-40.2
7	-50	-49.5	-40.5
7.5	-50	-49.5	-40.7
8	-50	-49.7	-40.8
8.5	-50	-49.7	-40.9
9	-50	-49.7	-41
9.5	-50	-49.7	-41
10	-50	-49.7	-41

En las gráficas mostradas en la Figura 2.6 se puede observar que las temperaturas en la zona de distribución y descarga disminuyen al aumentar la velocidad de los sopladores; sin embargo se comenzó a observar fuga de refrigerante a la salida del túnel cuando la diferencia entre la temperatura de la zona de inyección y de la zona de descarga fue igual a $9.8\text{ }^{\circ}\text{C} \approx 10^{\circ}\text{C}$.

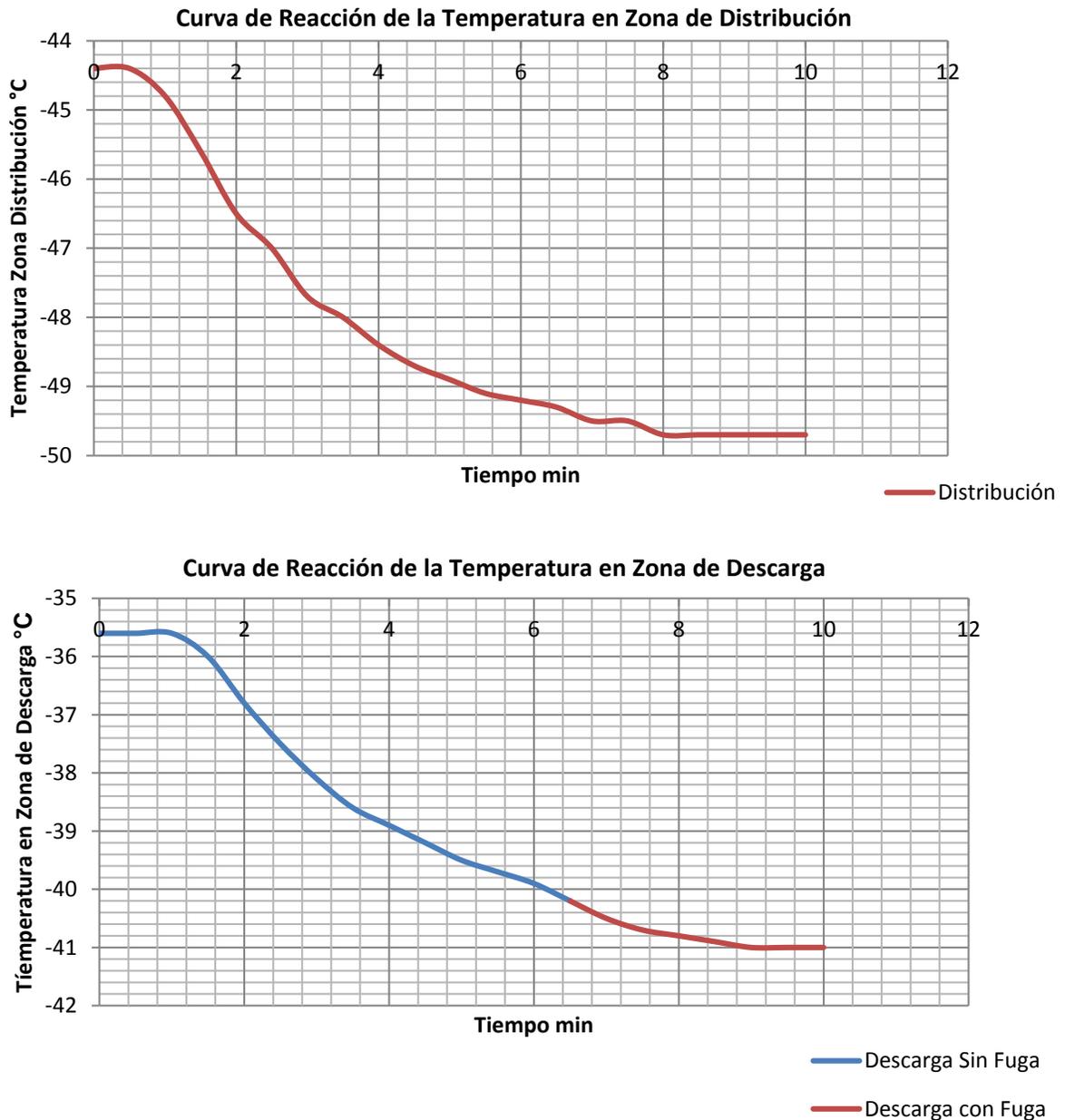


Figura 2.9 Comportamiento de Temperaturas al cambio de velocidad en sopladores

Como se había planteado en la propuesta 3, el SENSOR 3 servirá para conocer la existencia de fuga de refrigerante en la salida. Con los datos recabados se puede afirmar que comienza a haber fuga cuando la señal del SENSOR 3 difiere en 10°C a la temperatura en la zona de inyección con lo que se plantea que $\beta=10^{\circ}\text{C}$.

De igual forma se puede afirmar que aumentando la velocidad de sopladores la temperatura en la zona de distribución alcanza valores cercanos a la zona de inyección antes de que exista fuga de nitrógeno.

2.2.2.2 Respuesta al Cambio de Velocidad de Extractor



Se modificó el valor de la velocidad en el extractor cuando la temperatura en la zona de Descarga se estabilizó al cambio de velocidad de sopladores. Se cambió de un valor inicial de 15 Hz a un valor de 30 Hz. Se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 3.

Tabla 3. Cambio de Temperatura en la Zona de Descarga al cambio de velocidad en Extractor

Tiempo min	Descarga °C
0	-41
0.25	-41
0.5	-40.8
0.75	-40.6
1	-40.1
1.25	-40
1.5	-39.8
1.75	-39.3
2	-39.2
2.25	-38.8
2.5	-38.7
2.75	-38
3	-37.4
3.25	-37
3.5	-36.9
3.75	-36.3
4	-36.1
4.25	-35.5
4.5	-35.2
4.75	-34.9
5	-34.8
5.25	-34.5
5.5	-34.4
5.75	-34.3
6	-34.3

Es importante señalar que la Temperatura en la Zona de Distribución no se vio afectada a este cambio de velocidad en el extractor, sin embargo, si la velocidad de este elemento de distribución aumenta a un valor superior a 35 Hz, la temperatura en la Zona de Distribución comienza a aumentar. Es por esta razón que se eligió tomar el valor de 30 Hz para la descripción de esta prueba experimental.

En la gráfica mostrada en la Figura 2,7 se aprecia que la temperatura en la zona de descarga aumenta y llega a un valor en el que se deja de observar fuga en la salida del equipo, sin embargo la temperatura sigue aumentando hasta que se estabiliza en un valor específico.

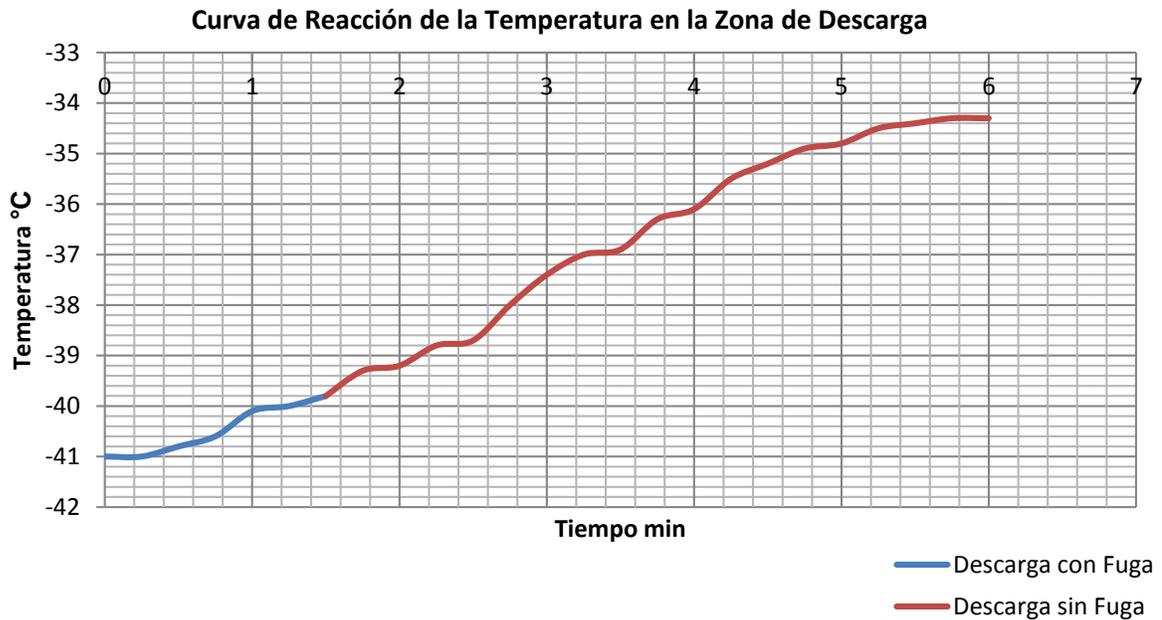


Figura 2.10 Comportamiento de Temperaturas al cambio de velocidad en sopladores

Es importante señalar que los sopladores y extractor no pueden dejar de funcionar pues esto ocasionaría fuga de refrigerante. Si se apagan los sopladores, el nitrógeno no se distribuiría a lo largo del túnel y se presentaría fuga en su entrada. Si se apaga el extractor el nitrógeno se fugaría por la salida del equipo. De esta forma se asignan valores de offset para cada uno de estos elementos siendo 28Hz para Sopladores y 15Hz para el Extractor.

Con estas pruebas experimentales es posible plantear una solución basada en la propuesta 3; esta solución debe contemplar el significado de las diferencias de temperaturas en las zonas del túnel cuando se aumenta la velocidad de sopladores y que los elementos de distribución de refrigerante siempre deben estar activos.

2.3 ALGORITMOS DE CONTROL

Una vez realizadas las pruebas, es posible presentar los algoritmos de control a utilizar en el segundo y tercer lazo enunciados en la propuesta tres. Se recuerda que el primer lazo de control ya está implementado por lo que se utilizará un control PID Auto-sintonizado existente en controladores actuales.

2.3.1 SEGUNDO LAZO DE CONTROL – CONTROLADOR 2

Como se observó en los trabajos de pruebas experimentales, el túnel tiene un comportamiento a lazo abierto de un sistema posible de identificar a partir de su curva de respuesta de temperatura en zona de distribución $T(t)$ a un cambio tipo escalón en la velocidad de los sopladores $v(t)$ de un valor de 28Hz a 60Hz. Esta identificación se basa en el primer método de las reglas de sintonización de controladores PID de Ziegler-Nichols que además de ayudar a identificar el sistema permitirá conocer las constantes del controlador PID a utilizar [5] [6].

2.3.1.1 Identificación de la Planta

Para lograr lo anterior es necesario contar con la curva de respuesta del sistema en forma de S y trazar una línea tangente en el punto de inflexión de la curva para encontrar los parámetros L tiempo de retardo y T constante de tiempo. En la Figura 2.11 se muestra la curva y los trazos correspondientes según el método.

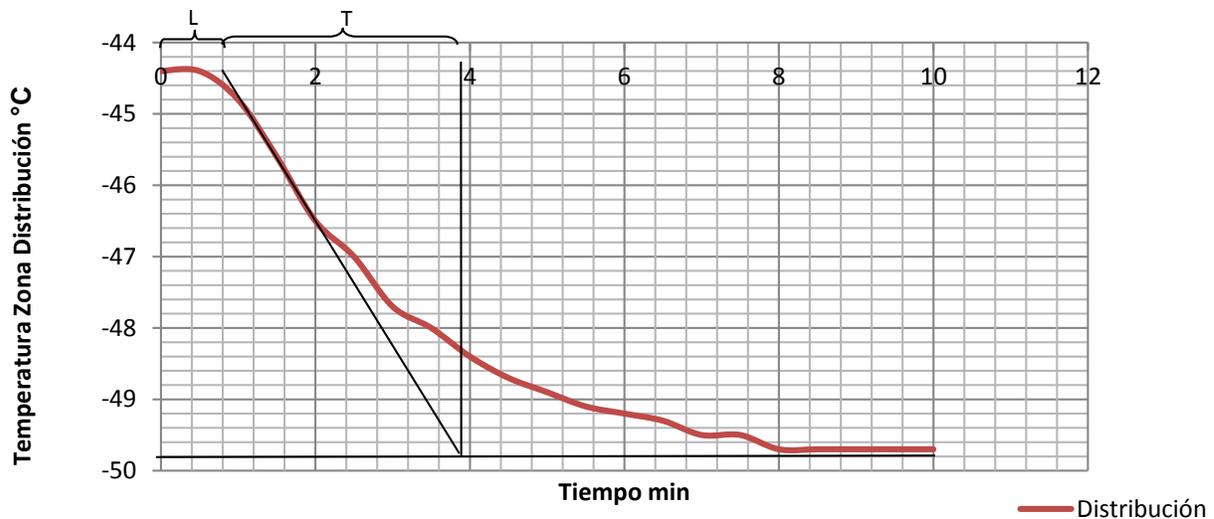


Figura 2.11 Curva en forma de S y Parámetros de Identificación

La función de transferencia de este sistema se aproxima mediante un sistema de primer orden con un retardo de la manera siguiente:

$$\frac{T(s)}{V(s)} = \frac{Ke^{-Ls}}{Ts + 1} \quad (1)$$

Siendo T y L parámetros encontrados de manera gráfica y K siendo la ganancia igual a:

$$K = \frac{\Delta T(t)}{\Delta v(t)} = \frac{-49.7 - -44.4}{60 - 28} = -0.166 \quad (2)$$

Se encontró $L=48$ sec, $T=186$ sec y $K= -0.166$ °C/Hz. Por lo tanto la planta del segundo lazo de control de la propuesta tres puede ser escrito en función de transferencia de la siguiente forma:

$$\frac{T(s)}{V(s)} = \frac{-0.166e^{-48s}}{186s + 1} \quad (3)$$

2.3.1.2 Simulación de la Planta a Lazo Abierto

Con ayuda de Simulink de Matlab se realizó la simulación de la respuesta de la planta a lazo abierto al cambio de la velocidad de los sopladores $v(t)$ del valor de 28Hz a 60Hz. En la Figura 2.12 se observa el diagrama de Simulink en donde se coloca a la Planta a lazo abierto excitada por una entrada tipo escalón $v(t)$ y se obtiene la Temperatura $T(t)$ de la Zona de Distribución que ya había sido llevada a un valor de -44.4°C .

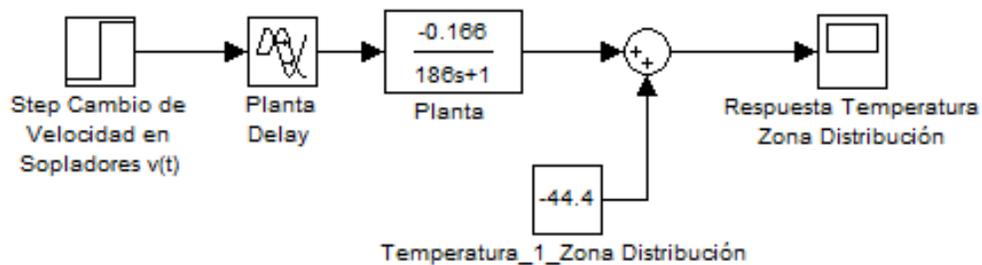


Figura 2.12 Diagrama de Simulink de Excitación de la Planta a Lazo Abierto

En la Figura 2.13 se observa el comportamiento de la planta simulado. Esta gráfica es similar a la encontrada experimentalmente (Ver Figura 2.11) con lo que podemos afirmar que el modelo encontrado si corresponde a la planta del segundo lazo de control.

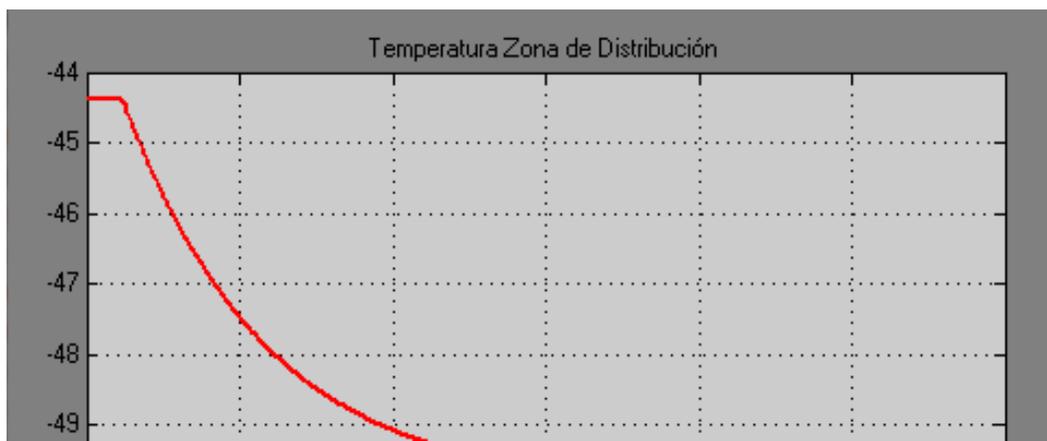




Figura 2.13 Simulación del Comportamiento de la Planta a Lazo Abierto

2.3.1.3 Sintonización del Controlador

De acuerdo a la regla de sintonización de controladores PID ya mencionada, las constantes del controlador se calculan mediante las siguientes relaciones:

$$K_p = 1.2 \frac{T}{L} \quad (4)$$

$$T_i = 2L \quad (5)$$

$$T_d = 0.5L \quad (6)$$

La función de transferencia del Controlador 2 tiene la siguiente forma:

$$G_{c2} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (7)$$

Finalmente la función de transferencia del Controlador 2 es:

$$G_{c2} = 4.65 \left(1 + \frac{1}{96s} + 24s \right) \quad (8)$$

Y siendo $K_p = 4.65$, $K_i = 0.048$ y $K_d = 111.6$

2.3.1.4 Simulación de la Planta controlada con un Control FeedBack PID

En la Figura 2.14 se muestra el diagrama en Simulink del control FeedBack de la Planta. En este diagrama se coloca un setpoint de 50°C y un controlador PID.

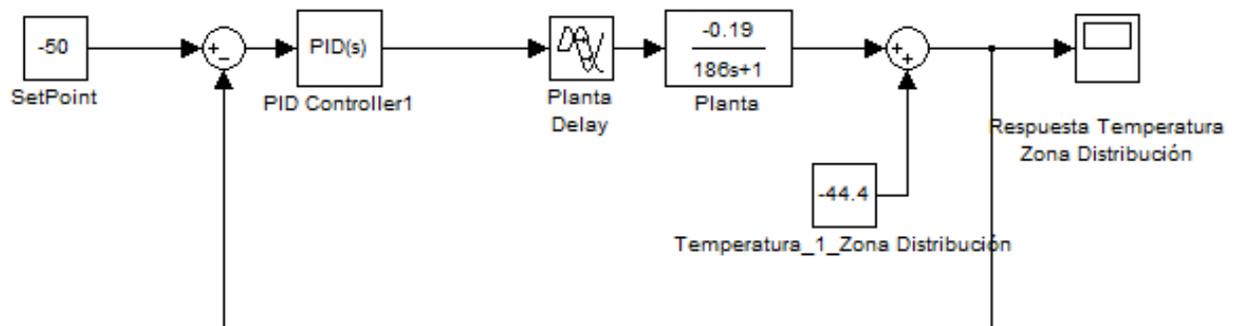


Figura 2.14 Diagrama de Simulink de Control FeedBack de la Planta

La primera sintonización realizada al controlador fue con los valores de las constantes encontrados en el apartado anterior de Sintonización del Controlador por el segundo método de Ziegler-Nichols. El sistema respondió como se muestra en la Figura 2.15

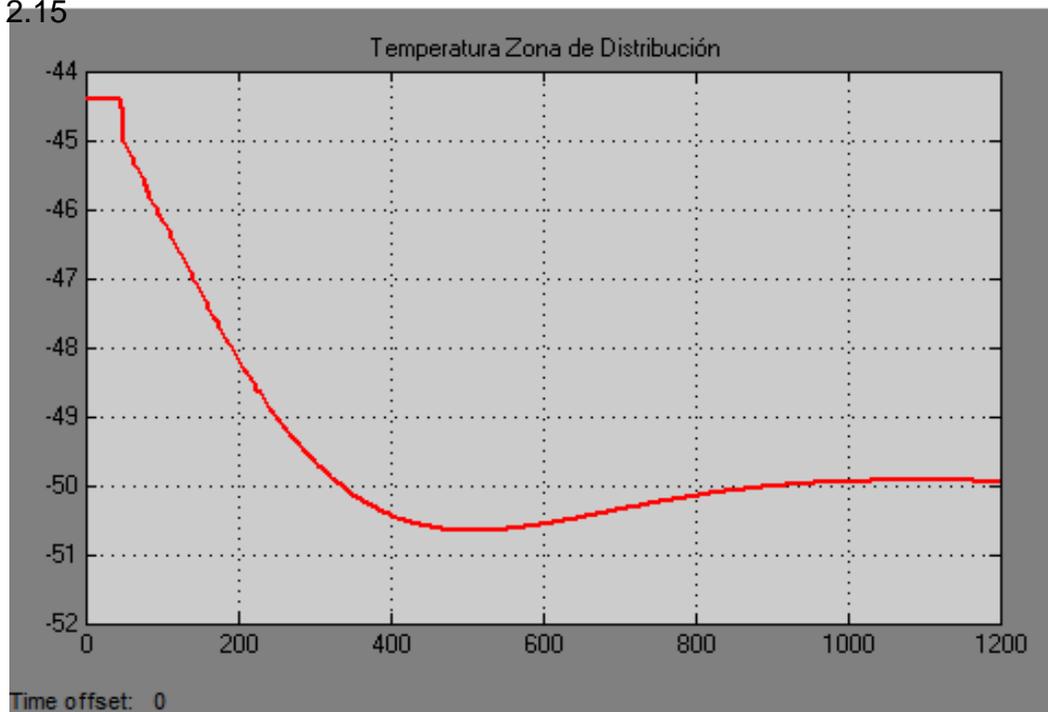


Figura 2.15 Respuesta del Sistema Controlado Sintonizado con las Constantes encontradas con segundo método de Ziegler-Nichols

El Bloque de PID de Matlab cuenta con una herramienta que permite auto sintonizar al controlador. Esta herramienta se utilizó para el ajuste fino del controlador PID.

Las constantes que dio como resultado dicha herramienta fueron: $K_p = 14.13$, $K_i = 0.069$ y $K_d = 121.62$ y la respuesta del sistema controlado se muestra en la Figura 2.16.

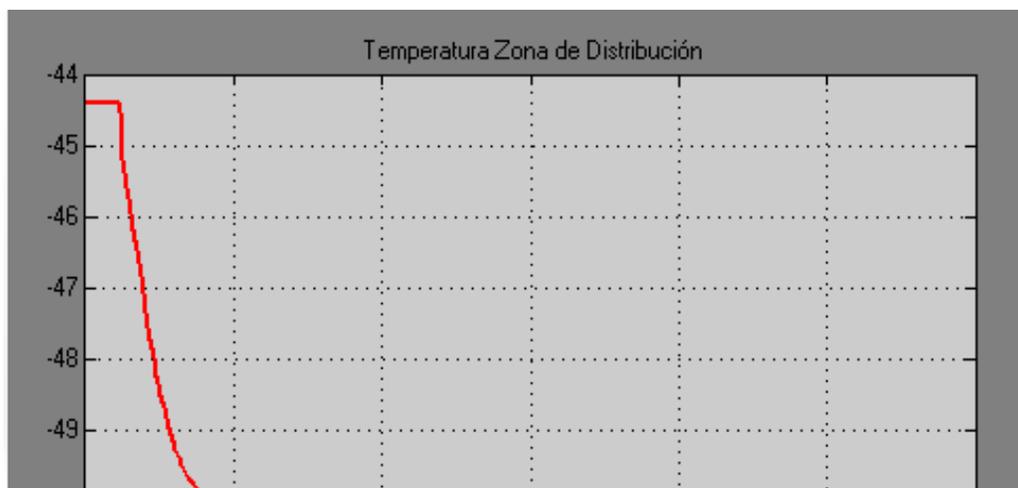




Figura 2.16 Respuesta del Sistema Controlado Sintonizado con las Constantes encontradas con el Auto tune de MatLab

Estas constantes serán utilizadas para que el elemento controlador sea programado de acuerdo a este algoritmo de control PID.

2.3.2 TERCER LAZO DE CONTROL – CONTROLADOR 3

Como se observó en las pruebas experimentales el tercer lazo de control tiene como referencia al valor de SetPoint -10°C con lo que se pretende que no exista fuga en la salida del túnel.

Para lograr lo anterior se debe encender el extractor a una velocidad de 30 Hz en su variador cuando la Temperatura detectada con el SENSOR 3 sea menor a SetPoint -10°C y esperar a que esta Temperatura aumente a un valor mayor al SetPoint -10°C para operar al extractor a su valor de velocidad offset igual a 15 Hz

De esta forma podemos afirmar que nuestro algoritmo de control para este tercer lazo de control es de tipo ON-OFF siendo el estado OFF cuando la velocidad del extractor es igual a 15 Hz y en estado ON cuando la velocidad del extractor es igual a 30 Hz.



CAPÍTULO 3

Desarrollo de la Ingeniería

De acuerdo a las pruebas experimentales realizadas y a la propuesta 3 elegida se enuncian a continuación los requerimientos que debe cumplir el nuevo proyecto de automatización:

- Utilización de un Controlador Lógico Programable.
- Colocación de dos nuevos sensores de temperatura en las zonas descritas en la propuesta 3.
- Implementación de los lazos de control descritos en la propuesta 3 para la variable temperatura sabiendo que en arranque y operación se deben tener los sopladores y extractor en un valor preestablecido; estos valores serán un offset con el que trabajarán estos elementos. ITUMI Instalaciones sugiere el valor 30Hz en el variador para los sopladores y 15Hz en el variador para el extractor. Estas sugerencias están basadas en la experiencia pues en túneles anteriores la velocidad de los sopladores ha sido colocada entre valores de 20 a 40Hz y el extractor entre valores de 10 a 25Hz.

Con estos requerimientos se logrará:

- Arranque automático del equipo.
- Operación automática y manual del equipo.
- Condiciones seguras para los operarios.



3.1 ELEMENTOS DE AUTOMATIZACIÓN

A continuación se enuncian los elementos primarios, de transmisión y control que deben formar parte de la nueva automatización.

3.1.1 ELEMENTOS PRIMARIOS

3.1.1.1 Sensor de Temperatura

Es necesario contar con sensores de temperatura que puedan ser sometidos a valores entre -200 a 50 °C pues se sabe que el Nitrógeno líquido encuentra su temperatura de evaporación a -196°C a una presión de 1 atm y que los productos son congelados a temperaturas bajas que pueden alcanzar los -80°C. Se debe encontrar un sensor cuya respuesta sea lineal en los rangos mencionados.

A continuación se describen diferentes tipos de sensores y su principio de funcionamiento que podrían cubrir con las características requeridas.

Los instrumentos de medición temperatura utilizan diversos fenómenos entre los cuales figuran:

- a) Variaciones en volumen o en estado de los cuerpos (sólidos, líquidos o gases);
- b) Variación de resistencia de un conductor (sondas de resistencia);
- c) Variación de resistencia de un semiconductor (termistores);
- d) f.e.m. creada en la unión de dos metales distintos (termopares);
- e) Intensidad de la radiación total emitida por el cuerpo (pirómetros de radiación);

- f) Otros fenómenos utilizados en laboratorio (velocidad del sonido en un gas, frecuencia de resonancia de un cristal).

De este modo, se emplean los siguientes instrumentos: termómetros de vidrio, termómetros bimetálicos, elementos primarios de bulbo y capilar rellenos de líquido, gas o vapor, termómetros de resistencia, termopares, entre otros [7].

Termómetro de Vidrio

Consta de un depósito de vidrio que contiene, por ejemplo, mercurio y que al calentarse, se expande y sube en el tubo capilar.



Figura 3.1 Termómetro de Vidrio

Los márgenes de trabajo de los fluidos empleados son:

- Mercurio -35 °C hasta +280 °C
- Mercurio (tubo capilar lleno de gas) -35 °C hasta +450 °C
- Pentano -200 °C hasta +20 °C
- Alcohol -110 °C hasta +50 °C
- Tolueno -70 °C hasta +100 °C

Termómetro Bimetálico

Se fundamentan en el distinto coeficiente de dilatación de dos metales diferentes, tales como latón, monel o acero y una aleación de ferroníquel o Invar (35,5% de níquel) laminados conjuntamente. Las láminas bimetálicas pueden ser rectas o curvas, formando espirales o hélices (Figura 3.2)

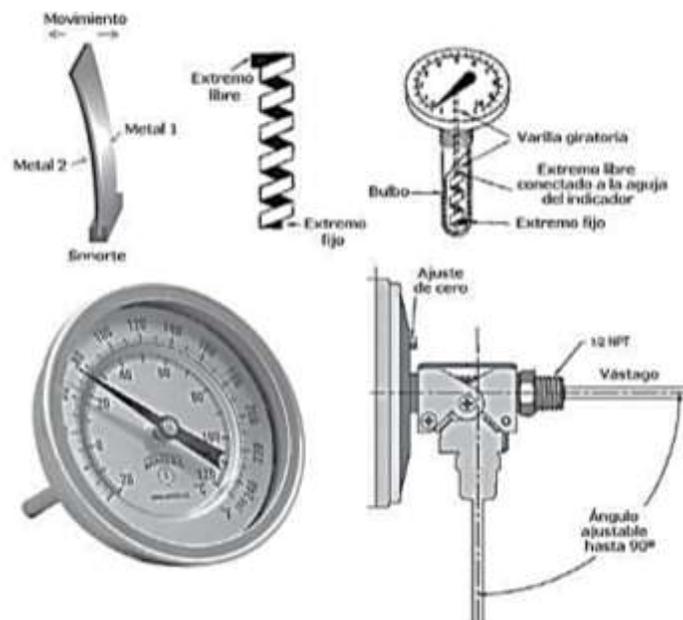


Figura 3.2 Termómetro Bimetálico

Un termómetro bimetálico típico contiene pocas partes móviles, sólo la aguja indicadora sujeta al extremo libre de la espiral o hélice y el propio elemento bimetálico. El eje y el elemento están sostenidos con cojinetes, y el conjunto está construido con precisión para evitar rozamientos. No hay engranajes que exijan un mantenimiento.

El uso de termómetros bimetálicos es admisible para servicio continuo de 0 °C a 400 °C. Para indicación local se usan, preferiblemente, los termómetros bimetálicos de esfera orientable. De este modo, el operario puede leer la temperatura a distancia desde niveles distintos, al de la instalación. La exactitud del instrumento es de $\pm 1\%$ y su campo de medida es de -200 °C a +500 °C.

Termómetros de Bulbo y Capilar

Consisten esencialmente en un bulbo conectado por un capilar a una espiral. Cuando la temperatura del bulbo cambia, el gas o el líquido en el bulbo se expanden y la espiral tiende a desenrollarse, moviendo la aguja sobre la escala para indicar la elevación de la temperatura en el bulbo.

Hay cuatro clases de este tipo de termómetros:

Clase I. Termómetros actuados por líquido.

Tienen el sistema de medición lleno de líquido y, como su dilatación es proporcional a la temperatura, la escala de medición resulta uniforme. Con capilares cortos de hasta 5 m, y para evitar errores debidos a variaciones de la temperatura ambiente, sólo hay que compensar el elemento de medición (Figura 3.3a). En capilares más largos, hay que compensar también el volumen del tubo capilar (Figura 3.3b). La presión dentro del bulbo y el tubo capilar debe ser mayor que la presión de vapor del líquido para evitar la formación de burbujas de vapor. Se utiliza como líquido un hidrocarburo inerte, el xileno (C₈H₁₀) y otros líquidos. El campo de medición de temperaturas varía entre -75 °C y 300 °C, dependiendo del tipo de líquido que se emplee.

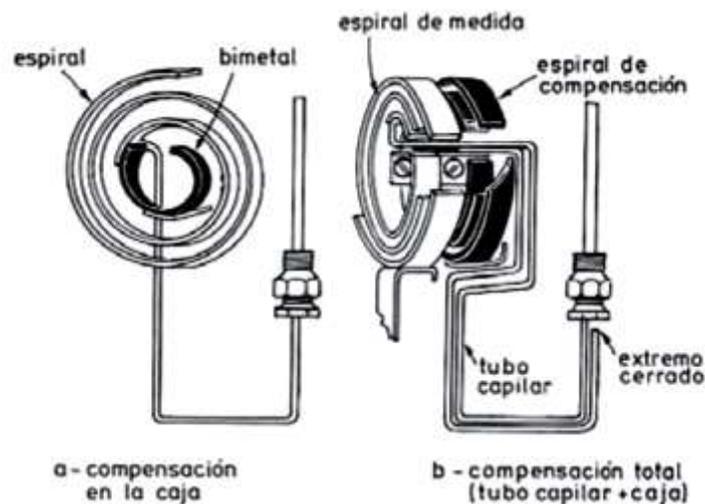


Figura 3.3 Termómetros actuados por líquido

Clase II. Termómetros actuados por vapor

Se basan en el principio de presión de vapor. Contienen un líquido volátil cuya interfase se encuentra en el bulbo. Al subir la temperatura aumenta la presión de vapor del líquido. La escala de medición no es uniforme, sino que las distancias entre divisiones van aumentando hacia la parte más alta de la escala, donde hay mayor sensibilidad. La presión en el sistema solamente depende de la temperatura en el bulbo, por lo que no hay necesidad de compensar la temperatura ambiente.

Dependiendo de la temperatura, los líquidos que se utilizan son cloruro de metilo, anhídrido sulfuroso, butano, propano, hexano, éter metílico, cloruro de etilo, éter etílico, alcohol etílico y clorobenceno.

La velocidad de respuesta es de 1 a 10 segundos. El campo de medición de temperaturas varía entre $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $300\text{ }^{\circ}\text{C}$, dependiendo del tipo de líquido que se emplee.

Clase III. Termómetros actuados por gas

Este tipo de instrumentos están completamente llenos de gas. Al subir la temperatura, la presión de gas aumenta prácticamente de forma proporcional y, por lo tanto, estos termómetros tienen escalas lineales. La presión en el sistema depende, principalmente, de la temperatura del bulbo, pero también de la temperatura del tubo capilar y del elemento de medición, siendo necesario compensar la temperatura del ambiente en el sistema de medición. La constante de tiempo de los termómetros de gas es de 1 a 4 segundos. Se utiliza como gas el nitrógeno, que es inerte y barato. A bajas temperaturas se emplea el helio. El campo de medición de temperaturas varía entre $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $600\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Clase IV. Termómetros actuados por mercurio

Son similares a los termómetros actuados por líquido (Clase I) y se caracterizan por su rápida respuesta, exactitud y potencia de actuación. La presión interna del mercurio varía de 28 bar a bajas temperaturas hasta 80 bar a altas temperaturas, lo que elimina los errores de diferencia de altura entre el bulbo y el tubo Bourdon. El campo de medición de temperaturas varía entre $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $650\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pueden tener compensación en la caja y compensación total.

En la Figura 3.4 podemos observar las figuras correspondientes a los termómetros de acuerdo a su clase.

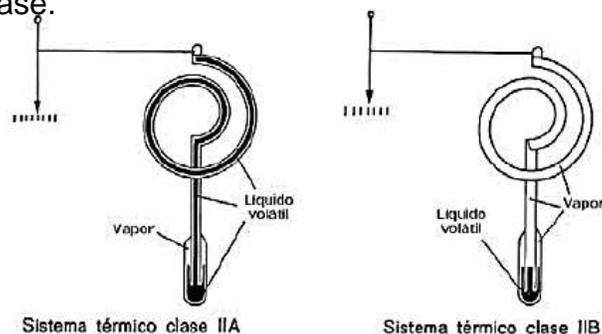




Figura 3.4 Termómetros actuados por vapor

Termómetros por Resistencia Eléctrica

La medida de temperatura que utiliza sondas de resistencia depende de la variación de resistencia eléctrica en función de la temperatura, que es propia del elemento de detección.

El elemento consiste, usualmente, en un arrollamiento de hilo muy fino del conductor adecuado bobinado entre capas de material aislante y protegido con un revestimiento de vidrio o de cerámica.

El material que forma el conductor se caracteriza por el llamado "coeficiente de temperatura de resistencia" que expresa, a una temperatura especificada, la variación de la resistencia en ohmios del conductor por cada grado que cambia su temperatura.

Los materiales que forman el conductor de la resistencia deben poseer las siguientes características:

- Alto coeficiente de temperatura de la resistencia, ya que de este modo el instrumento de medida será muy sensible.
- Alta resistividad, ya que cuanto mayor sea la resistencia a una temperatura dada tanto mayor será la variación por grado (mayor sensibilidad).
- Relación lineal resistencia-temperatura.
- Rigidez y ductilidad, lo que permite realizar los procesos de fabricación de estirado y arrollamiento del conductor en las bobinas de la sonda, a fin de obtener tamaños pequeños (rapidez de respuesta).
- Estabilidad de las características durante la vida útil del material.

En la Figura 3.5 pueden verse las curvas de resistencia relativa de varios metales en función de la temperatura, y en la Tabla 4 se indican sus características (platino, cobre, níquel y níquel-hierro).

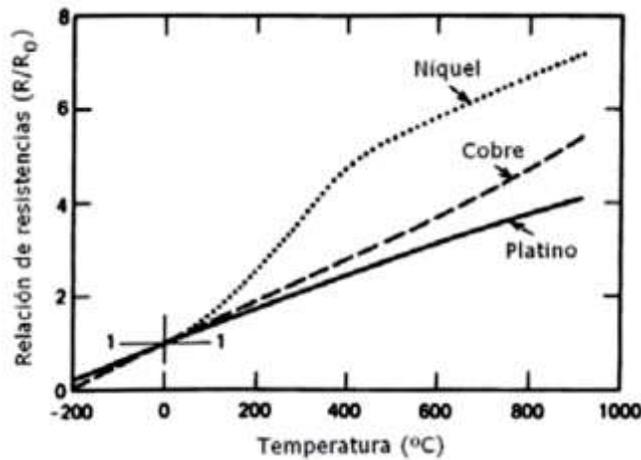


Figura 3.5 Curvas de Resistencia Relativa de varios metales/temperatura

Tabla 4. Características de Sondas de Resistencia

Elemento	Intervalo útil de temperaturas, °C	Resistencia básica	Sensibilidad ($\Omega/^\circ\text{C}$ de 0° a 100°C)	Coefficiente, $\Omega/\Omega \times ^\circ\text{C}$	Ventajas	Desventajas
Platino	-260 a 850 °C (-436 a 1562 °F)	100 Ω a 0 °C 1000 Ω a 0 °C	0,39 3,90	0,0375 a 0,003927	Mayor intervalo Mejor estabilidad Buena linealidad	Coste
Cobre	-100 a 260 °C (-148 a 500 °F)	10 Ω a 25 °C	0,04	0,00427	Buena linealidad	Baja resistividad
Níquel	-100 a 260 °C (-148 a 500 °F)	100 Ω a 0 °C 120 Ω a 0 °C	0,62 0,81	0,00618 a 0,00673	Bajo coste Alta sensibilidad	Falta de linealidad, variaciones de resistencia
Níquel	-100 a 204 °C (-148 a 400 °F)	100 Ω a 70 °F 1000 Ω a 70 °F	7,75 9,58	0,00518 a 0,00527	Bajo coste Muy alta sensibilidad	Muy alta sensibilidad

En general, la sonda de resistencia de platino utilizada en la industria tiene una resistencia de 100 ohmios a 0 °C. Las formas de los elementos de platino son de bobina (Figura 3.6a) y de película metálica de platino (Figura 3.6b). El sensor de película metálica es de tamaño pequeño y responde rápidamente a las variaciones de temperatura.

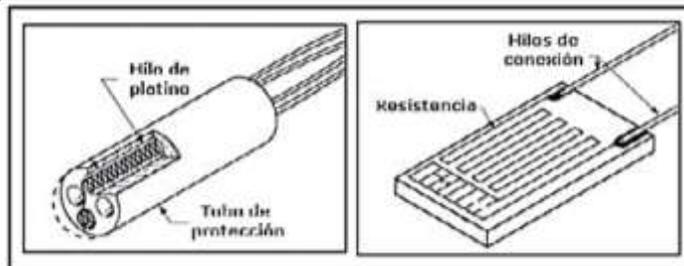


Figura 3.6 Elementos de sondas de resistencia de platino (bobina y sustrato de película metálica)

Las bobinas que llevan arrollado el hilo de resistencia están encapsuladas y situadas dentro de un tubo de protección o vaina de material adecuado al fluido del proceso (acero, acero inoxidable 304, acero inoxidable 316, hastelloy, monel, etcétera). En la Figura 3.8 pueden verse las partes de una sonda de resistencia y en la Figura 3.7 varios tipos de sondas con algunas conexiones al proceso.

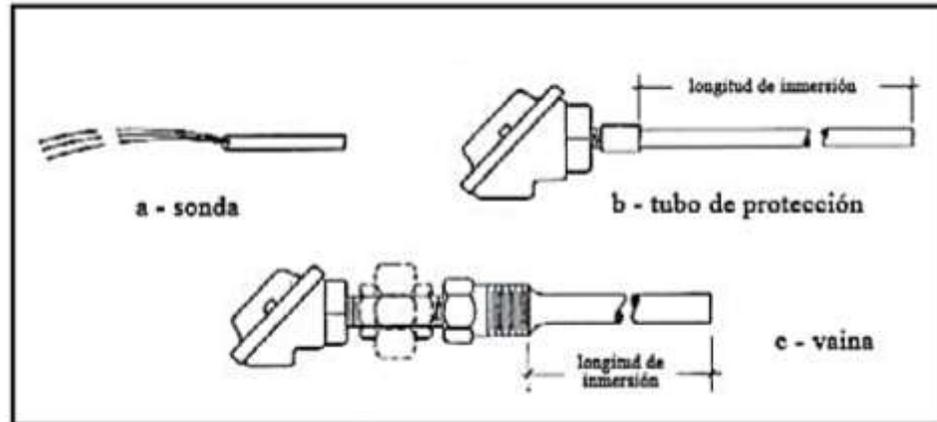


Figura 3.7
de
Sondas y

Tipos

Conexiones

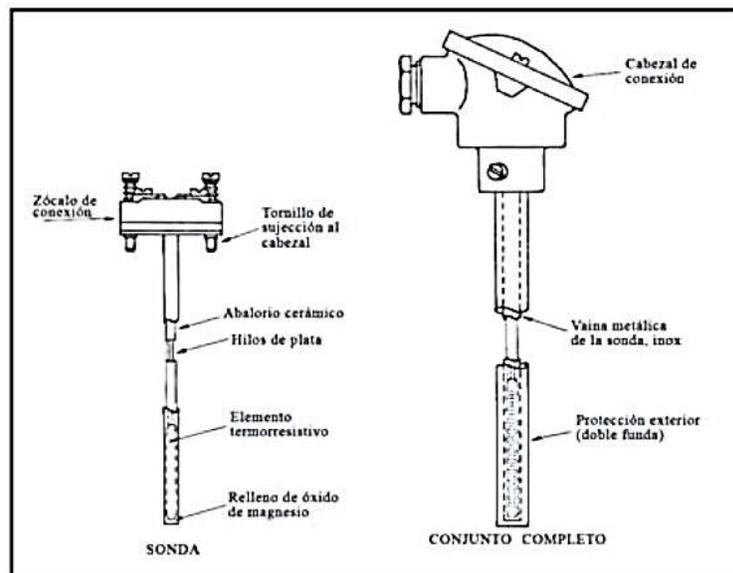


Figura 3.8

La forma
medir la
proceso
sonda de
hacer pasar
por la

Partes de una
Termoresistencia
más simple de
temperatura del
mediante una
resistencia, es
una corriente
sonda lo que

dará lugar a una caída de tensión.

Las sondas de resistencia se conectan a puentes de Wheatstone convencionales o a otros circuitos digitales de medida de resistencia.

Un puente de Wheatstone consiste en un rectángulo formado por resistencias (o capacidades) cuyos extremos opuestos están conectados, uno a una fuente de tensión constante y el otro a un galvanómetro. Cuando por variación de una resistencia (la que está en contacto con el proceso), el galvanómetro detecta corriente nula, se dice que el puente está equilibrado. El puente de Wheatstone está dispuesto en montajes denominados de dos hilos, de tres hilos o de cuatro hilos, según sean los hilos de conexión de la sonda de resistencia al puente.

Montaje a Dos hilos

En el montaje de dos hilos (Figura 3.9), la sonda de resistencia (RTD) se conecta a uno de los brazos del puente y se varía R_2 hasta que se anula la desviación del galvanómetro y se equilibra el puente.

Es el montaje más sencillo, pero presenta el inconveniente de que la resistencia de los hilos a y b de conexión de la sonda al puente varía cuando cambia la temperatura, y esta variación falsea, por lo tanto, la indicación; aunque estos hilos sean de baja resistencia (gran diámetro) y ésta sea conocida, las longitudes que puede haber en campo entre la sonda y el panel donde esté el instrumento receptor añaden una cierta resistencia al brazo de la sonda.

El montaje de dos hilos se emplea, pues, con resistencias moderadas del hilo de conexión y cuando la lectura no necesita ser demasiado exacta.

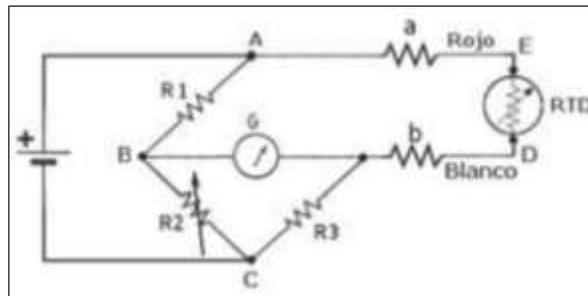


Figura 3.9 Circuito de Puente de Wheatstone para Sonda de Resistencia de Dos hilos
Montaje a Tres hilos

En el montaje de tres hilos (Figura 3.10) la sonda está conectada mediante tres hilos al puente. De este modo, la medida no es afectada por la longitud de los conductores ni por la temperatura, ya que ésta incluye a la vez en dos brazos adyacentes del puente, siendo la única condición que la resistencia de los hilos a y b sea exactamente la misma.

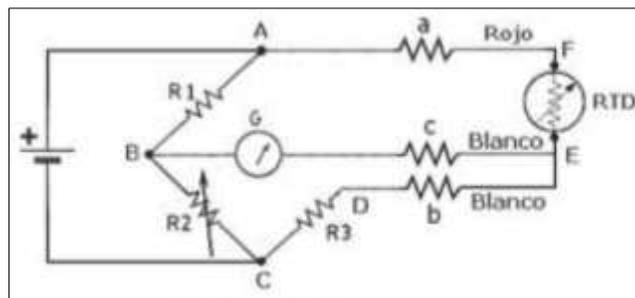


Figura 3.10 Circuito de Puente de Wheatstone para Sonda de Resistencia de Tres hilos
Montaje a Cuatro hilos

En el montaje de cuatro hilos (Figura 3.11) el puente se alimenta con una fuente de corriente constante, de modo que, independientemente de la resistencia de los hilos de conexión, la misma corriente circula por el detector. Las resistencias del puente son elevadas, con lo cual la corriente que circula por los brazos del puente es despreciable y se obtiene la máxima exactitud. El voltímetro indica la resistencia de la sonda y, por lo tanto, la temperatura del proceso.

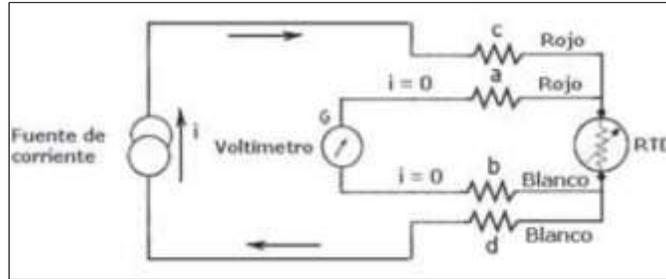


Figura 3.11 Circuito de Puente de Wheatstone para Sonda de Resistencia de Cuatro hilos

Termopares

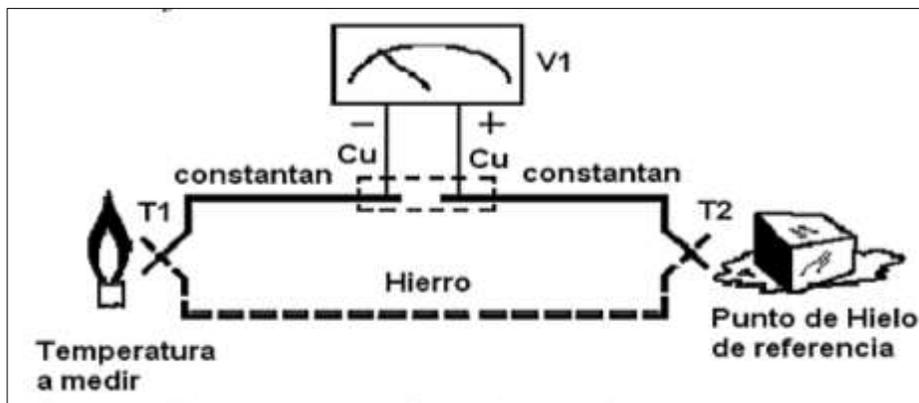
Un termopar es un dispositivo para la medición de la temperatura basado en efectos termoeléctricos. Es un circuito formado por dos conductores de metales diferentes o aleaciones de metales diferentes, unidos en sus extremos y entre cuyas uniones existe una diferencia de temperatura, que origina una fuerza electromotriz.

El principio de funcionamiento de los sensores termoeléctricos se basa en los descubrimientos de Thomas Johann Seebeck (1822), Jean C.A. Peltier (1834) y William Thompson (1847), denominados efecto Seebeck, efecto Peltier y efecto Thompson.

El efecto Seebeck consiste en la aparición de una diferencia de potencial entre dos puntos distintos de un conductor eléctrico que se encuentran de manera simultánea a diferentes temperaturas. En un termopar, el efecto Seebeck se manifiesta por la aparición de una corriente eléctrica que sólo depende de la diferencia de temperaturas entre las uniones.

El efecto Peltier, se fundamenta en el calentamiento o enfriamiento de una unión entre dos metales A y B distintos al pasar corriente por ella. Este efecto, sólo depende del tipo de metal y de la temperatura T_1 y T_2 de las uniones.

En la Figura 3.12 se muestra un termopar constituido por un conductor de hierro y otro de constantán (aleación de cobre y níquel). Cuando las uniones están a temperaturas T_1 y T_2 se produce una tensión V_1 , la cual corresponde a la suma de las caídas de potencial en cada una de las juntas. Por lo tanto, el termopar es básicamente un dispositivo de medida diferencial, se necesita una temperatura de referencia conocida para una de las uniones (normalmente es la del punto de agua/hielo de 0°C), así la temperatura de la otra unión será deducida del voltaje de salida.



Figura

3.12

Termopar con Referencia a Temperatura del Hielo

En el circuito se desarrolla una pequeña tensión continua proporcional a la temperatura de la unión de medida, siempre que haya una diferencia de temperaturas con la unión de referencia. Los valores de esta f.e.m. están tabulados en tablas de conversión con la unión de referencia a 0 °C. En la Figura 3.13 se presentan las curvas características de los termopares, que pueden utilizarse como guía en la selección de los mismos.

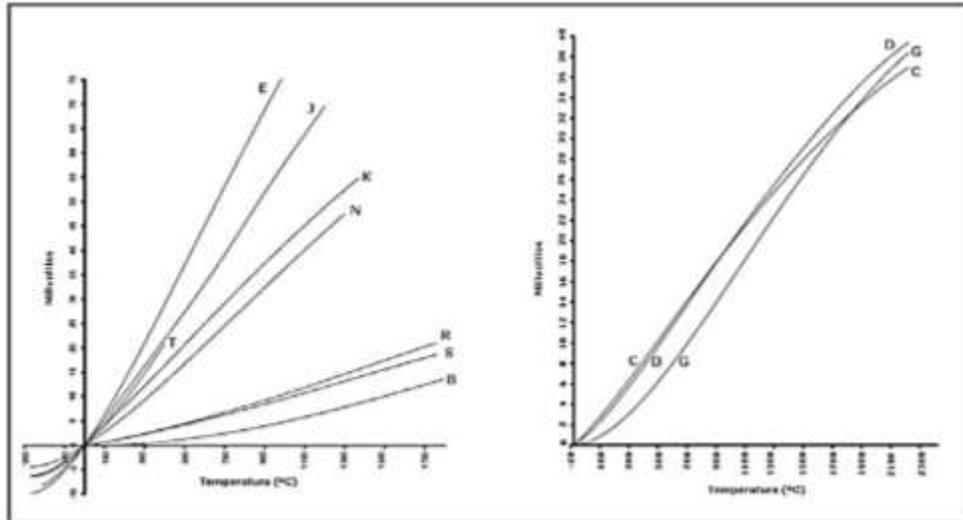


Figura 3.13 Curvas Características fem/temperatura de los termopares

La selección de los alambres para termopares se hace de forma que tengan una resistencia adecuada a la corrosión, a la oxidación, a la reducción y a la cristalización, que desarrollen una f.e.m. relativamente alta, que sean estables, de bajo coste y de baja resistencia eléctrica, y que la relación entre la temperatura y la f.e.m. sea tal que el aumento de ésta sea (aproximadamente) paralelo al aumento de la temperatura.

Los termopares más comunes son:

- Termopar tipo E, de Níquel-Cromo (cromel)/Cobre-Níquel (constantán). Puede usarse en vacío o en atmósfera inerte o medianamente oxidante o reductora. Este termopar posee la f.e.m. más alta por variación de temperatura. Es adecuado para temperaturas entre -200 °C y +900 °C. Alta sensibilidad (68 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$).
- Termopar tipo T, de Cobre/Cobre-Níquel (constantán). Tiene una elevada resistencia a la corrosión por humedad atmosférica o condensación y puede utilizarse en atmósferas oxidantes o reductoras. Se prefiere, generalmente, para las medidas de temperatura entre -200 °C y +260 °C.
- Termopar tipo J, de Hierro/Cobre-Níquel (constantán). Es adecuado en atmósferas inertes y para temperaturas entre -200 °C y 1.200 °C. La oxidación del hilo de hierro aumenta rápidamente por encima de 550 °C, siendo necesario un mayor diámetro del hilo hasta una temperatura límite de 750 °C. También es necesario tomar precauciones a temperaturas inferiores a 0 °C debido a la condensación del agua sobre el hierro.
- Termopar tipo K, de Níquel-Cromo (cromel) /Níquel-Aluminio (alumel). Se recomienda en atmósferas oxidantes y a temperaturas de trabajo entre 500 °C y

1.250° C. No debe ser utilizado en atmósferas reductoras ni sulfurosas, a menos que esté protegido con un tubo de protección. Se utiliza para temperaturas entre -40 °C y 1.100 °C.

- Termopar tipo R (Platino-13% Rodio/Platino). Se emplea en atmósferas oxidantes y temperaturas de trabajo de hasta 1.500 °C. Es más estable y produce una f.e.m. mayor que el tipo S. Poca sensibilidad (10 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$).
- Termopar tipo S (Platino-10% Rodio/Platino), de características similares al tipo R. Poca sensibilidad (10 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$).
- Tipo B (Platino-30% Rodio/Platino-6% Rodio), adecuado para altas temperaturas hasta los 1.800 °C. Poca sensibilidad (10 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$).
- Termopar tipo N (84,6% Níquel-14% Cromo-1,4% Silicio) / (95,6% Níquel-0,4% Silicio). Protegido con aislamiento de óxido de berilio y camisa de molibdeno y de tantalio, se emplea en atmósferas inertes o en vacío a las temperaturas de trabajo de 0 °C a 2316 °C. Se utiliza, cada vez con mayor frecuencia, para sustituir al tipo K, presentando una mejor estabilidad y una mejor resistencia a la oxidación a altas temperaturas.

En la mayoría de ocasiones no es deseable exponer los termopares (o los sensores de temperatura en general) directamente a las condiciones de un proceso. Por ello, se utilizan fundas o vainas de protección para evitar los daños causados por erosión, corrosión, abrasión, y por los procesos de alta presión, en forma parecida a la sonda de resistencia. Las vainas suelen ser de acero inoxidable 316. El sensor debe ajustarse al máximo en la vaina, al objeto de lograr una mínima resistencia a la transferencia de calor y, por lo tanto, una máxima velocidad de transmisión de la temperatura. Incluso en los procesos de captación de temperatura de gases se opta, siempre que sea posible, por tener el sensor en contacto directo con los gases, sirviendo la vaina, exclusivamente, como elemento de protección mecánica.

En la Figura 3.14 pueden verse varios tipos de termopares con tubo de protección. El material del tubo de protección o vaina debe ser el adecuado para el proceso donde se aplica y suele ser de hierro, acero sin soldadura, acero inoxidable, inonel, cerámico, carburo de silicio, etc.

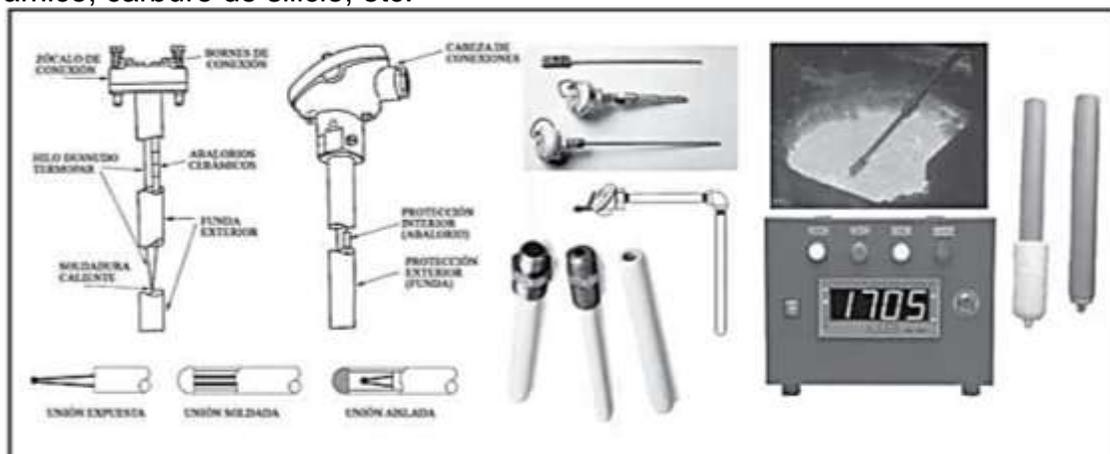


Figura 3.14 Tubos de protección y vainas para termopares

Los valores de tensión en mV de los termopares están referidos en tablas estandarizadas con la unión fría a 0 °C, mientras que las conexiones en panel, o en



campo, son variables y difieren de 0 °C. Por lo tanto, es necesario compensar las variaciones de la temperatura en la unión fría o de referencia del termopar.

En los instrumentos clásicos galvanométricos o potenciométricos, la compensación se realiza mediante una resistencia (resistencia de compensación de la unión fría), que absorbe una tensión equivalente a la f.e.m. que tendría el termopar con la unión caliente a la temperatura de la caja del instrumento y la unión fría a 0 °C. La resistencia varía linealmente con la temperatura y el termopar se caracteriza por una relación temperatura - f.e.m. que no es lineal. Se obtiene así una compensación perfecta en sólo dos puntos, mientras que en los restantes la compensación, si bien no es perfecta, es más que suficiente en la mayor parte de las aplicaciones industriales. Cuando se desea una gran exactitud en la medida, o bien el instrumento no posee una resistencia de compensación interna, es necesario utilizar cajas exteriores de compensación instaladas, generalmente, en proceso y en cuyo interior se encuentra la unión de referencia. Estas cajas pueden ser de temperatura controlada o bien pueden compensar automáticamente las variaciones de temperatura ambiente.

Elección de Sensor de Temperatura

Después de haber analizado los sensores de temperatura antes descritos se decidió utilizar un RTD con sonda de platino del tipo PT100 de resistencia básica de 100 ohm a 0°C de tres hilos. Esta elección es confirmada con el campo de medida mostrado en la Figura 3.15 en donde se aprecia que este sensor puede ser utilizado en un rango de temperatura de -260°C a 850°C.

De acuerdo a la información descrita a cerca de los sensores RTD; este tipo de instrumento cuenta con las características necesarias para poder ser utilizado en el proyecto. El PT100 puede ser utilizado en los rangos de temperatura de operación del túnel brindando una respuesta lineal.

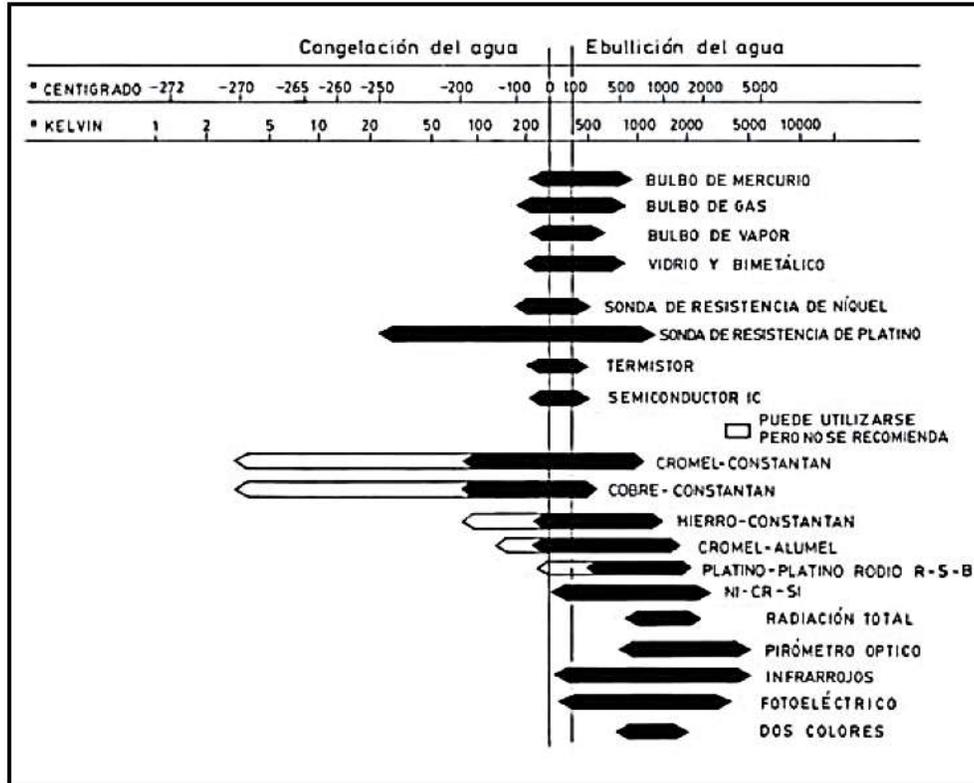


Figura 3.15 Campo de medida de Instrumentos de Temperatura

Esta sonda PT100 será protegida con una vaina que será expuesta en las zonas del túnel ya descritas con anterioridad. Este tipo de sensor deberá ser conectado a un transmisor de temperatura o a tarjetas especiales de controladores lógicos programables que cuentan con entradas analógicas especiales para RTD PT100 de tres hilos.

3.1.1.2 Botones de Paro por Emergencia

Botones tipo hongo de paro por emergencia de la marca G&V Electric de contacto normalmente cerrado con una capacidad máxima de conducción de 10A 400VCA. Se recuerda que se coloca un botón de este tipo en cada esquina del túnel.

3.1.1.3 Interruptores de posición

Interruptores de posición de la marca Allen Bradley No. 801 de propósito general con caja protectora tipo 4 con contacto NC y NA con una capacidad máxima de conducción de 6A 120VCA del contacto NC y 60A 120VCA del contacto NA. Se recuerda que estos interruptores son colocados en la plancha superior y son utilizados para conocer el estado de las puertas.

3.1.2 ELEMENTOS DE TRANSMISIÓN

3.1.2.1 Transductor de corriente a presión

Se cuenta un transductor de presión STD 5000 de la marca Termo Electron Corporation para el funcionamiento de la válvula proporcional. Este elemento cuenta



con una entrada de control estandarizada de 4 a 20mA y una señal de salida de presión de 3 a 15 PSIG y una alimentación de 20 PSIG [8].

3.1.2.2 Variadores de Velocidad

Se deben contar con elementos que nos permitan variar la velocidad de los sopladores y extractor; se utilizarán drives que puedan enlazarse con el elemento controlador para poder realizar el lazo de control correspondiente. ITUMI utiliza variadores de la marca BALDOR de la familia MicroDrive VS1MD de capacidades de 1 y 5 HP [9].

3.1.2.3 Transmisor de Temperatura

Se requiere de un transmisor de temperatura conectado al sensor RTD PT100 que nos permita obtener una señal estandarizada de corriente de 4 a 20 mA para que pueda ser interpretada por el controlador. Este elemento será necesario si no se cuenta con un PLC con entradas especiales para RTD`s.

3.1.3 ELEMENTOS FINALES

3.1.3.1 Válvula Proporcional

Para la inyección de refrigerante se cuenta como elemento final a la válvula proporcional BAUMANN 24577 de 1". Este elemento requiere de una señal de control neumática de 3 a 15 PSIG y $C_v=8.5$ [10].

3.1.3.2 Sopladores

Para la Distribución de refrigerante se cuentan con dos sopladores accionados cada uno por un motor trifásico de inducción con rotor tipo jaula de ardilla de 2 HP de la marca BALDOR además de un extractor accionado por un motor trifásico de inducción con rotor tipo jaula de ardilla de 5 HP de la marca BALDOR. Es posible pensar en cambiar la potencia de estos elementos pues se vería reflejado un cambio en el flujo de refrigerante, sin embargo ITUMI no supone esta opción viable pues considera que se han visto buenos resultados con la potencia de estos elementos y que el problema de distribución de refrigerante radica en el control de la velocidad de los mismos.

3.1.3.3 Ventiladores

Seis Ventiladores accionados cada uno por un motor de rotor tipo jaula de ardilla de 1HP con arranque a tensión plena de la marca BALDOR

3.1.3.4 Banda Transportadora

La banda transportadora es accionada por un motor trifásico de inducción con rotor tipo jaula de ardilla de 1 HP de la marca BALDOR con una velocidad nominal de 1740 rpm y una caja reductora de la marca BLADOR con razón de conversión 50:1. Es importante señalar que el movimiento de la banda con el reductor y el motor no representa un tema de mejora para ITUMI por lo que no es necesaria la búsqueda de nuevos elementos que sean parte de este sistema.

3.1.3.5 Torreta



Torreta de aviso por paro de emergencia de la marca ABB tipo KL70-401R módulo rojo de 24 V CD 5W. Esta torreta será colocada en la parte superior del tablero.

3.1.3.6 Válvula Solenoide

Válvula Solenoide de la marca Magnatrol Valve Corp de dos vías a 220VCA 45 Watts y presión máxima de 200 PSI Normalmente Cerrada, con una entrada y una salida utilizada para permitir o interrumpir el flujo del Nitrógeno hacia la cámara interna del túnel.

3.1.3.7 Lámparas Piloto

Lámparas Piloto a 24V CD de la marca ABB. Estos elementos indicarán que los sopladores, banda transportadora, ventiladores, extractor, y válvula solenoide están en funcionamiento.

3.1.4 ELEMENTO CONTROLADOR

El proyecto debe contar con un controlador programable que cumpla las siguientes características:

- Al menos 8 entradas digitales para conocer el estado de botones de emergencia e interruptores de posición de puertas.
- Al menos 5 salidas digitales para el accionamiento de lámparas indicadoras y de la torreta por paro de emergencia.
- Al menos 3 entradas analógicas de corriente de 4 a 20mA o entradas analógicas especiales para sensores RTD PT100.
- Al menos 4 salidas analógicas para el accionamiento de la válvula y tres drives. Sabemos que el transductor requiere de una señal de corriente de 4 a 20mA para el funcionamiento de la válvula mientras que los drives cuentan con una entrada analógica de 0 a 10V ó 0 a 20mA para el control de la velocidad de los motores.
- Se desea enlazar una interfaz hombre-máquina con el controlador para la interacción con el operador. Esta HMI será montada en el tablero de control.

3.1.4.1 Elección de PLC y HMI

Después de haber analizado los requerimientos para el controlador y haber evaluado distintas marcas y modelos se ha decidido utilizar un PLC Unitronics V570-57-TB20 y un módulo de entradas y salidas de modelo V200-18-E3XB. Estos elementos cubren con las características necesarias para el desarrollo de la automatización además de contar con la autorización de ITUMI Instalaciones quienes ya han trabajado con esta marca de controladores. Las especificaciones generales del PLC V570-57-T20B se enlistan a continuación.

PLC

- Opciones de I/O via módulos de expansión.



- Memoria de Programa: 2MB ; Pantallas: 1MB ; Imágenes: 12MB
- Ciclo de escaneo: 9µsec por 1K de una aplicación típica.
- Más de 20 lazos de control PID con auto sintonización.

HMI

- 5.7" 64K Touchpanel a color.
- Imágenes, texto y gráficas acordes a condiciones en tiempo real e historiales.
- Propiedades "touch" pueden ser asignadas a elementos de texto y gráficas.
- Entrada y modificación de datos por teclado virtual.
- Más de 1024 displays diseñados por el usuario y 500 imágenes por aplicación.
- 255 variables por display; se pueden asociar más de 150 imágenes o mensajes a cada variable
- Pantalla LCD iluminada.
- Librería con cientos de imágenes.
- Teclado virtual

Comunicaciones

- Dos puertos aislados RS232/RS485
- Ethernet via TCP/IP port (opcional)
- GSM/SMS support
- MODBUS (master/slave)
- CANbus y UniCAN
- OPC/DDE server [11].

Las características generales del módulo de I/O **V200-18-E3XB** se enlistan a continuación.

- Entradas Digitales: 18 pnp/npn (24Vcd).
- Entradas de alta velocidad: Dos a 10 kHz pnp/npn.
- Entradas Analógicas: Cuatro entradas aisladas de 14 bits, 0-10V, 0-20mA, 4-20mA. Pueden ser configuradas para entrada de Termopar o PT100 3 hilos (Res 0.1°C).
- Salidas Digitales: 2 pnp/npn (24Vcd) y 15 Relay.
- Salidas de alta velocidad/PWM: Dos a 50 kHz para npn/ 2 kHz para pnp.
- Salidas Analógicas: Cuatro salidas aisladas de 12 bits, 0-10V, 4-20 mA [12].

Este Controlador e Interfaz integrada se programa con ayuda del software libre VisiLogic.



3.1.5 RESUMEN DE LOS ELEMENTOS DE LA AUTOMATIZACIÓN

A continuación se presenta la Tabla 5 en donde se resumen los elementos que se seleccionaron para que formen parte de la nueva automatización.

Tabla 5. Tabla Descriptiva de los Elementos de la Automatización

ELEMENTOS PRIMARIOS			
ELEMENTO	IMAGEN	CARACTERISTICAS	Cantidad
RTD (PT 100)		<ul style="list-style-type: none">• Conexión a 3 Hilos• Rango de Temperatura de: 600°C a -250°C• 100Ω a 0°C• Sensor Protegido con Vaina	3
Botones tipo hongo de paro por emergencia		<ul style="list-style-type: none">• Marca G&V Electric.• De contacto Normalmente cerrado.• Capacidad máxima de conducción de 10A 400VCA	4
Interruptores de final de carrera		<ul style="list-style-type: none">• Marca Allen Bradley No. 801 de propósito general.• Con caja protectora tipo 4 con contacto NC y NA.	4

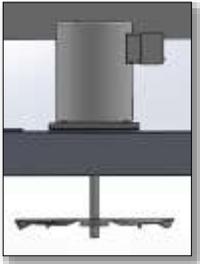


		<ul style="list-style-type: none">• Capacidad de Conducción del Contacto NC de 2.2A, 115V.	
ELEMENTOS DE TRANSMISIÓN			
ELEMENTO	IMAGEN	CARACTERISTICAS	Cantidad
Transductor de presión		<ul style="list-style-type: none">• Transductor de presión STD 5000 de la marca Termo Electron Corporation• Entrada de control estandarizada de 4 a 20mA• Señal de salida de presión de 3 a 15 PSIG• Alimentación neumática de 20 PSIG.	1
Drives		<ul style="list-style-type: none">• Marca BALDOR de la familia Micro Drive VS1MD• Alimentación Trifásica 220VCA	1 de 5HP 2 de 2HP



ELEMENTOS FINALES			
ELEMENTO	IMAGEN	CARACTERISTICAS	Cantidad
Válvula proporcional		<ul style="list-style-type: none">• Marca BAUMANN de EMERSON modelo no. 24577• Señal de control neumática de 3@15 PSIG.• Diámetro de tubería de 1". Cv=8.5• Alimentación Neumática mínima de 20 PSIG	1
Sopladores		<ul style="list-style-type: none">• Motor trifásico de inducción con rotor tipo jaula de ardilla de 2 HP de la Marca BALDOR• Alimentación: 220 VCA	2



Ventiladores		<ul style="list-style-type: none">• Motor trifásico de inducción con rotor tipo jaula de ardilla de 1HP• Marca BALDOR• Alimentación: 220 VCA	6
Banda transportadora		<ul style="list-style-type: none">• Motor trifásico de inducción con rotor tipo jaula de ardilla de 1 HP.• Marca Baldor.• Alimentación: 220 VCA	1
Extractor		<ul style="list-style-type: none">• Motor trifásico de inducción con rotor tipo jaula de ardilla de 5 HP de la• Marca BALDOR• Alimentación: 220 VCA	1



Lámparas Piloto		<ul style="list-style-type: none">• Marca ABB modelo CL-502G• Alimentación: 24V CD• Corriente: 15mA	4
Torreta de aviso		<ul style="list-style-type: none">• Marca ABB tipo KL70-401R• Alimentación 24 V CD• Foco BA 15D de 5W	1
Válvula Solenoide		<ul style="list-style-type: none">• Alimentación a 220 VCA y consumo: 45 Watts• Presión máxima de 200 PSI• Marca Magnatrol• Nmalte. Cerrada	1

ELEMENTOS DE CONTROL

ELEMENTO	IMAGEN	CARACTERISTICAS	Cantidad
----------	--------	-----------------	----------



<p>Controlador Lógico Programable (PLC) Unitronics V570-57-T20B</p>		<p>PLC:</p> <ul style="list-style-type: none">• I/O via módulos de expansión.• Memoria de Programa: 2MB.• Ciclo de escaneo: 9µsec por 1K de una aplicación típica. <p>HMI:</p> <ul style="list-style-type: none">• 5.7" 64K Touchpanel a color.• 255 variables por display. <p>COMUNICACIONES:</p> <ul style="list-style-type: none">• Dos puertos aislados RS232/RS485.• Ethernet via TCP/IP port (optional).• MODBUS (master/slave).• OPC/DDE server.	<p>1</p>
<p>Módulo I/O Unitronics V200-18E3XB</p>		<ul style="list-style-type: none">• 18 Entradas Digitales pnp/npn.• Cuatro Entradas Analógicas de 14bits.• 15 Salidas Digitales Relay y 2 pnp/npn.• Cuatro Salidas Analógicas de 12 bits.	<p>1</p>



3.2 DIAGRAMA DE TUBERÍA E INSTRUMENTACIÓN

En la Figura 3.16 se muestra el Diagrama de Tubería e Instrumentación DTI del equipo con la implementación de la nueva automatización. A continuación se describen las secciones que lo componen.

3.2.1 INYECCIÓN

El equipo cuenta con una tubería de suministro de 1" de diámetro por donde se hará pasar nitrógeno líquido. A la entrada de la tubería se cuenta con el manómetro **PI-001** que medirá la presión a la que entra el nitrógeno líquido con una escala de 0 a 200 PSI, Seguido del primer manómetro se encuentra ubicada una válvula de globo **GOV-001** para cerrar manualmente el flujo del Nitrógeno líquido. Dentro de toda la tubería se cuenta con 3 válvulas de alivio que son: **PSV-001**, **PSV-002**, **PSV-003** para liberar excesos de presión en la línea cuando la presión alcance los 250 PSI. Para realizar la inyección de nitrógeno hacia el Túnel Criogénico **TC-001** está situada una válvula solenoide **XS-001** que puede ser accionada mediante el interruptor manual configurado en la HMI: **HS-001** además de contar con una luz indicadora montada en el Tablero Principal de Control: **IL-003**, mostrando su estado.

Para regular la inyección de Nitrógeno líquido al Túnel, está instalada la válvula de Temperatura **TV-001** que recibe una señal neumática del transductor de Temperatura **FY-001** que a su vez recibe una señal normalizada de 4-20mA del Controlador Indicador Temperatura **TIC-001**; este controlador recibe una señal eléctrica del (RTD PT 100) **TE-001** instalado en la zona de inyección del túnel.

Después de la **TV-001** se encuentra la segunda válvula de globo **GOV-002** con la que se puede cerrar de manera manual la inyección. Para medir la presión de entrada al equipo **TC-001** se tiene el manómetro **PI-002**.

3.2.2 DISTRIBUCIÓN

Para la distribución del Nitrógeno ya en su estado gaseoso se cuentan con seis ventiladores **M1**, **M2**, **M3**, **M4**, **M5**, **M6** los cuales están conectados al Controlador Lógico Programable **PLC-001**, estos pueden funcionar de manera automática o manual mediante el selector manual configurado en la HMI: **HS-002**. De manera automática son activados cuando el operario seleccione el modo de Congelación Automática en la HMI, en modo Automático la activación de los ventiladores la realizará el controlador Lógico Programable **PLC-001**. De manera manual pueden ser manipulados cuando el operario seleccione el modo de Congelación Manual en la HMI, en modo Manual pueden ser activados o desactivados mediante los botones pulsadores configurados en la HMI: **PBA-001** y **PBP-001**, **PBA-002** y **PBP-002**, **PBA-003** y **PBP-003**, **PBA-004** y **PBP-004**, **PBA-005** y **PBP-005**, **PBA-006** y **PBP-006**, Para reconocer si algún ventilador ha dejado de operar por alguna falla técnica se tiene una sola luz indicadora de funcionamiento por los 6 motores montada en Tablero Principal de Control **IL-002**.

Dentro de la distribución del Nitrógeno gaseoso se cuenta con un lazo de control realimentado el cual consta del (RTD PT 100) **TE-002**, que manda una señal eléctrica al elemento Controlador Indicador de Temperatura **TIC-002**; una vez recibida y procesada la señal del sensor de temperatura, el controlador mandará una



señal de control al Drive **SC-002** para poder manipular la velocidad de los motores **M7** y **M8**, además de contar con una luz indicadora de funcionamiento **IL-004** por los dos motores montada en el Tablero Principal de Control.

3.2.3 EXTRACCIÓN

Para realizar la extracción del exceso de Nitrógeno gaseoso se cuenta con el lazo de control realimentado conformado por el (RTD PT 100) **TE-003** que manda una señal al Controlador Indicador de Temperatura **TIC-003**, la señal que recibe este controlador es procesada y en base a su algoritmo de control manda una señal eléctrica hacia el Drive **SC-002** para poder manipular la velocidad del Extractor **M9** además de contar con una luz indicadora **IL-005** montada en el Tablero Principal de Control.

Para poder mover la banda transportadora que permitirá circular todo el producto a través del túnel criogénico se cuenta con el Motor **M10**. El operario insertara un valor en Hz en el Selector de Velocidad **HSC-001**, este valor en Hz será leído por el Controlador Lógico Programable **PLC-001**, una vez procesada la instrucción el controlador mandara una señal hacia el Drive **SC-001** el cual manipulara la velocidad del motor **M10**.

3.3 CIRCUITO DE FUERZA

A continuación se describe el circuito de fuerza del equipo y la elección de los dispositivos que lo constituyen. Los elementos que deben ser alimentados son los siguientes:

- Seis motores de 1HP arrancados a tensión plena que activan a los ventiladores
- Dos drive VS1MD25 para el ajuste de velocidad del extractor de 5 HP y de dos sopladores de 2HP cada uno.
- Un drive VS1MD21 para el ajuste de velocidad de la banda transportadora accionada por un motor de 1 HP.
- Una fuente de corriente directa de 24 VDC 2A.

3.3.1 DIAGRAMA ELÉCTRICO



En el diagrama mostrado en la Figura 3.17 se observan los elementos que componen al circuito de alimentación del equipo. El circuito fue realizado con simbología americana.



3.3.2 CÁLCULO DE CORRIENTE ELÉCTRICA

Para poder elegir los elementos que forman parte de cada una de las ramas del circuito es necesario conocer al valor de la corriente eléctrica que consume cada una de ellas.

3.3.2.1 Motores

Para determinar la corriente nominal de este tipo de carga inductiva y de acuerdo al tipo de sistema eléctrico de corriente alterna a tres fases se utiliza la siguiente expresión:

$$I = \frac{HP \times 746}{\sqrt{3} \times V \times n \times F.P.} \quad (9)$$

Dónde:

- (HP) = Caballos de fuerza o potencia del motor
- kW = Potencia en kilowatt
- V = Tensión nominal del sistema en Volts
- n = Eficiencia del motor
- F.P. = Factor de potencia

En la Tabla 6 se muestra el cálculo de la corriente nominal de la carga para un Motor trifásico de rotor tipo jaula de ardilla de la marca BALDOR con número de serie VWDM3546 con las siguientes características obtenidas de su placa de datos:

- Potencia: **1HP**
- Voltaje: **220 VCA**
- Número de Fases: **3**
- RPM: **1740**
- Factor de Potencia: **74%**
- n= Eficiencia del Motor: **82.5%**

Tabla 6. Cálculo de la corriente nominal de un Motor 1HP.



CORRIENTE NOMINAL DE LA CARGA				
HP	Watts	F.P.	n	Corriente $I = \frac{W}{\sqrt{3}(V)(F.P.)(n)}$
1hp	746Watts	0.74	0.825	$I = \frac{746Watts}{(\sqrt{3})(220vca)(0.74)(0.82)}$ $I = 3.22A$

La corriente nominal de la carga que circulara por el conductor será de **3.22A**.

$$I = 3.22A$$

Por efectos de seguridad se debe de calcular la Corriente de Protección (I_p) para ello se empleara la siguiente formula:

$$I_p = I * 1.25 \quad (10)$$

Dónde:

- I: Corriente Nominal
- 1.25: Factor de protección del 25%

Aplicando el Factor de protección:

$$I_p = 4.025A$$

En la Tabla 7 se muestra el cálculo de la corriente nominal de la carga para un Motor trifásico de rotor tipo jaula de ardilla de la marca BALDOR con número de serie VWDM3558 con las siguientes características obtenidas de su placa de datos:

- Potencia: **2HP**
- Voltaje: **220 VCA**
- Número de Fases: **3**
- RPM: **1735**
- Factor de Potencia: **76%**
- n= Eficiencia del Motor: **82.5%**

Tabla 7. Cálculo de la corriente nominal de la carga

CORRIENTE NOMINAL DE LA CARGA				
HP	Watts	F.P.	n	Corriente $I = \frac{Watts}{\sqrt{3}(V)(F.P.)(n)}$
2hp	1492 Watts	0.76	0.825	$I = \frac{1492Watts}{(\sqrt{3})(220vca)(0.76)(0.825)}$



				$I = 6.24 A$
--	--	--	--	--------------

La corriente nominal de la carga que circulara por el conductor será de **6.24A**

$$I = 6.24A$$

Por efectos de seguridad se debe de calcular la Corriente de Protección (I_p) para ello se empleara la siguiente formula:

$$I_p = I * 1.25 \tag{10}$$

Dónde:

- I: Corriente Nominal
- 1.25: Factor de protección del 25%

Aplicando el Factor de protección:

$$I_p = 7.80A$$

En la Tabla 8 se muestra el cálculo de la corriente nominal de la carga para un Motor trifásico de rotor tipo jaula de ardilla de la marca BALDOR con número de serie VWDM3615T con las siguientes características obtenidas de su placa de datos:

- Potencia: **5HP**
- Voltaje: **220 VCA**
- Número de Fases: **3**
- RPM: **1745**
- Factor de Potencia: **78%**
- n= Eficiencia del Motor: **87.5%**

Tabla 8. Cálculo de la corriente nominal de la carga

CORRIENTE NOMINAL DE LA CARGA				
HP	Watts	F.P.	n	Corriente Watts $I = \frac{\text{Watts}}{\sqrt{3} (V)(F.P.)(n)}$
5hp	3730 Watts	0.78	0.875	$I = \frac{3730Watts}{(\sqrt{3})(220vca)(0.78)(0.874)}$ $I = 14.34 A$

La corriente nominal de la carga que circulara por el conductor será de **14.34A.**

$$I = 14.34 A$$

Por efectos de seguridad se debe de calcular la Corriente de Protección (I_p) para ello se empleara la siguiente fórmula:

$$I_p = I * 1.25 \tag{10}$$

Dónde:

- I: Corriente Nominal
- 1.25: Factor de protección del 25%



Aplicando el Factor de protección:

$$I_p = 17.92 A$$

3.3.2.2 Fuente de Alimentación

Se contará con una fuente de alimentación de Corriente Directa de la marca WeidMuller para alimentar al PLC con las siguientes características:

- Voltaje de alimentación: **220 V C.A.**
- Voltaje de salida: **24V C.D.**
- Potencia: **48 Watts.**
- Corriente máxima de salida: **2A**

Estas características cumplen con los requerimientos del circuito de control descrito en el subtítulo 6 CIRCUITO DE CONTROL.

En la Tabla 9 se muestra el cálculo de la Corriente Nominal de la Fuente de Alimentación:

Tabla 9. Corriente Nominal de la Fuente de Alimentación.

Corriente Nominal de Consumo de la Fuente de Alimentación		
Voltaje	Potencia	$I = \frac{Watts}{V CA}$
220 VCA	48 Watts	0.21 A

Se obtuvo una Corriente Nominal de **0.21 A**.

Para la elección de diferentes elementos se debe de calcular la Corriente de Protección (I_p). Para ello se empleara la siguiente formula:

$$I_p = I * 1.25 \tag{10}$$

Dónde:

- I: Corriente Nominal
- 1.25: Factor de protección del 25%

Aplicando el Factor de protección:

$$I_p = 0.262 A$$

3.3.3 SELECCIÓN DE CONTACTORES, PROTECCIONES Y CALIBRE DE CONDUCTORES PARA LOS MOTORES ARRANCADOS A TENSIÓN PLENA



Para los motores arrancados y operados a tensión plena se utilizan todos los dispositivos que sugiere la Norma Oficial Mexicana NOM 001 de Instalaciones Eléctricas en su Artículo 430 Motores, circuitos de motores y sus controladores [14].

3.3.3.1 Selección de Interruptores de Seguridad

Tomando como referencia la corriente de protección se seleccionó un interruptor termomagnético capaz de soportar una corriente de 5A. El modelo seleccionado es el S203U-K5 de la marca ABB que cuenta con las siguientes características:

- Número de Polos: 3
- Capacidad de Corriente: 5 A
- Voltaje: 220VCA
- Montaje: En riel DIN

3.3.3.2 Selección de Fusibles

Teniendo en cuenta la corriente de protección se eligieron fusibles tipo americano de fusión rápida que cuentan con las siguientes características:

- Soporta corrientes de hasta 5 A
- Voltaje a 250 VAC
- 6 mm de diámetro por 32 mm de largo

3.3.3.3 Selección de Relevadores Contactores

Se escogió al relevador contactor de la marca SIEMENS Sirius 3RT1015-1AP61 con las siguientes características:

- Montaje por tornillos y sobre riel DIN normalizado de 35 mm, accionamiento AC y DC.
- Máxima tensión asignada de servicio U_e : 690 V
- Corriente máxima asignada de servicio a 220V: 10 A
- Consumo de potencia bobina: Conexión: 27 (AC) VA Retención: 4.6 (AC) VA
- Contactos NA/ Para contactos auxiliares / Conmutación Instantánea: 1
- Ancho de montaje: 45mm
- Duración de servicio mecánico: 30 Millones de ciclos de maniobras

Estos dispositivos pueden ser utilizados en el arranque de los motores pues soportan una corriente de máxima de 10 A y cada motor consume 3.22 A.

3.3.3.4 Selección de Relevadores Térmicos de Sobrecarga

Se escogió al relevador térmico de sobrecarga de la marca SIEMENS Sirius 3RU1116-1FB0 que cuenta con las siguientes características:

- Contactos Auxiliares: 1 NO + 1 NC
- Respuesta a la Corriente Ajustable de 3.5 a 5 A
- Indicador de Posición de conmutación
- Manual/Automático RESET
- Función TEST



- Botón de STOP
- Sensibilidad a falla de fase
- Cubierta sellada integrada
- Pueden ser montados con relevadores contactores 3RT1.

Este dispositivo puede ser utilizado cuando exista una corriente de sobrecarga en los motores igual a 4.03 A que es del 25% de la corriente nominal.

3.3.3.5 Selección de Calibre de Conductores

En base al cálculo de la corriente protección se seleccionó el cable calibre 14 AWG [13].

El tipo de aislamiento seleccionado es el termoplástico a prueba de humedad TW [15] debido a que dentro de la zona de operación del Túnel Criogénico se concentraran bajas temperaturas provocando con ello la existencia de humedad, por tal motivo se seleccionó el aislamiento TW, ya que favorece la conducción de la corriente eléctrica a pesar de presentarse humedad en el ambiente.

Finalmente se usará el siguiente conductor:

- Calibre de conductor para Motor 1HP: Cable 14 AWG aislamiento TW.

3.3.4 SELECCIÓN DE PROTECCIONES Y CALIBRE DE CONDUCTORES PARA LOS MOTORES OPERADOS CON DRIVE

Para los motores operados con drive se siguen las sugerencias brindadas por el fabricante BALDOR en el manual de operación VS1MD User Manual en su Capítulo 4 Power Wiring [16].

Como se puede observar en el diagrama de la Figura 3.11 se utilizan dos drive con capacidad de 5HP cuyo modelo es el VS1MD25 y un drive con capacidad de 1HP de modelo VS1MD21.

3.3.4.1 Selección de Interruptores de Seguridad

Para este tipo de drives es necesario contar con dispositivos periféricos externos para su buen funcionamiento [17]. En este caso solo se hará uso de un interruptor termomagnético de protección.

En la Tabla 10 se recomienda el Amperaje del Breaker en base al modelo del drive [18].

Tabla 10. Valores de Corriente de Breaker en base al modelo del Drive



Model	Breaker		Model	Breaker	
	Current[A]	Voltage[V]		Current[A]	Voltage[V]
<u>VS1MD20P5</u>	30	230	VS1MD40P5	30	460
VS1MD21	30	230	VS1MD41	30	460
<u>VS1MD22</u>	30	230	VS1MD42	30	460
VS1MD23	30	230	VS1MD43	30	460
VS1MD25	30	230	VS1MD45	30	460
VS1MD27	50	230	VS1MD47	30	460
VS1MD10	60	230	VS1MD410	30	460

Para el modelo VS1MD25 el manual de usuario recomienda un Breaker de 30A para un voltaje de 230 VCA

Para el modelo VS1MD21 el manual de usuario recomienda un Breaker de 30A para un voltaje de 230 VCA

El modelo seleccionado para un valor de corriente de 30 A es el S203U-K30 de la marca ABB. A continuación se presenta sus características:

- Modelo: S203U-K30
- Número de Polos: 3
- Capacidad de Corriente: 30 A
- Voltaje: 220VCA
- Montaje: En riel DIN

3.3.4.2 Selección de Calibre de Conductores

En la Tabla 11 se sugiere el calibre de conductor para alimentar al drive (R,S,T) y para conectar el motor (U,V,W) según el modelo [19] [20].

Tabla 11. Calibres de conductor en base al modelo de Drive Baldor



Model Number	R, S, T wire size		U, V, W wire size		Ground Wire		Screw size	Terminal torque
	mm ²	AWG	mm ²	AWG	mm ²	AWG	Terminal Screw Size	Screw Torque (Kgf.cm/lb-in)
VS1MD20P5	2	14	2	14	3.5	12	M3.5	10/8.7
VS1MD21	2	14	2	14	3.5	12	M3.5	10/8.7
VS1MD22	2	14	2	14	3.5	12	M3.5	10/8.7
VS1MD23	2	14	2	14	3.5	12	M4	15/13
VS1MD25	3.5	12	3.5	12	3.5	12	M4	15/13
VS1MD27	5.5	10	5.5	10	5.5	10	M5	32/28
VS1MD10	8	8	8	8	5.5	10	M5	32/28
VS1MD40P5	2	14	2	14	2	14	M3.5	10/8.7
VS1MD41	2	14	2	14	2	14	M3.5	10/8.7
VS1MD42	2	14	2	14	2	14	M4	15/13
VS1MD43	2	14	2	14	2	14	M4	15/13
VS1MD45	2	14	2	14	2	14	M4	15/13
VS1MD47	3.5	12	2	14	3.5	12	M5	32/28
VS1MD410	3.5	12	3.5	12	3.5	12	M5	32/28

En base a la Tabla se seleccionó el calibre 14 AWG para el Drive de 1HP y el calibre 12 AWG para los Drives de 5HP.

El tipo de aislamiento seleccionado es el termoplástico a prueba de humedad TW [15].

Finalmente se usarán los siguientes conductores:

- Calibre conductor para Drive de 2HP: Cable 14 AWG aislamiento TW
- Calibre conductor para Drives de 5HP: Cable 12 AWG aislamiento TW

3.3.5 SELECCIÓN DE PROTECCIONES Y CALIBRE DE CONDUCTORES PARA LA FUENTE DE ALIMENTACIÓN.

3.3.5.1 Selección de Interruptor Termomagnético

Con el valor de corriente de protección se buscó un Breaker que soporte esta capacidad de conducción de corriente; además se tomó en cuenta el dato de consumo de corriente máxima a plena carga de 500mA brindado por el fabricante en la hoja de datos [21].



El protector seleccionado es el modelo S202U-K0.5 de la marca ABB que cuenta con las siguientes características:

- Modelo: S203U-K0.5
- Número de Polos: 2
- Capacidad de Corriente: 0.5 A
- Voltaje: 220VCA

3.3.5.2 Selección de Calibre de Conductor

En base al cálculo de la corriente de protección de la fuente de alimentación se seleccionó el calibre 14 AWG [13].

El tipo de aislamiento seleccionado es el termoplástico a prueba de humedad TW [15].

Finalmente se usará el siguiente conductor:

- Calibre conductor para Fuente de Alimentación C.D: Cable 14 AWG aislamiento TW

3.3.6 SELECCIÓN DE INTERRUPTOR MANUAL GENERAL, PROTECCION GENERAL Y CALIBRE DE CONDUCTORES

Estos elementos fueron elegidos teniendo en cuenta la corriente total que consume el circuito; este valor es la suma de la corriente de protección de todas las ramas:

- Corriente de Seis Motores de 1 HP Arrancados a Tensión Plena: 24.15 A
- Corriente de Un Motor de 1 HP operado con Drive: 4.025 A
- Corriente de Un Motor de 5 HP operado con Drive: 17.92 A
- Corriente de Dos Motores de 2 HP operados con Drive: 15.6 A
- Corriente de Fuente de Alimentación 24 V CD 2 A: 262 mA
- Corriente de Bobinas de Relevadores Contactores y Válvula Solenoide: 940 mA

La corriente total de protección es de 62.89 A.

3.3.6.1 Interruptor Manual General

Se eligió el interruptor seccionador de la marca ABB OT63FT3 con las siguientes características:

- Operación manual giratorio



- Tres Polos
- Montaje Frontal
- Corriente Máxima de empleo 63 A
- Tensión Máxima de empleo hasta 690 VAC

3.3.6.2 Interruptor Termomagnético General

Se eligió un interruptor termomagnético de 63 A de la marca ABB S203U-K63 con las siguientes características:

- Número de Polos: 3
- Corriente: 63 A
- Voltaje: 240 V AC
- Montaje por riel DIN

3.3.6.3 Calibre de Conductor eléctrico

De acuerdo al cálculo de la corriente de protección total se seleccionó el calibre 8 AWG [13].

El tipo de aislamiento seleccionado es el termoplástico a prueba de humedad TW [15].

Finalmente se usará el siguiente conductor:

- Calibre conductor: Cable 8 AWG aislamiento TW.

3.4 CIRCUITO DE CONTROL

A continuación se describe el circuito de control del equipo. En los siguientes apartados se presentan los diagramas eléctricos de conexión de los elementos de la automatización con el controlador lógico programable UNITRONICS V570-57-T20B y el módulo de I/O V200-18E3XB. Estos diagramas cumplen con las especificaciones de conexión de las hojas de datos del módulo V200-18E3XB [12].

3.4.1 SALIDAS DIGITALES

De acuerdo al apartado de salidas digitales de la hoja de datos del V200-18E3XB [22] se cuentan con dos bloques o slots de salidas a relevador.

3.4.1.1 Elementos del Primer Bloque de Salidas a Relevador

En este bloque se conectan los siguientes elementos:

- Cinco lámparas piloto de 3W a 24 VCD
- Una torreta con bombilla de 5 W a 24VCD

3.4.1.2 Circuito eléctrico del Primer Bloque de Salidas a Relevador

En la Figura 3.18 se observa como son conectados los elementos al controlador en el slot que corresponde de la salida dos a la salida siete que comparten una señal común.

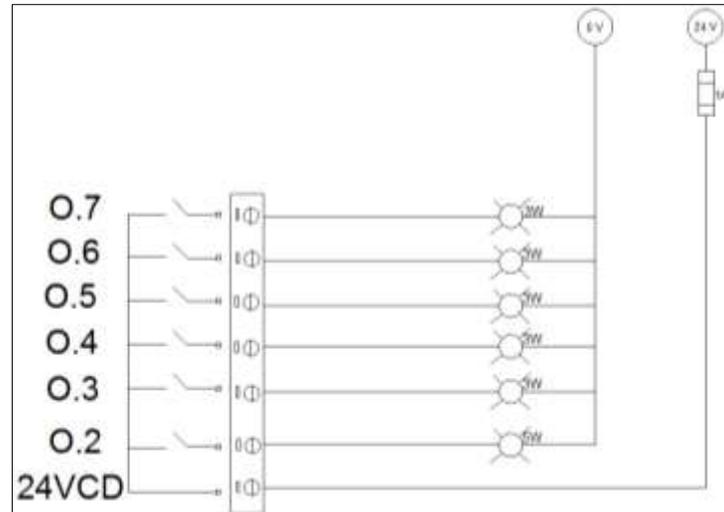


Figura 3.18 Primer bloque de salidas a relevador

3.4.1.3 Selección de Fusible

Estas salidas del controlador deben de contar con un elemento protector. Este circuito consume a plena carga 0. 833 A por lo que se eligió utilizar un fusible tipo americano de fusión rápida de 1 A de capacidad de corriente.

3.4.1.4 Elementos del Segundo Bloque de Salidas a Relevador

En este bloque se conectan los siguientes elementos:

- Seis bobinas de los relevadores contactores con consumo por bobina de 27 (AC) VA a la conexión y 4.6 (AC) VA a la retención a 220 VCA
- Una válvula solenoide con consumo de 45 Watts a 220 VCA

3.4.1.5 Circuito eléctrico del Segundo Bloque de Salidas a Relevador

En la Figura 3.19 se observa como son conectados estos elementos al controlador en el slot que corresponde de la salida ocho a la salida dieciséis que comparten una señal común. Se puede apreciar que después de cada bobina de los relevadores contactores se conecta en serie a un contacto normalmente cerrado de los relevadores de sobrecarga.

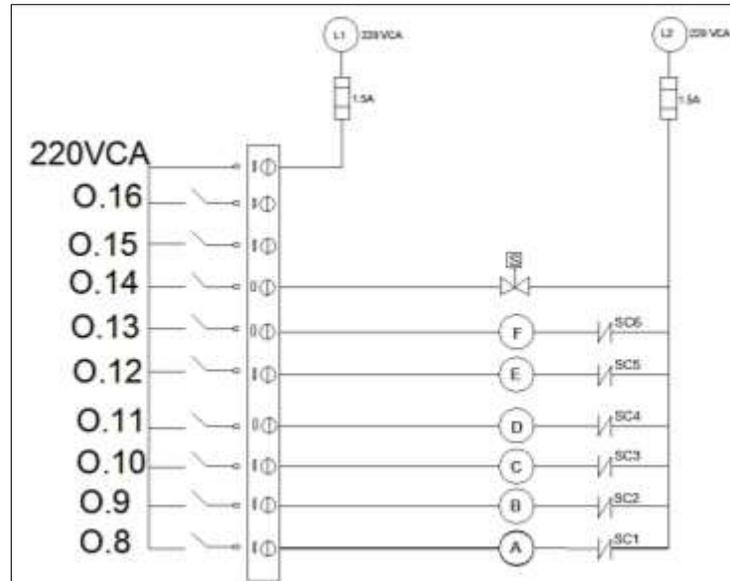


Figura 3.19 Segundo bloque de salidas a relevador Selección de fusible

3.4.1.6

Estas salidas del controlador deben de contar con un elemento protector. Este circuito consume a plena carga 0.940 A a la conexión por lo que se eligió utilizar un fusible de 1.5 A tipo americano de fusión rápida.

3.4.2 ENTRADAS DIGITALES

De acuerdo al apartado de entradas digitales de la hoja de datos del V200-18E3XB, [23] se cuentan con dos bloques de nueve entradas que pueden ser configurados como entradas a transistor PNP o NPN.

La configuración de entrada seleccionada es PNP cuyo valor de entrada de 0-5VCD determina un 0 lógico y de 17-28.8VCD determina un 1 lógico [24].

3.4.2.1 Elementos de Entradas Digitales

A continuación se describen los elementos físicos que forman el diagrama eléctrico de las Entradas Digitales:

- Cuatro botones de tipo hongo de paro por emergencia de contacto normalmente cerrado.
- Cuatro Interruptores de posición configurados para contacto normalmente cerrado.

3.4.2.2 Circuito Eléctrico de Entradas Digitales

En el circuito que se presenta en la Figura 3.20 se muestra como se deben conectar los elementos físicos mencionados anteriormente en el slot correspondiente en una configuración de entrada tipo transistor PNP.

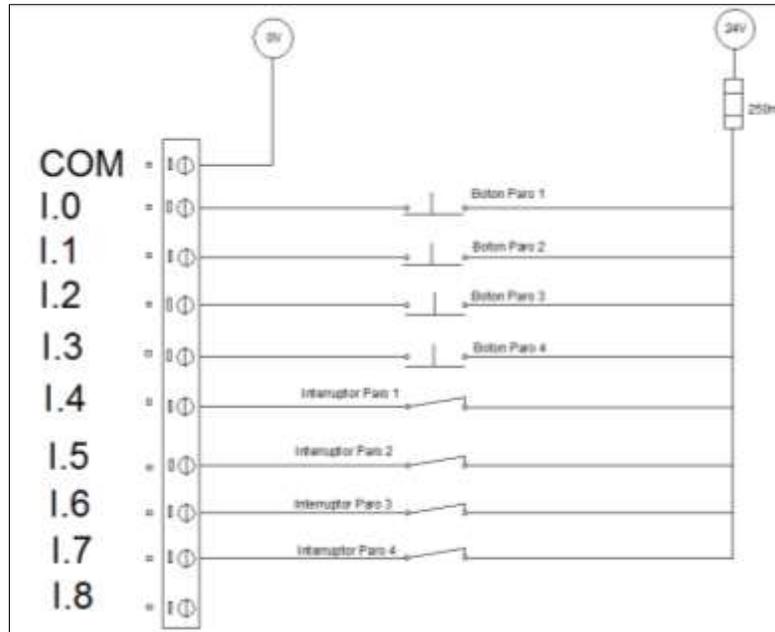


Figura 3.20 Entradas Digitales

3.4.2.3 Elección de fusible

El manual de usuario del Módulo V200-18-E3XB en su apartado de entradas digitales sugiere poner un elemento de protección en la línea de alimentación de 24V.

Dentro de las especificaciones técnicas del módulo V200-18-E3XB, la corriente que circula por el módulo de entradas está dividida de la siguiente manera:

- 6mA para las entradas de la 4 a la 7
- 8.8mA para las entradas de la 0 a la 3 [24]

Teniendo un total de corriente de 113.2mA consumida.

Para proteger a la Entradas Digitales se seleccionó un Fusible tipo americano de fusión rápida de 250 mA.

3.4.3 SALIDAS ANALÓGICAS

Las salidas analógicas son utilizadas de acuerdo al apartado correspondiente en la hoja de datos del V200-18E3XB [25].

3.4.3.1 Elementos de Salidas Analógicas

En este bloque de salidas se conectan los siguientes elementos:

- Dos drive VS1MD25
- Un drive VS1MD21
- Un transductor de Presión STD 5000

Los señal utilizada para los Drives es una señal de tensión de 0-10 VCD mientras que para el transductor de presión se utiliza una señal de corriente de 4-20mA.

3.4.3.2 Circuito Eléctrico de Salidas Analógicas

En la Figura 3.21 se observa como son conectados estos elementos al controlador en el slot correspondiente a salidas analógicas.

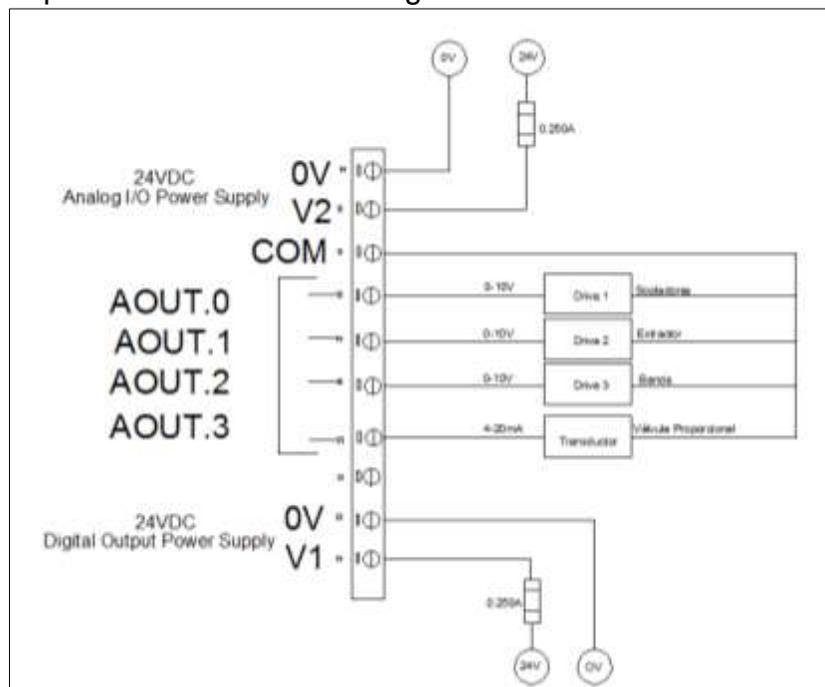


Figura 3.21 Salidas Analógicas

En el circuito se puede apreciar que en este bloque de salidas se encuentran los bornes de conexión para la fuente que alimenta a las entradas y salidas analógicas y a las salidas digitales.

Los drive VS1MD cuentan con entradas analógicas de tensión para control de frecuencia. Dichas entradas son la V1 y CM localizadas en las terminales de control del dispositivo. De acuerdo al manual de usuario se deben configurar los parámetros



Frequency Setting Mode y Filter Time Constant for V1 Input para que el variador responda a las variaciones de tensión en la entrada [26].

3.4.3.3 Elección de fusible

Las salidas digitales requieren una fuente alimentación de 24 VCD con un máximo de corriente de consumo de 85 mA [27]; por lo que se eligió utilizar un fusible de fusión rápida tipo americano de 250mA. Las salidas y entradas analógicas requieren una fuente alimentación de 24 VCD con un máximo de corriente de consumo de 130 mA [28]; por lo que se eligió utilizar un fusible de fusión rápida tipo americano de 250mA.

3.4.4 ENTRADAS ANALÓGICAS

El módulo V200-18-E3XB cuenta con cuatro entradas analógicas especiales para RTD y Termopares [29]. Se eligió utilizar estas entradas para la conexión de RTD's.

3.4.4.1 Elementos de Entradas Analógicas

A continuación se describirán los elementos físicos que forman parte del circuito de entradas Analógicas:

- 1 RTD PT 100 3 hilos para la zona de Inyección
- 1 RTD PT 100 3 hilos para la zona de Distribución
- 1 RTD PT 100 3 hilos para la zona de Descarga

3.4.4.2 Circuito Eléctrico de Entradas Analógicas

En la Figura 3.22 se muestra como se deben conectar los elementos físicos mencionados anteriormente en el slot correspondiente.

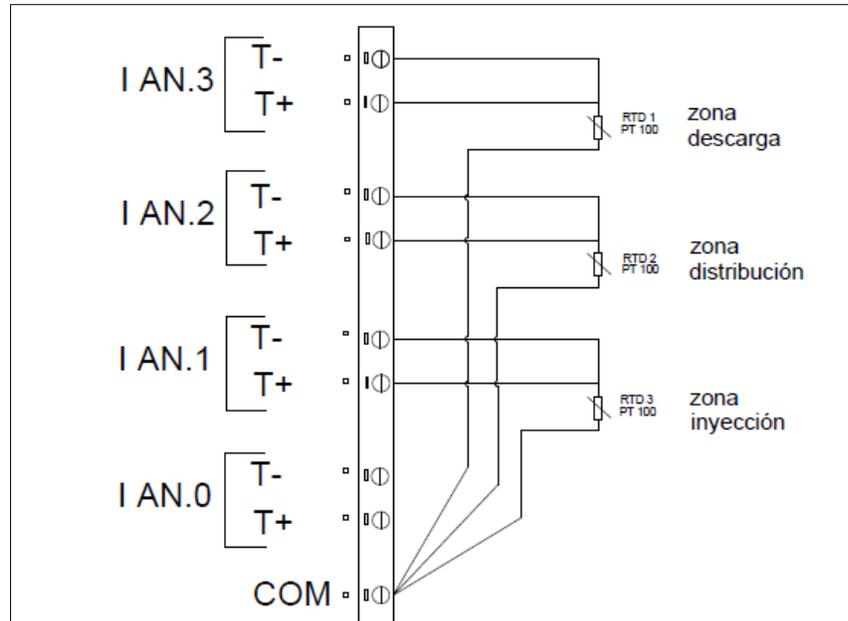


Figura 3.22 Circuito Eléctrico de Entradas Analógicas

3.4.5 ALIMENTACIÓN DEL PLC

De acuerdo a la hoja de especificaciones del PLC V570-57-T20B se requiere una fuente de alimentación de 24 VDC con un máximo de corriente de 270 mA. [11]. Como se puede observar en la Figura 3.23 se decidió conectar el PLC a una fuente de 24 VDC con un fusible tipo americano de fusión rápida de 500 mA como elemento de protección.

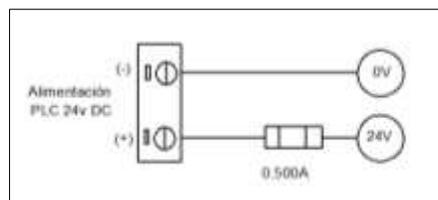


Figura 3.23 Alimentación PLC

3.4.6 ELECCIÓN DE LA FUENTE PODER

Se debe utilizar una fuente de alimentación de 24 VDC que pueda suministrar corriente a los siguientes elementos:

- Alimentación PLC: 270 mA
- Alimentación de Entradas y Salidas Analógicas: 130 mA
- Alimentación de Salidas Digitales: 85 mA
- Consumo de Entradas Digitales: 113.2mA



- Consumo de Salidas Digitales: 833 mA

La corriente total es de 1.43 A. Se decidió utilizar una fuente de alimentación de 24 VCD 2 A serie INSTA de la marca Weidmuller.

En la Figura 3.24 se muestran todos los diagramas de conexión al PLC. Este diagrama servirá como principal referencia en el cableado del tablero de control.



3.4 TABLERO DE CONTROL

Una vez dibujados los circuitos de fuerza y control se debe diseñar el tablero de control en el que se realizarán dichos circuitos.

En la Figura 3.25 se muestra cómo deben ser distribuidos los elementos en el Tablero de control. Esta distribución fue realizada tomando en cuenta las medidas de los elementos descritas en su respectiva hoja de datos o catálogo y considerando posibles adiciones de otro tipo elementos al equipo. Se observan cinco segmentos horizontales con los siguientes componentes:

Primer Segmento

- Interruptor termomagnético S203U-K63 ABB
- Un bloque de 10 clemas para cable calibre 8
- Un bloque de 10 clemas para cable calibre 8 y una clema portafusible para cable calibre 8
- Un bloque de 9 clemas para cable calibre 8 y una clema portafusible para cable calibre 8

Los bloques de clemas servirán como nodos de las líneas de alimentación para la conexión de motores arrancados a tensión plena, drives y fuente de alimentación. Dichos nodos serán realizados con peines de interconexión entre clemas. Las dos clemas portafusible servirán para la conexión de un grupo de salidas digitales tipo relevador del PLC.

Segundo Segmento

- Seis Interruptores termomagnéticos S203U-K5 ABB
- Tres Interruptores termomagnéticos S203U-K30 ABB
- Interruptor termomagnético S203U-K0.5 ABB

Tercer Segmento

- Seis bloques de 3 clemas portafusible para calibre 14
- Cinco clemas portafusible para calibre 16
- Dieciocho clemas para calibre 16
- Fuente de Alimentación Weidmuller 24 VDC 2 A

Cuarto Segmento

- Seis relevadores contactores SIEMENS Sirius 3RT1015-1AP61
- Seis relevadores térmicos de sobrecarga SIEMENS Sirius 3RU1116-1FB0
- Dos Drives Baldor VS1MD25
- Drive Baldor VS1MD21

Quinto Segmento

Este bloque corresponde a los bloques de clemas a los que serán conectados los elementos de entrada y salida.

- Un bloque de 2 clemas para calibre 14 dedicado a la conexión de la válvula solenoide.
- Un bloque de 18 clemas para calibre 14 dedicado a la conexión de ventiladores



- Un bloque de 6 clemas para calibre 14 dedicados a la conexión de los sopladores. Se deben hacer dos clemas comunes para cada salida del variador puesto que los dos sopladores comparten dicho equipo
- Un bloque de 3 clemas para calibre 14 dedicado a la conexión de banda transportadora.
- Un bloque de 3 clemas para calibre 12 dedicado a la conexión del extractor
- Un bloque de 16 clemas para calibre 16 dedicado a la conexión de los 4 botones de paro por emergencia y los 4 interruptores de final de carrera
- Un bloque de 12 clemas para calibre 16 dedicado a la conexión de lámparas indicadoras y torreta de emergencia
- Un bloque de 3 clemas para calibre 16 dedicado a la conexión del nodo común a realizar de los tres RTD's PT100
- Cuatro bloques de 2 clemas para calibre 16 dedicados a la conexión los tres RTD's PT100 y del transmisor de presión STD5000
- Un bloque de 4 clemas para calibre 16 dedicado a la conexión del nodo común de la señal analógica que controla a los tres drives.

Se debe colar un segmento de riel DIN de 88cm de longitud en los bloques 1, 2, 3, 5 y un segmento de 44cm en el bloque 4 que contiene a los drives que deben ser montados con tornillos, tuercas y rondanas.

El cableado será realizado por medio de canaletas de 6cm de ancho x 8cm de profundidad. La canaleta colocada verticalmente a la izquierda del tablero debe ser dedicada únicamente a cableado de fuerza mientras que la canaleta colocada a la derecha debe ser dedicada únicamente a cableado de control.

El gabinete que contiene al tablero debe de tener las dimensiones mínimas de 180 cm de altura por 110 cm de ancho por 30 cm de profundidad. Se deben realizar tres aberturas en la parte superior del gabinete para las conexiones externas del tablero. La primera abertura es para la alimentación trifásica a 220 VCA que requiere el equipo. Esta alimentación debe provenir de una caja de cuchillas portafusibles (Ver 3.3 Circuito de Fuerza).

La segunda abertura es dedicada para las señales de control de los siguientes elementos:

- Tres Sensores de Temperatura PT100 de 3 hilos
- Transductor de Corriente a Presión
- Cuatro Botones de Paro de Emergencia
- Cuatro Interruptores de Final de Carrera

La tercera abertura es para las señales de fuerza de los siguientes elementos:

- Seis motores de 1 HP
- Dos motores de 2 HP
- Un motor de 5 HP
- Una válvula solenoide





CAPÍTULO 4

Filosofía de Operación

4.1 OPERACIÓN REQUERIDA DEL EQUIPO

4.1.1 ENCENDIDO GENERAL

El túnel criogénico contará con un interruptor principal que permitirá el paso de alimentación eléctrica a todo el equipo.

Una vez que fue encendido el PLC y la HMI mediante el interruptor principal aparecerá en la interfaz hombre máquina una ventana de bienvenida y un botón de siguiente. En una nueva ventana se deberá elegir entre la opción de **Operación** o **Mantenimiento**.

4.1.2 OPERACIÓN

Una vez que se eligió Operar el Túnel se requiere conocer el Set Point de Temperatura de Congelación. El objetivo es llevar al Túnel expuesto a la



temperatura ambiente o a previas temperaturas de congelación al valor deseado de Temperatura de Congelación solicitada por el operador.

Se evalúa el signo y la magnitud del error para tomar la decisión del tipo de operación que se debe realizar. Se recuerda que:

$$Error = S.P - Tt \quad (11)$$

Dónde:

S.P: Set Point o Punto de Ajuste

Tt: Temperatura del Túnel brindada por el SENSOR 1 ubicado en la Zona de Inyección o Esparado.

Se enlistan a continuación los cuatro casos a tratar:

- i. Si el set Point es menor a la Temperatura del Túnel con el error menor a -20°C , se debe ejecutar el algoritmo de **Modo de Arranque**.
- ii. Si el set Point es menor a la Temperatura del Túnel con el error mayor a -20°C y menor a 0°C , se debe ejecutar el algoritmo de **Modo de Congelación**.
- iii. Si el set Point es mayor a la Temperatura del Túnel con el error menor a 10°C y mayor a 0°C , se debe ejecutar el algoritmo de **Modo de Congelación**.
- iv. Si el set Point es mayor a la Temperatura del Túnel con el error mayor a 10°C , se debe ejecutar el algoritmo de **Modo de Exceso de Frio**.

Después de ingresar el Set Point el operador deberá pulsar un botón de “Ejecutar” con el que se dará inicio al algoritmo de operación adecuado según sea el caso.

4.1.3 MODO DE ARRANQUE

Este modo de operación se debe ejecutar sin producto dentro del equipo pues la temperatura disminuirá gradualmente lo que generaría una congelación poco uniforme. Cuando se ejecute este algoritmo se debe dar aviso al operador de esta restricción.

Los ventiladores son encendidos y el control de temperatura arranca con los valores de offset de velocidad del extractor y de los sopladores (28Hz y 15Hz respectivamente) además de mantener la banda transportadora en movimiento (30 Hz) para evitar su congelamiento. Se recuerda que los ventiladores son arrancados a tensión plena y su sentido de giro depende de su ubicación en el túnel.

El valor del Set Point será alcanzado de manera escalonada en intervalos de -20°C ; con lo que se logrará que la temperatura a lo largo del Túnel sea homogénea. Una vez que la Temperatura se encuentra en los rangos de Congelación se dará aviso y el operario podrá elegir el modo de Congelación.

Los intervalos de -20°C fueron propuestos por ITUMI pues todos sus equipos actualmente son arrancados de esta manera pero de forma manual.



4.1.4 MODO DE EXCESO DE FRIO

En este modo de operación se deben arrancar a los ventiladores; se deben operar a los sopladores y banda a 30 Hz y el extractor se debe operar a 60 Hz con la finalidad de expulsar refrigerante y esperar a que la Temperatura en el Túnel aumente. Una vez que la Temperatura se encuentra en los rangos de Congelación se dará aviso y el operario podrá elegir el modo de Congelación.

4.1.5 MODO DE CONGELACIÓN

Se pregunta al operador si desea iniciar Congelación de modo **Manual** o **Automático**.

Con el modo **Manual** el operador podrá apagar o prender los ventiladores y válvula solenoide; además será capaz de cambiar los valores de las velocidades de extractor, sopladores y banda transportadora. Con este modo de congelación el operario es responsable de la distribución de refrigerante, del tiempo de permanencia del producto en el equipo y del corte del suministro del N₂. El único lazo de control existente es el encargado de la inyección de refrigerante. Si el operador ocasiona fuga de refrigerante a la salida del túnel se podrá observar en la HMI un aviso de advertencia. Se recuerda que se puede saber si existe pérdida de refrigerante con ayuda del SENSOR 3 de temperatura colocado al final del equipo.

Con el modo **Automático** el operador solo será capaz de cambiar el valor de la velocidad de la banda transportadora ya que los ventiladores encienden de manera automática y los tres lazos de control de temperatura programados trabajan para lograr la distribución del refrigerante.

El operario podrá ser capaz de cambiar de modo automático a modo manual y viceversa mediante un botón de Cambio de Modo de Congelación.

Cuando la congelación haya sido terminada con cualquiera de los dos modos; el operador deberá indicar que ha finalizado con el proceso para que se ejecute el algoritmo de **Término**.

4.1.6 TÉRMINO

Una vez que se finalizó con el proceso de congelación es necesario expulsar el refrigerante que aún se encuentre dentro del equipo; esta operación es de suma importancia pues los operarios deben abrir las puertas del equipo para realizar trabajos de limpieza. Este algoritmo de término debe de apagar todos los elementos dejando únicamente en operación al extractor a 60 Hz por un espacio de 15 min.

4.1.7 ESTADO DE EMERGENCIA

Es un algoritmo que genera un paro ordenado del Túnel Criogénico cuando las condiciones del proceso salen de los rangos de operación normales y exponen al personal y al equipo a condiciones de operación inseguras. Este sistema debe garantizar el modo seguro del equipo para el operador además de operar de forma independiente a otros algoritmos de operación.

Este sistema está conformado por los siguientes elementos que provocarían el estado de emergencia.

- Cuatro botones tipo hongo ubicados en las esquinas prismáticas del equipo



- Un interruptor de posición colocado en cada puerta lateral del túnel.

Si alguno de los elementos anteriores es activado, el equipo se comportaría de la siguiente manera:

- Detiene la circulación de la banda transportadora.
- Detiene a los 6 ventiladores.
- Cierra la válvula solenoide de inyección de Nitrógeno.
- Detiene a los 2 sopladores.
- Activa el extractor a 60Hz.
- Activa Torreta de aviso por paro de emergencia.
- Manda a la HMI a una pantalla de Paro por Emergencia indicando el motivo del paro.

Una vez que se hayan eliminado las causas que originaron el paro de emergencia se podrá regresar al Menú Principal.

4.1.8 MANTENIMIENTO

Si los operadores desean efectuar alguna de las siguientes acciones:

- Limpieza interna del túnel porque la congelación ha concluido o porque se desea cambiar de producto.
- Realizar el cambio de alguna parte mecánica del Túnel.
- Realizar pruebas de funcionamiento de alguno de los motores para evaluar su desempeño

Para efectuar cualquiera de estas actividades se debe efectuar el algoritmo de Mantenimiento.

En el Menú Principal se contara con la opción **Mantenimiento** que al ser pulsada desglosara dos opciones con el nombre **Limpieza** y **Pruebas de Funcionamiento**.

4.1.8.1 Modo Limpieza

Dentro del **Modo Limpieza** el operario podrá realizar un lavado del interior del túnel. Para que se puedan realizar estas tareas de modo seguro se desactivarán los siguientes elementos:

- Motores de Ventiladores.
- Motores de Sopladores.
- Motores de Extractor.
- Válvula Solenoide de la inyección.

Quedará únicamente habilitado el Motor de la Banda Transportadora, el cual el operador podrá activar y modificar su velocidad si se llegara a presentar el caso de encontrar residuos de alimentos en partes impenetrables para limpiar.

Una vez dentro de la pantalla del **Modo Limpieza** se indicarán que puertas del Túnel han sido abiertas. Para terminar el modo limpieza el operario deberá pulsar sobre el botón Regresar que se encuentra en la parte inferior y así será enviado a la pantalla **Mantenimiento**.



Es importante señalar que en este modo de Mantenimiento la apertura de puertas no provoca un estado de emergencia. Lo único que puede originar este estado es el accionamiento de alguno de los botones de paro.

4.1.8.2 Modo Pruebas de Funcionamiento

Al seleccionar el **Modo Pruebas de Funcionamiento** los operarios y el personal de servicio podrán hacer uso de los siguientes motores del Túnel:

- La banda Transportadora.
- Los Ventiladores.
- El extractor.
- Los sopladores.
- Válvula Solenoide

Este modo tiene como finalidad poder realizar un diagnóstico del funcionamiento de los motores y válvula y poder corregir si se llegara a presentar una falla mecánica por el uso. Los botones de Paro de Emergencia estarán funcionando normalmente por medida de seguridad en caso que se desee parar el sistema.

Es responsabilidad del operador ver por su integridad a la hora de efectuar las pruebas de funcionamiento ya que las puertas quedaran abiertas sin generar Estado de Emergencia con la finalidad de que se observe el funcionamiento de los motores. Para salir del Modo Pruebas de Motores, en la pantalla estará un botón con el nombre: Terminar que al ser pulsado detendrá a cualquier motor activo y enviará de regreso al operario hacia el Menú Mantenimiento.

4.2 DIAGRAMA DE FLUJO

En el siguiente diagrama de flujo se puede observar el algoritmo completo de la filosofía de operación. Este diagrama es de utilidad para conocer todas las etapas del proceso y ayuda a que la programación sea ágil.

4.2.1 ALGORITMO PRINCIPAL



Este primer algoritmo (Figura 4.1) es el de mayor jerarquía y en él se debe preguntar en todo momento si existe estado de emergencia mientras que se ejecuta el algoritmo de operación general del proceso o de Mantenimiento. Si existe Estado de Emergencia se debe ejecutar el algoritmo exclusivo de Estado de Emergencia Presente.

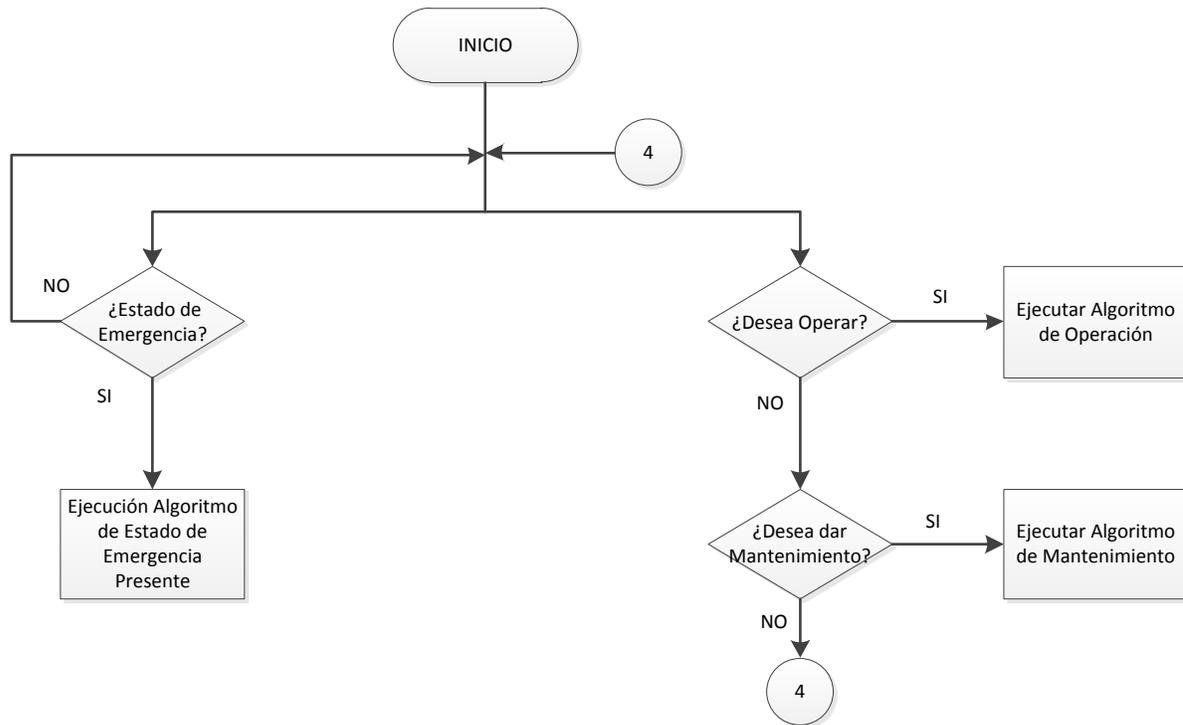


Figura 4.1 Algoritmo Principal

4.2.2 ALGORITMO DE ESTADO DE EMERGENCIA PRESENTE

Con este algoritmo (Figura 4.2) se apagan los elementos de distribución e inyección y se enciende torreta de aviso. Debe operar únicamente el extractor a su máxima velocidad con la finalidad de expulsar el N2 evitando que los operarios se expongan a este gas. Si se han eliminado las causas que originaron el estado de emergencia se debe preguntar si se desea continuar con la congelación. Si se decide continuar con la congelación se manda al algoritmo principal y se apagan todos los motores.

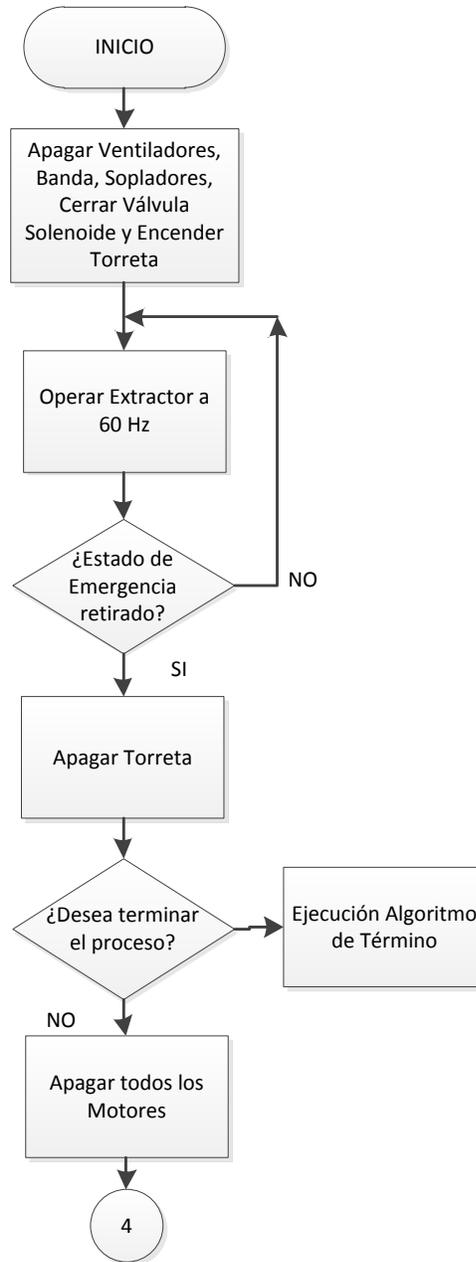


Figura 4.2 Algoritmo de Estado de Emergencia Presente
4.2.3 ALGORITMO DE OPERACIÓN

En este algoritmo (Figura 4.3) se pregunta el valor del Set Point S.P al que se desea que opere el túnel. Realiza la distinción entre tipo de modo requerido de acuerdo al signo y magnitud del error.

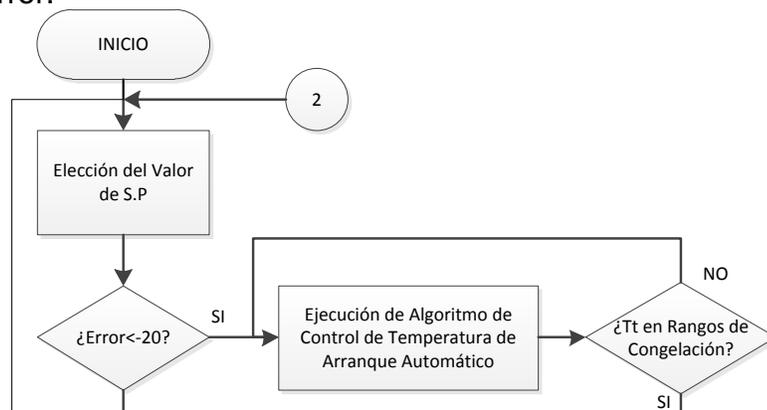




Figura 4.3 Algoritmo de Operación

4.2.4 ALGORITMO DE CONTROL DE TEMPERATURA DE ARRANQUE AUTOMÁTICO

El arranque se ejecutará de manera automática lo que significa que el operario no será capaz de modificar ningún valor de los elementos de distribución de refrigerante. Como se puede observar en la Figura 4.4 el algoritmo abre la válvula solenoide para permitir el paso de refrigerante; opera la banda a 30 Hz para evitar su congelamiento, opera a sopladores y extractor en su valor de offset y ejecuta el control PID (Auto sintonizado) del primer lazo de Temperatura. Este algoritmo realiza el arranque del equipo por intervalos de 20 °C en la Zona de Inyección o Esparado.

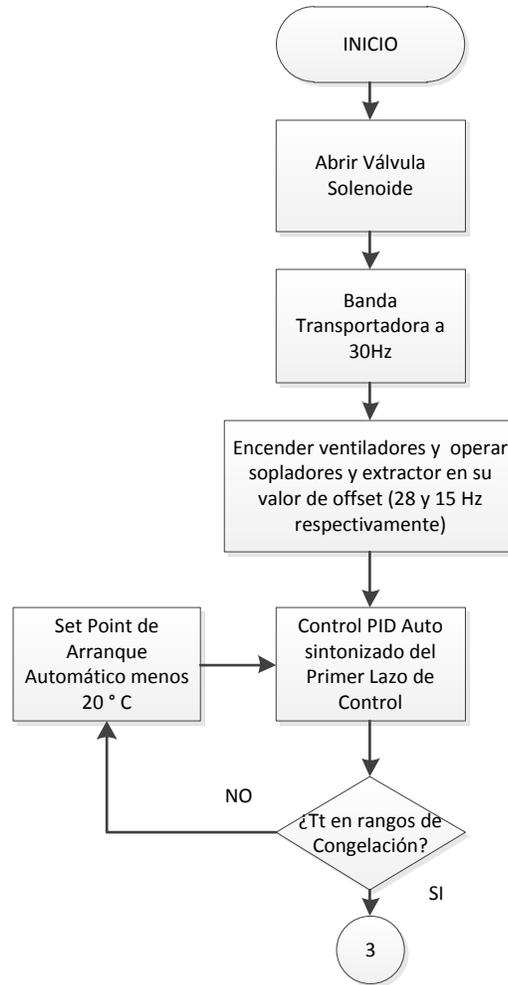


Figura 4.4 Algoritmo de Control de Temperatura de Arranque Automático

4.2.5 ALGORITMO DE CONGELACIÓN

El objetivo de este algoritmo (Figura 4.5) es conocer si el operador desea realizar la congelación de manera manual o automática.

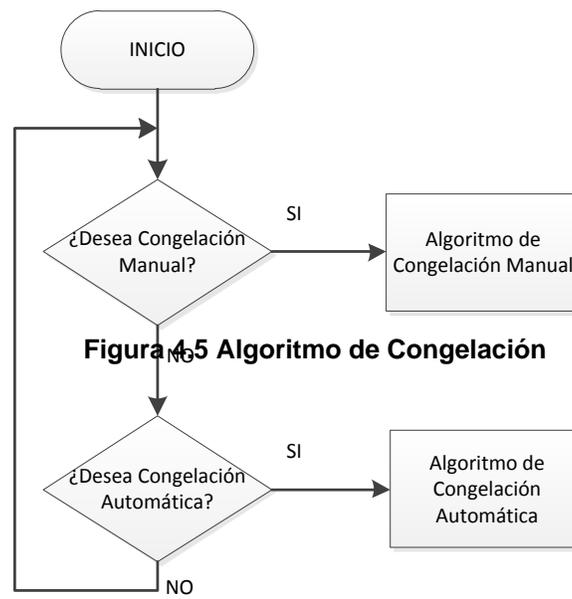


Figura 4.5 Algoritmo de Congelación



4.2.6 ALGORITMO DE CONGELACIÓN MANUAL

Como se observa en la Figura 4.6, si el operario seleccionó manual se ejecuta el siguiente algoritmo dejándolo como responsable de la distribución del refrigerante.

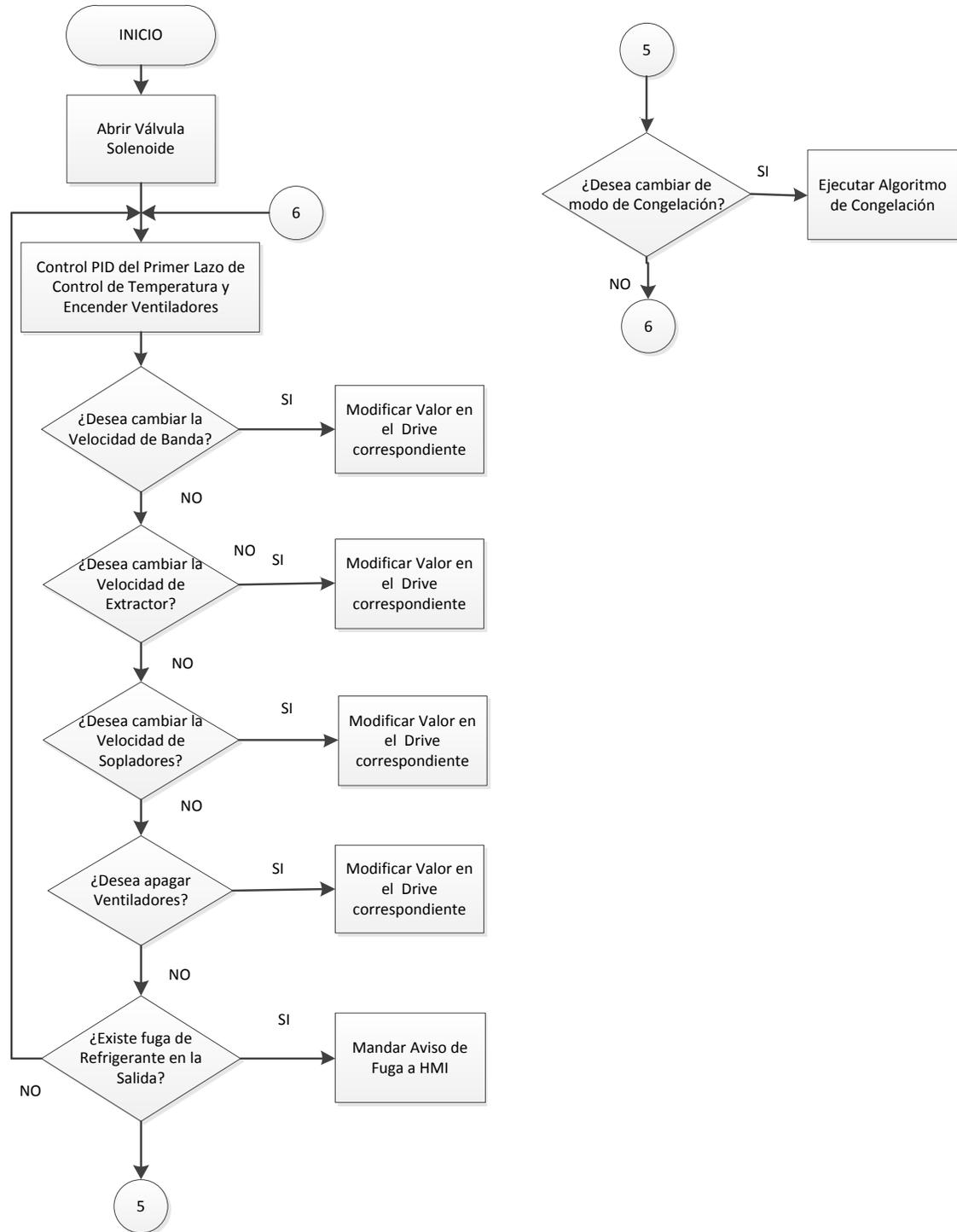


Figura 4.6 Algoritmo de Congelación Manual

4.2.7 ALGORITMO DE CONGELACIÓN AUTOMÁTICA

Si el operario seleccionó congelación automática se ejecuta el algoritmo mostrado en la Figura 4.7.

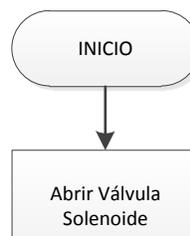




Figura 4.7 Algoritmo de Congelación Automática

4.2.8 ALGORITMO DE CONTROL DE TEMPERATURA AUTOMÁTICO

En la Figura 4.8 se observa que este algoritmo realiza el control PID de los lazos de Temperatura y hace responsable al operario de modificar la velocidad de la banda.

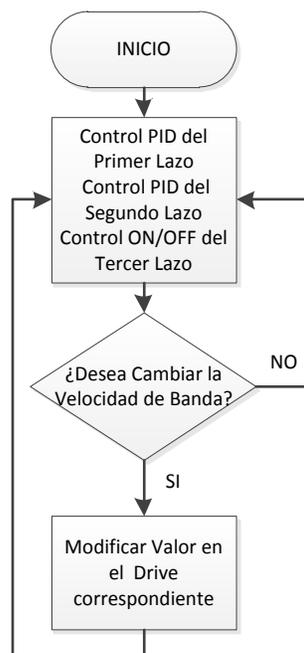


Figura 4.8 Algoritmo de Control de Temperatura Automático



4.2.9 ALGORITMO DE TÉRMINO

Si la congelación ha terminado o se restableció de un paro de emergencia el operario puede finalizar el proceso lo que ejecutara el algoritmo mostrado en la Figura 4.9.

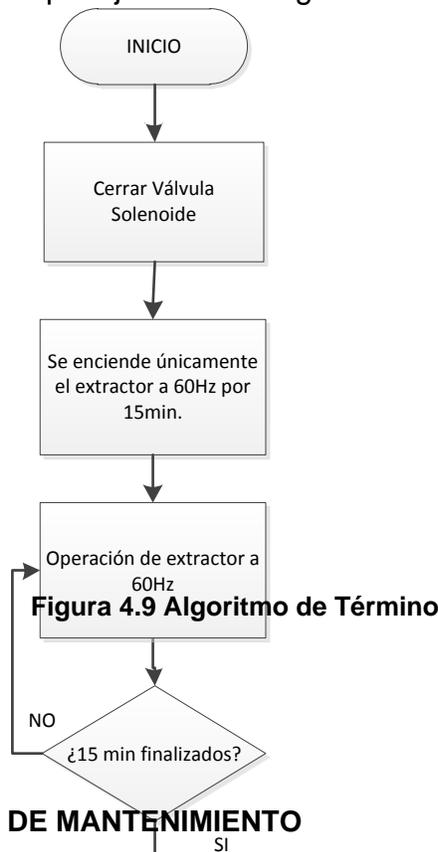


Figura 4.9 Algoritmo de Término

4.2.10 ALGORITMO DE MANTENIMIENTO

Si el operario o el personal de servicio desean manipular el túnel con fines de limpieza o pruebas se debe ejecutar el algoritmo mostrado en la Figura 4.10. Esta opción de mantenimiento es elegida desde el algoritmo principal.

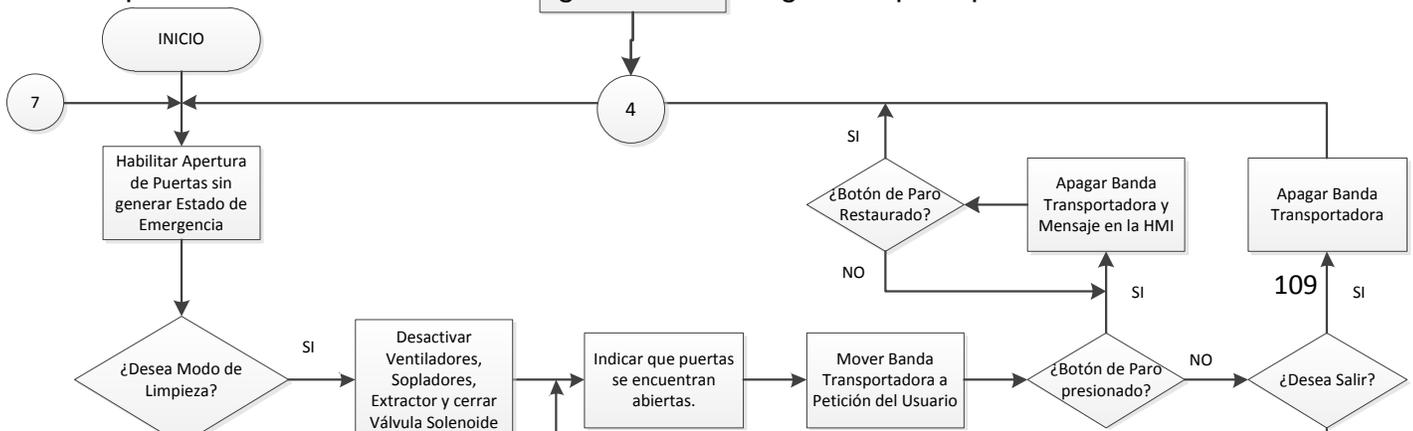




Figura 4.10 Algoritmo de Mantenimiento

CAPÍTULO 5

Programa y HMI



Con el objetivo de validar esta propuesta de automatización se realizó el programa en lenguaje ladder y la interfaz hombre máquina con el equipo disponible en las instalaciones de ESIME Zacatenco en los laboratorios Pesados I de Ingeniería en Control y Automatización.

El equipo que se utilizó fue una pantalla Panel View Plus 1500, un PAC con tarjetas de entradas y salidas analógicas y digitales de la Marca Allen Bradley. Se utilizó el Software de programación RSLogix 5000 para la elaboración del programa en escalera y el Software Factory Talk Machine Edition para la elaboración de la interfaz gráfica.

La interfaz hombre máquina realizada se muestra como resultado de la propuesta de la automatización.

5.1 ENTRADAS Y SALIDAS FÍSICAS

En la Tabla 12 se muestran todas las entradas y salidas físicas que se utilizaron para la elaboración del programa. Esta tabla difiere al diagrama de Control presentado en el Capítulo 3 ya que el controlador es distinto; sin embargo es importante conocer a donde se direccionan las entradas y salidas del controlador.

Tabla 12. Tabla de Entradas y Salidas Físicas

ENTRADAS				SALIDAS			
<i>Digitales</i>		<i>Analógicas</i>		<i>Digitales</i>		<i>Analógicas</i>	
<i>No.</i>	<i>Nombre</i>	<i>No.</i>	<i>Nombre</i>	<i>No.</i>	<i>Nombre</i>	<i>No.</i>	<i>Nombre</i>
I.O	Boton_Paro_1	I.AN.1	RTD_PT100 Zona	O.0	Ventilador_1	O.AN.0	Drive Sopladores 1



			inyección				
I.1	Boton_Paro_2	I.AN.2	RTD Zona Distribución	O.1	Ventilador_2	O.AN.1	Drive Extractor 2
I.2	Boton_Paro_3	I.AN.3	RTD Zona descarga	O.2	Ventilador_3	O.AN.2	Drive 3 Banda Transportadora
I.3	Boton_Paro_4			O.03	Ventilador_4	O.AN.3	Transductor
I.4	Interruptor_Posición_1			O.04	Ventilador_5		
I.5	Interruptor_Posición_2			O.05	Ventilador_6		
I.6	Interruptor_Posición_3			O.06	Solenoides		
I.7	Interruptor_Posición_4			O.07	Foco_1 de Banda		
				O.08	Foco_2 de Extractor		
				O.09	Foco_3 de Sopladores		
				O.10	Foco_4 de Ventiladores		
				O.11	Foco_5 de Solenoide		
				O.12	Torreta		

5.2 DESARROLLO DEL PROGRAMA

A continuación se presentan la rutina principal, las subrutinas y la interfaz con el usuario que permiten la operación del equipo.

5.2.1 RUTINA PRINCIPAL

5.2.1.1 Diagrama en Escalera



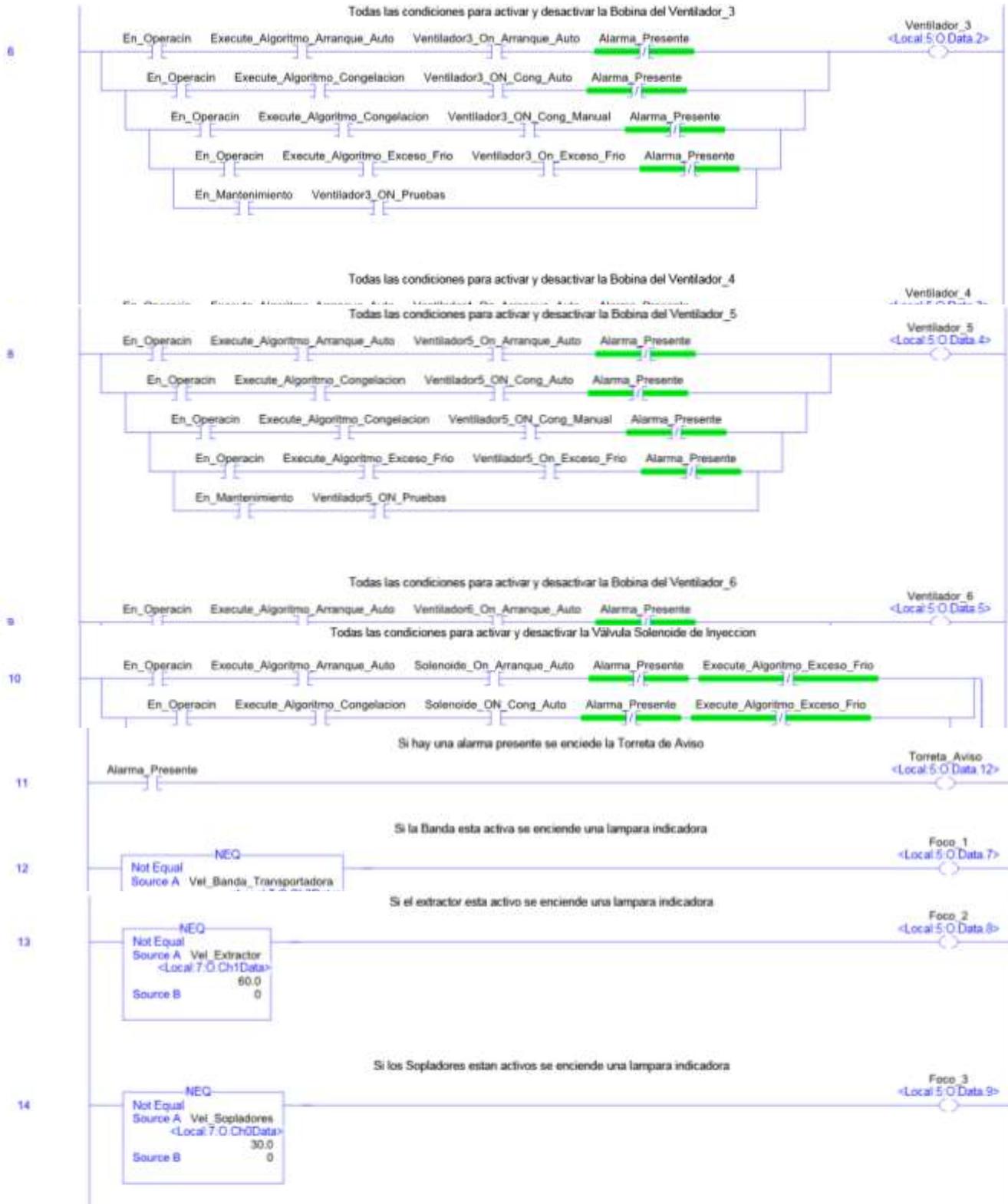




Figura 5.1 Rutina Principal

5.2.1.2 Interfaz con el Usuario



Figura 5.2 Pantalla de Bienvenida

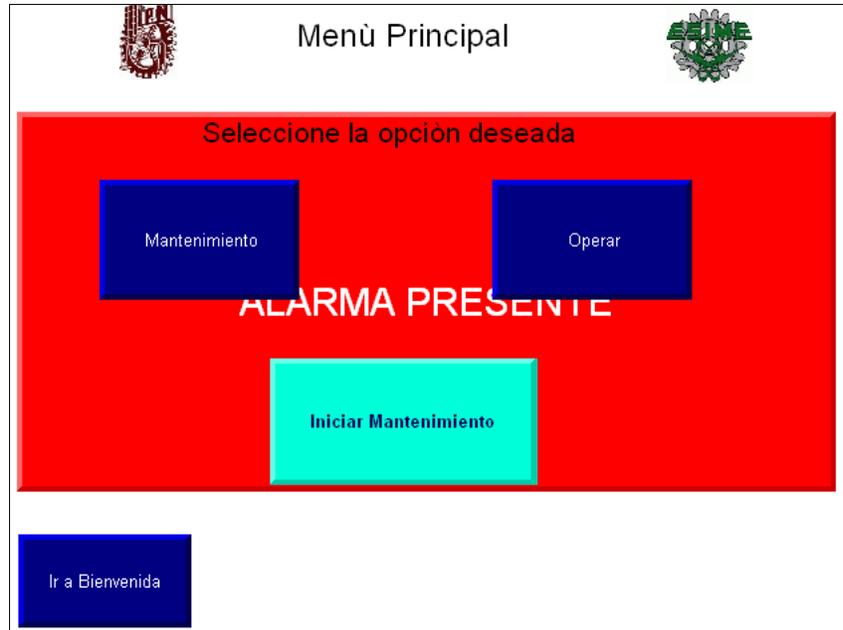


Figura 5.3 Pantalla de Menù Principal

5.2.2 OPERACIONES

5.2.2.1 Diagrama en Escalera



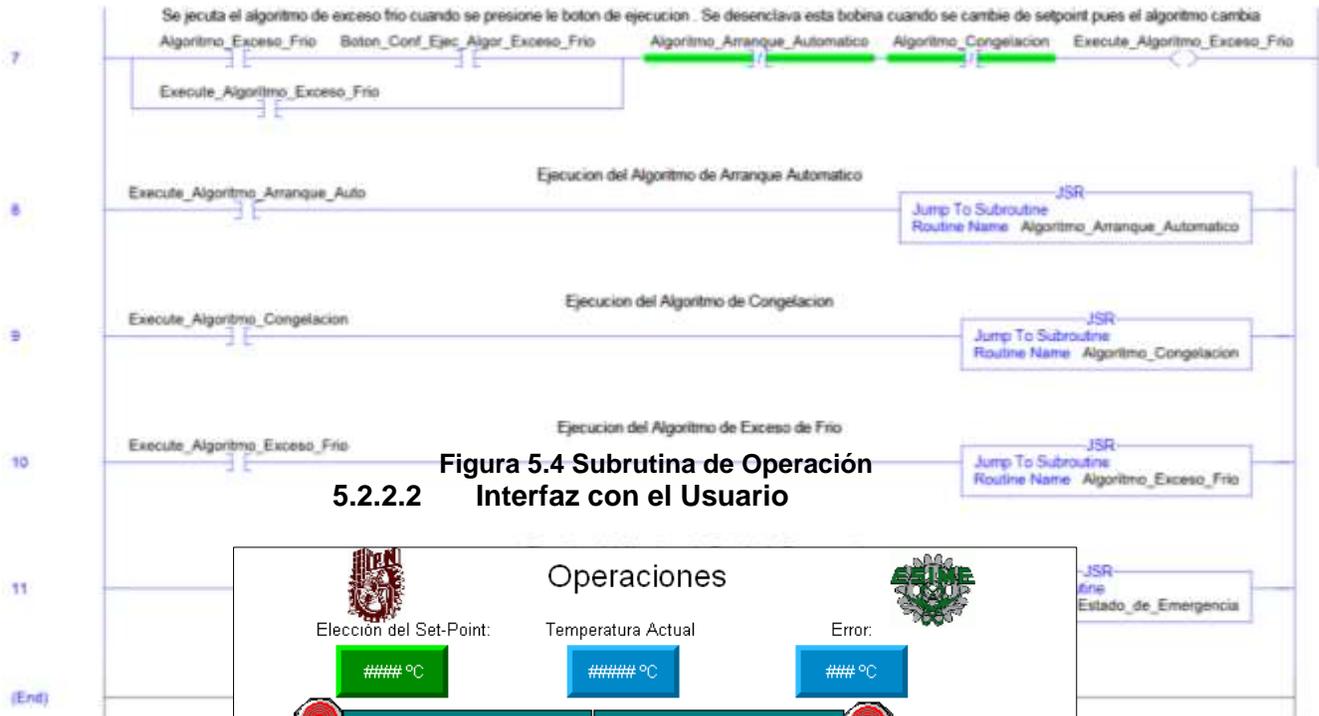


Figura 5.4 Subrutina de Operación Interfaz con el Usuario

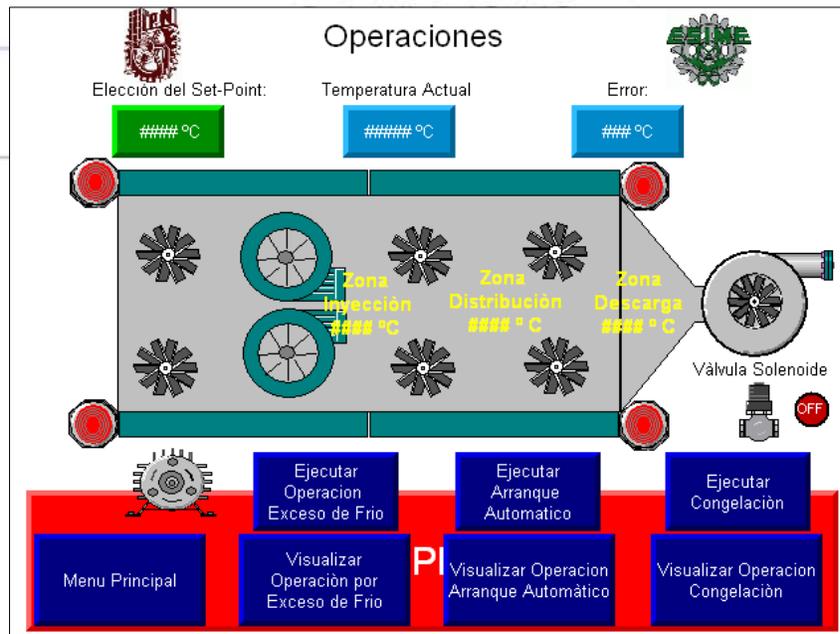


Figura 5.5 Pantalla de Operaciones

5.2.3 OPERACIÓN ARRANQUE AUTOMÁTICO

5.2.3.1 Diagrama en Escalera

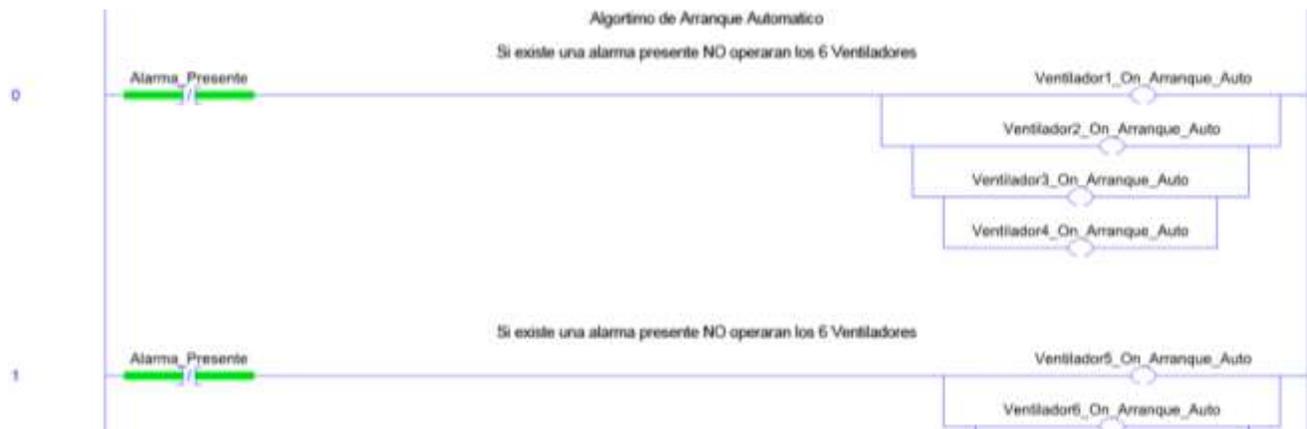




Figura 5.6 Subrutina de Operación de Arranque Automático

5.2.3.2 Interfaz con el Usuario

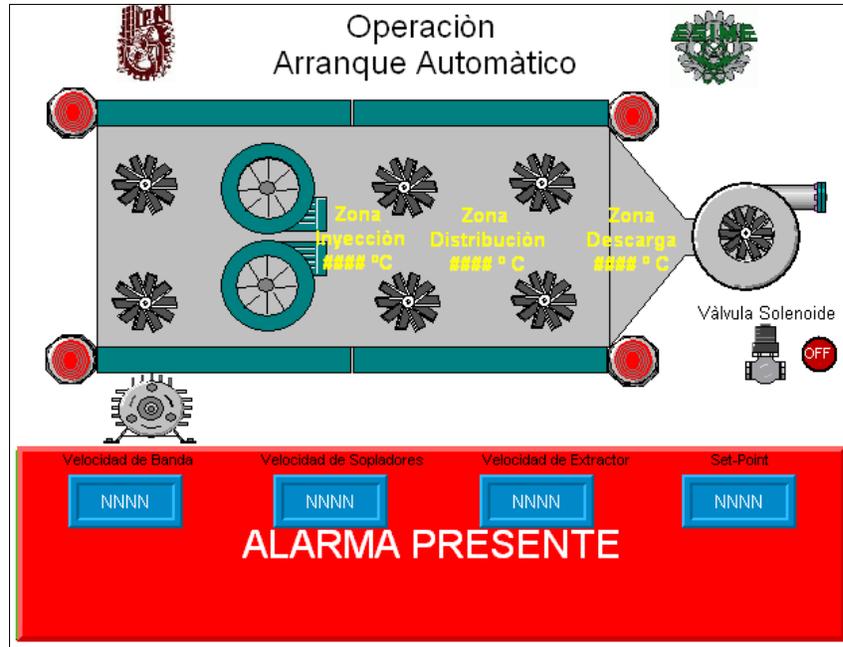


Figura 5.7 Pantalla de Operación Arranque Automático

5.2.4 OPERACIÓN EXCESO DE FRÍO

5.2.4.1 Diagrama en Escalera

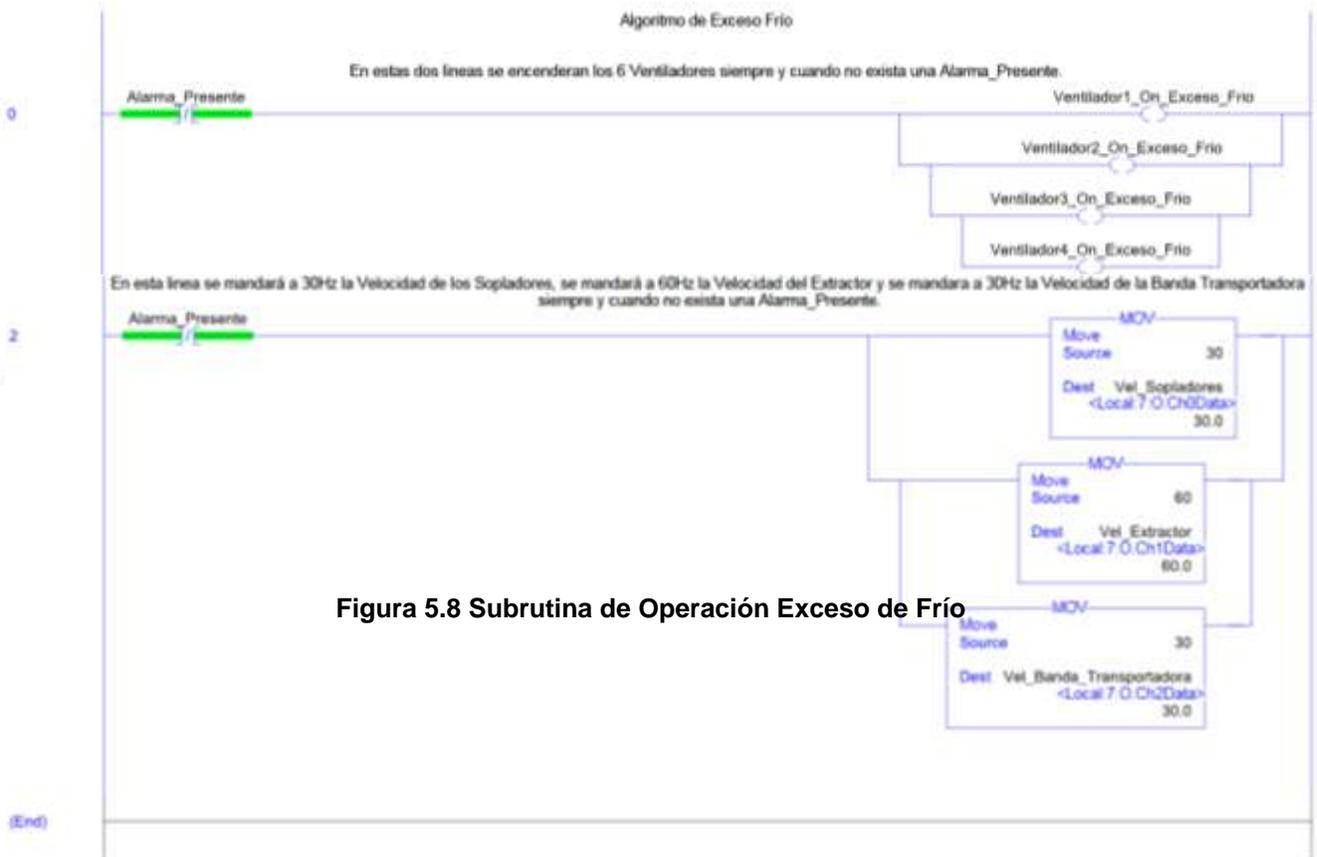


Figura 5.8 Subrutina de Operación Exceso de Frío

5.2.4.2 Interfaz con el Usuario



Figura 5.9 Pantalla de Operación por Exceso de Frío

5.2.5 OPERACIÓN DE CONGELACIÓN

5.2.5.1 Diagrama en Escalera





Figura 5.10 Subrutina de Operación de Congelación

5.2.5.2 Interfaz con el Usuario

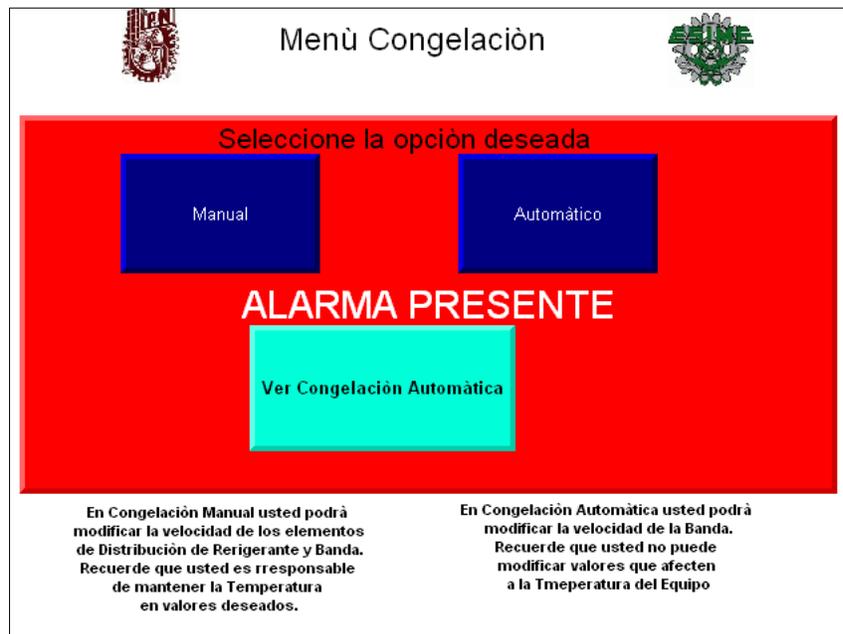
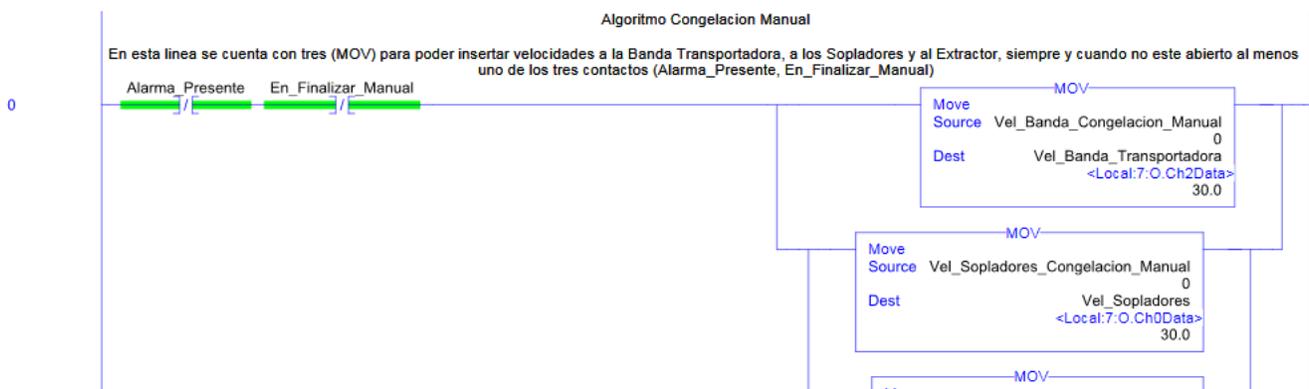
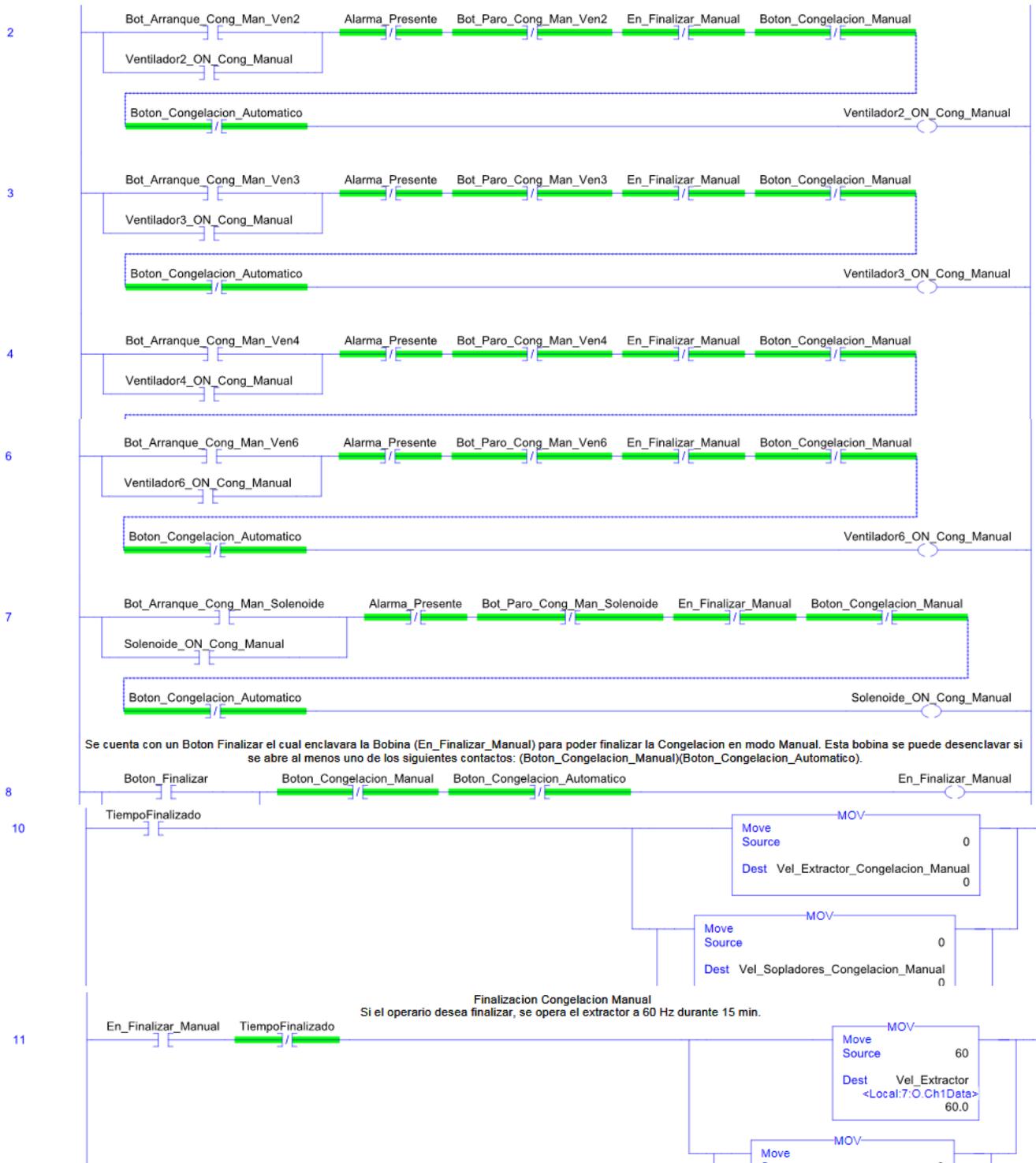


Figura 5.11 Pantalla de Menù de Congelaciòn

5.2.6 CONGELACIÒN MANUAL

5.2.6.1 Diagrama en Escalera







14

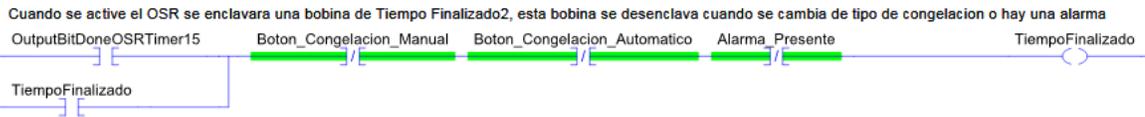


Figura 5.12 Subrutina de Congelación Manual

(End)

5.2.6.2 Interfaz con el Usuario

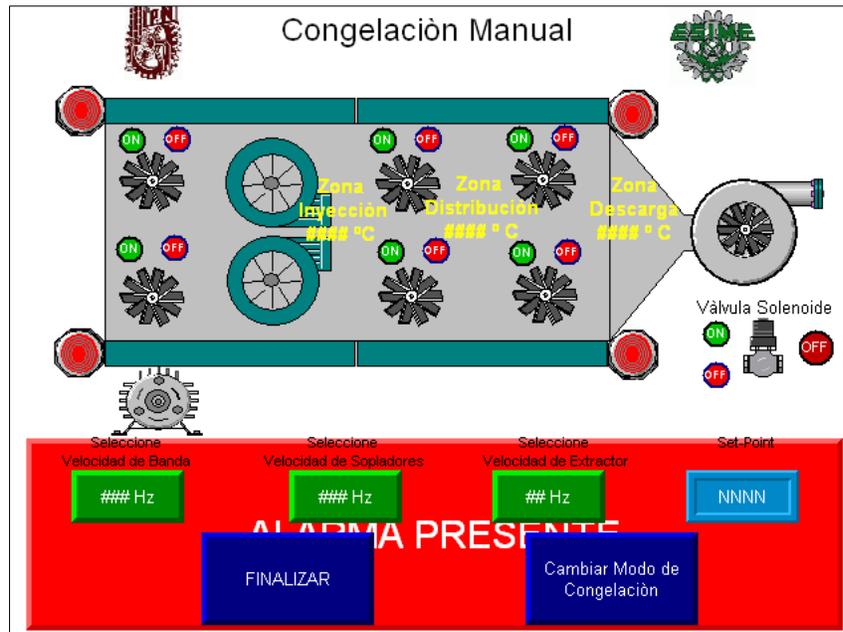
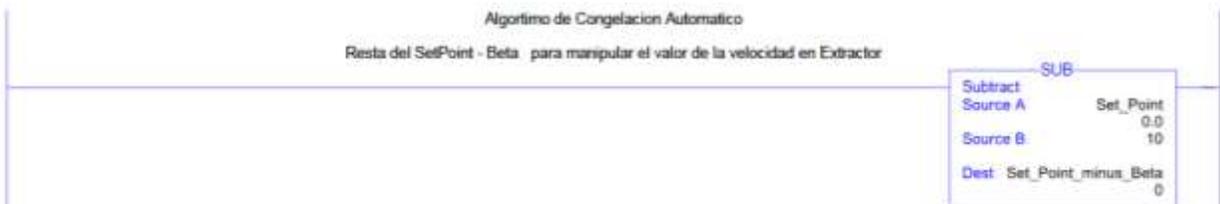


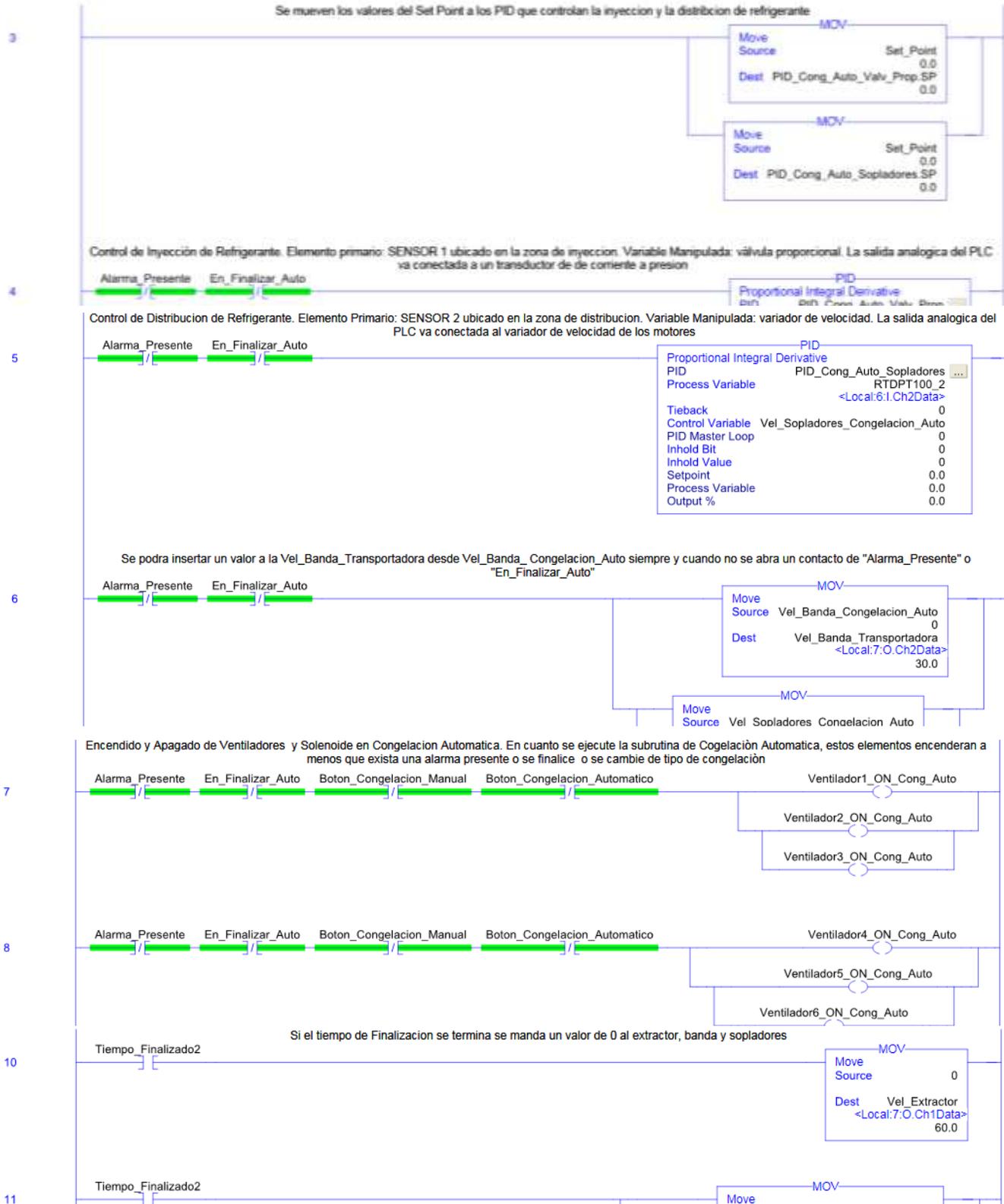
Figura 5.13 Pantalla de Congelación Manual

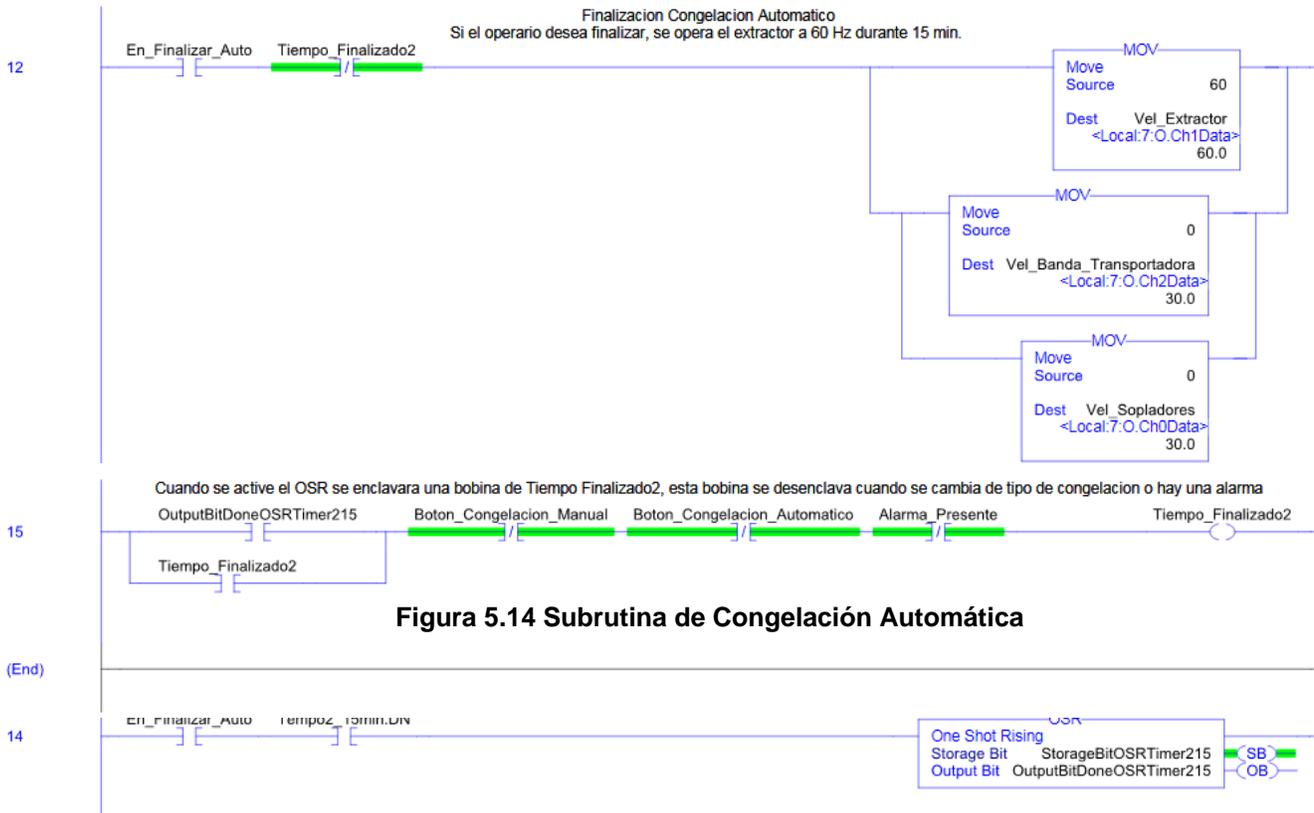
5.2.7 CONGELACIÓN AUTOMÁTICA

5.2.7.1 Diagrama en Escalera

0







5.2.7.2 Interfaz con el Usuario

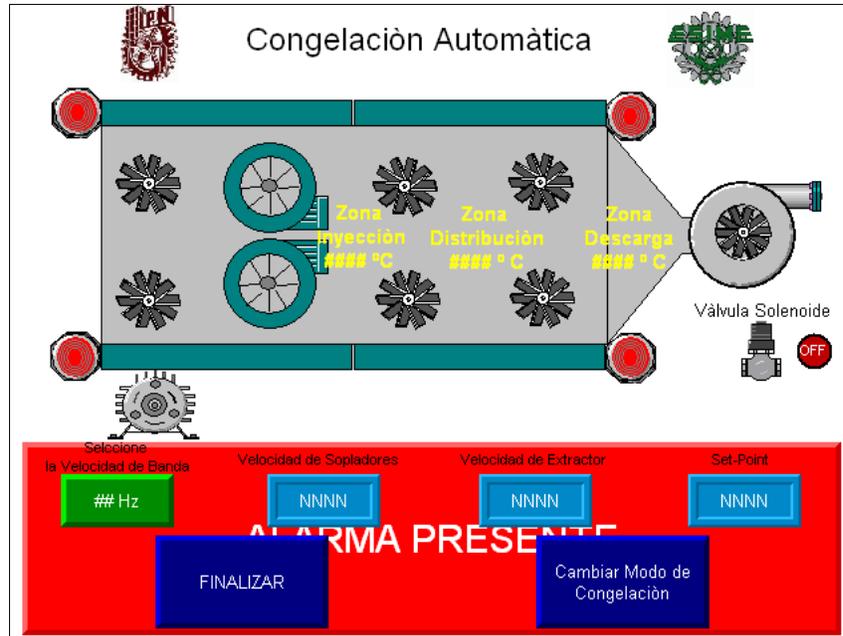


Figura 5.15 Pantalla de Congelación Automática

5.2.8 MANTENIMIENTO

5.2.8.1 Diagrama en Escalera

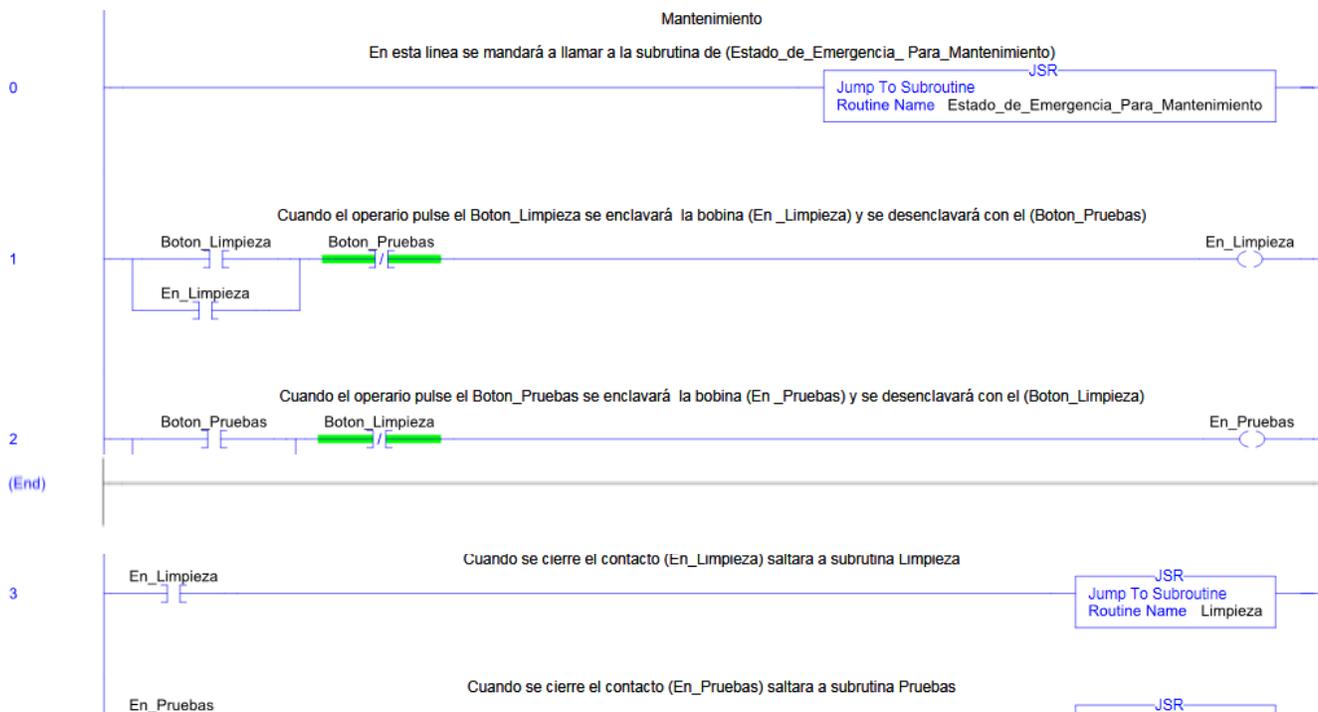




Figura 5.16 Subrutina de Mantenimiento

5.2.8.2 Interfaz con el Usuario



Figura 5.17 Pantalla de Menù de Mantenimiento

5.2.9 LIMPIEZA

5.2.9.1 Diagrama en Escalera





(End)

Figura 5.18 Subrutina de Limpieza
5.2.9.2 Interfaz con el Usuario

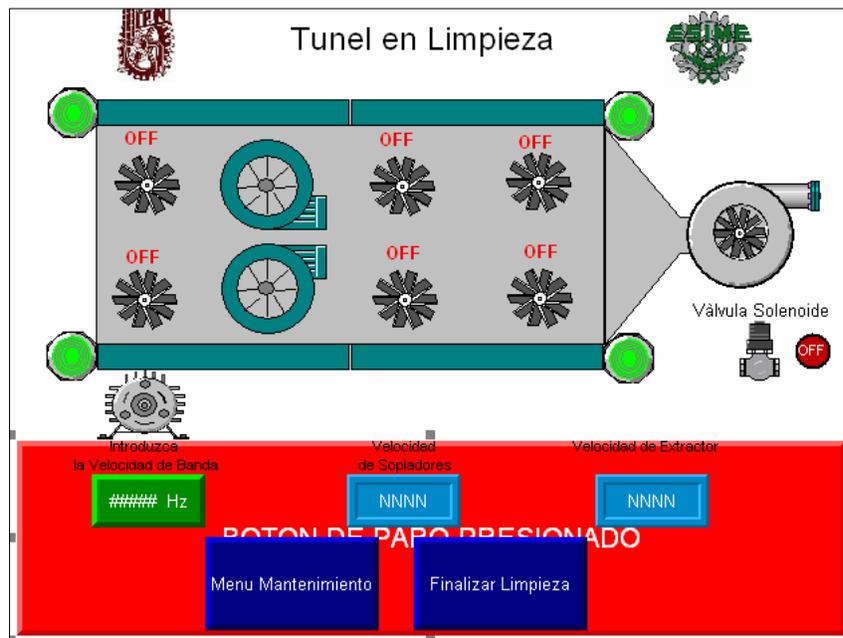
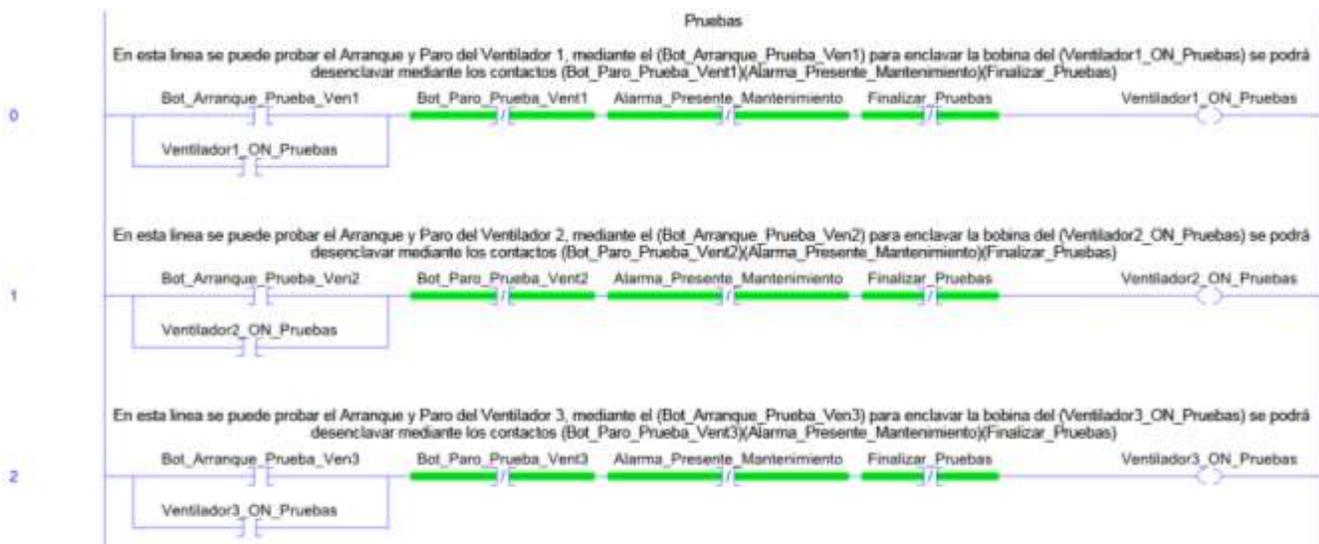


Figura 5.19 Pantalla de Túnel en Limpieza
5.2.10 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO
5.2.10.1 Diagrama en Escalera





5.2.10.2 Interfaz con el Usuario

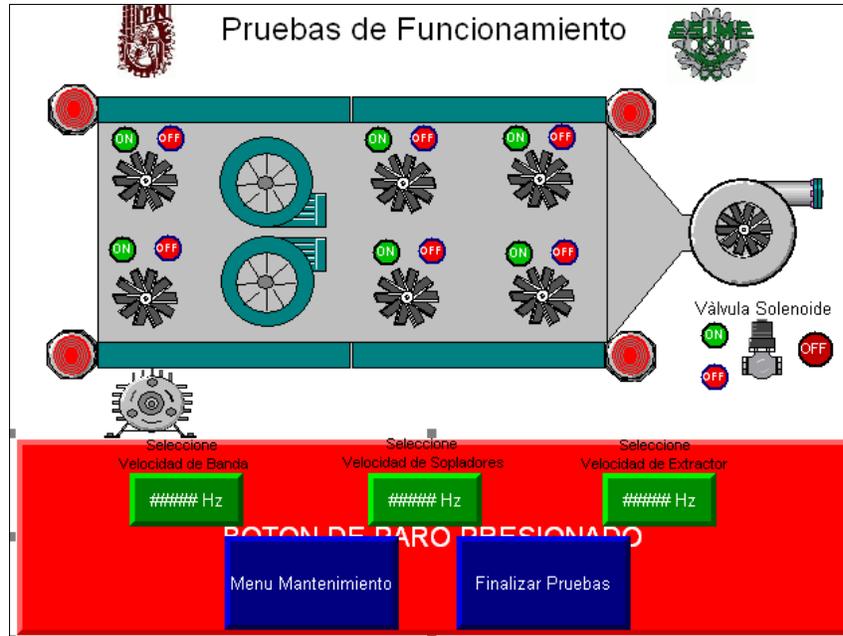


Figura 5.21 Pantalla de Pruebas de Funcionamiento

5.2.11 ESTADO DE EMERGENCIA EN MANTENIMIENTO

5.2.11.1 Diagrama en Escalera

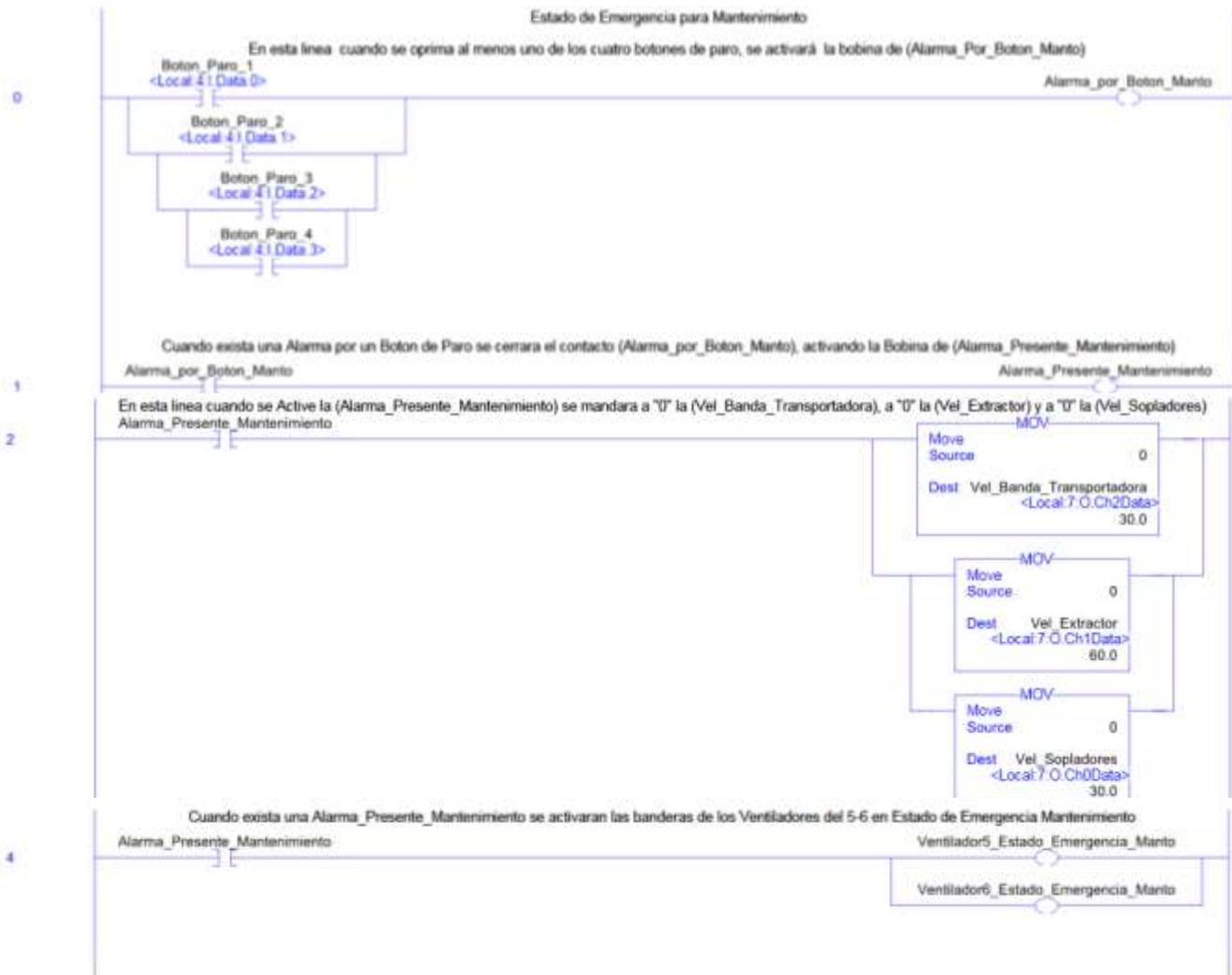




Figura 5.22 Subrutina de Estado de Emergencia en Mantenimiento

5.2.11.2 Interfaz con el Usuario

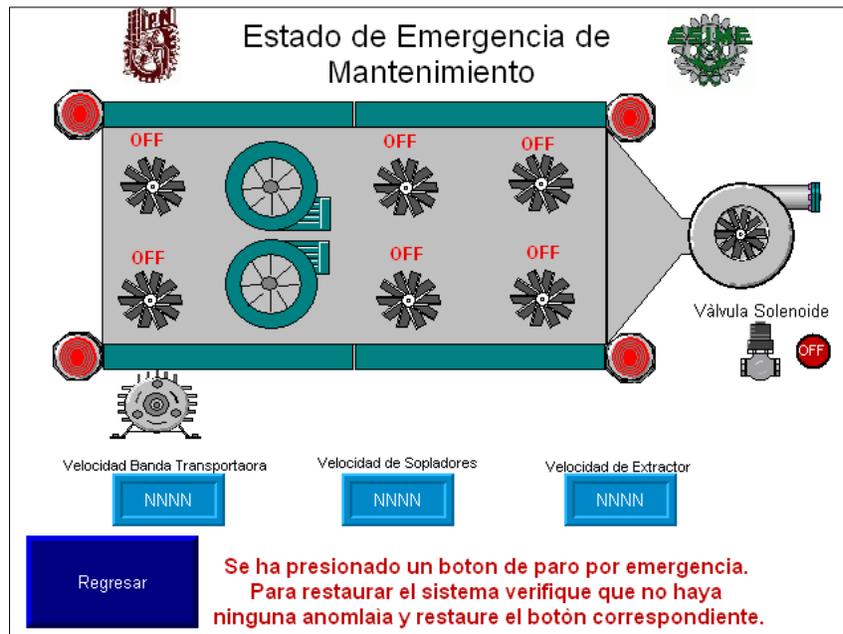
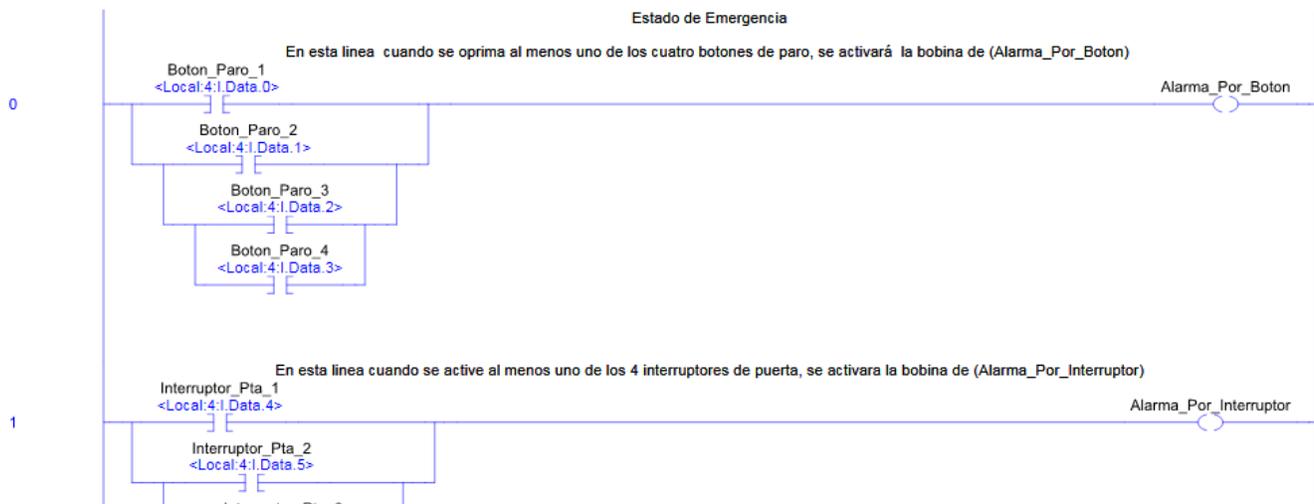


Figura 5.23 Pantalla de Estado de Emergencia de Mantenimiento

5.2.12 ESTADO DE EMERGENCIA EN OPERACIÓN

5.2.12.1 Diagrama en Escalera



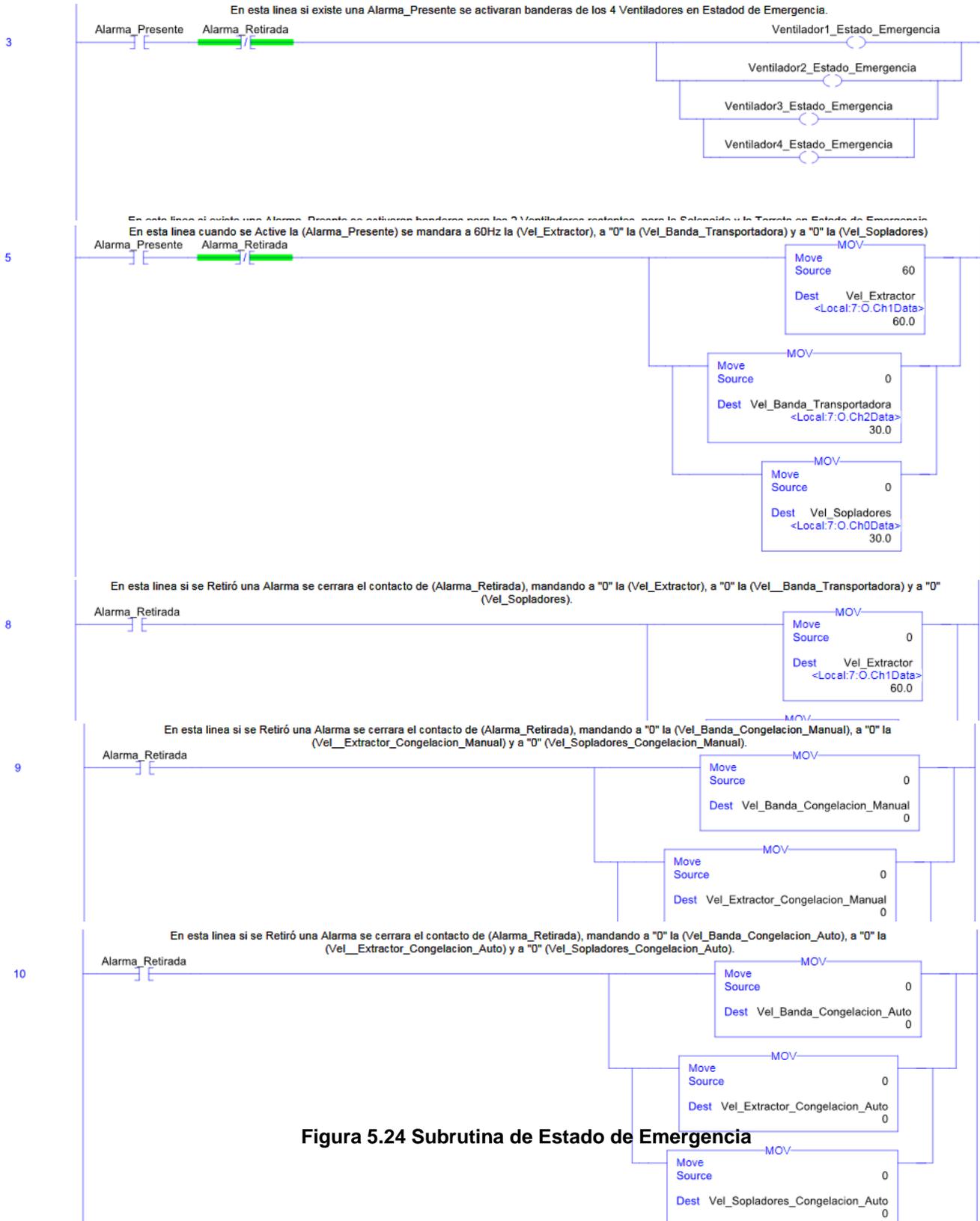


Figura 5.24 Subrutina de Estado de Emergencia



5.2.12.2 Interfaz con el Usuario

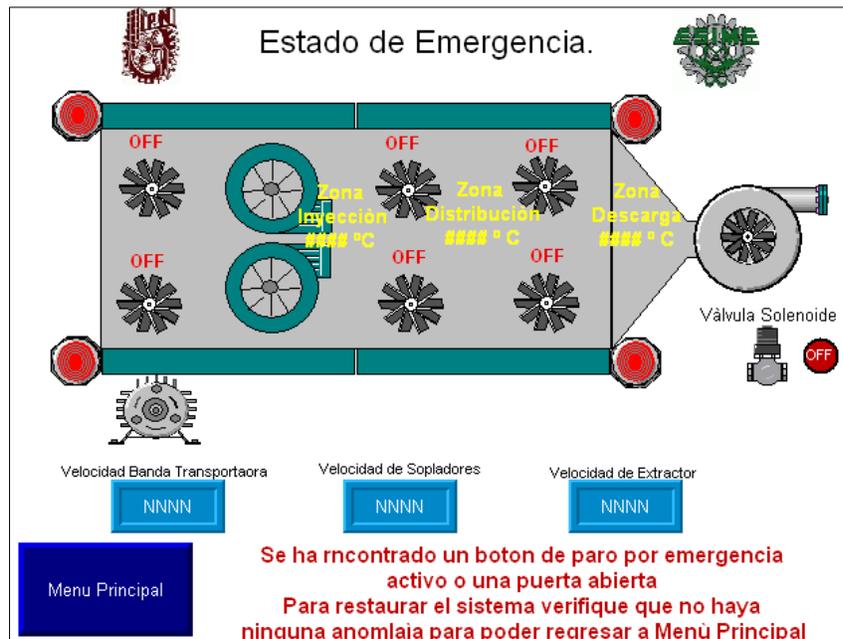


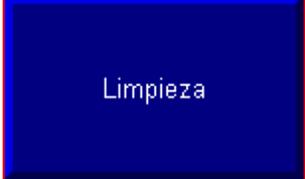
Figura 5.25 Pantalla de Estado de Emergencia



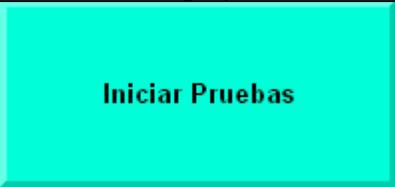
Tabla 13. Parámetros de los Objetos de la HMI
PARÁMETROS DE LOS OBJETOS DE LA HMI

Imagen	Tag Asociado	Animación	Ubicación	Descripción
 Go to display button	No aplica	No aplica	<ul style="list-style-type: none">• Bienvenida	Botón Goto en Pantalla de Bienvenida que permite acceder a la pantalla de Menú Principal
 Shut down button	No aplica	No aplica	<ul style="list-style-type: none">• Bienvenida	Botón que permite salir de la aplicación
 Momentary push button	Boton_Mantenimiento	No aplica	<ul style="list-style-type: none">• Menú Principal	Botón que permite elegir el Algoritmo de Mantenimiento
 Momentary push button	Boton_Operar	No aplica	<ul style="list-style-type: none">• Menú Principal	Botón que permite elegir el Algoritmo de Operaciones

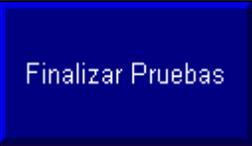
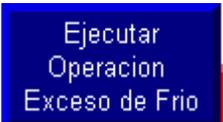


 Go to display button	No aplica	Visibilidad	<ul style="list-style-type: none">• Menú Principal	Goto que permite acceder a la pantalla de Menú de Mantenimiento . Es visible cuando se eligió la opción Mantenimiento
 Go to display button	No aplica	Visibilidad	<ul style="list-style-type: none">• Menú Principal	Goto que permite acceder a la pantalla de Menú de Operaciones . Es visible cuando se eligió la opción Operar
 Go to display button	No aplica	No Aplica	<ul style="list-style-type: none">• Menú Principal	Goto que permite acceder a la pantalla de Bienvenida
 Momentary push button	Boton_Limpieza	No Aplica	<ul style="list-style-type: none">• Menú Mantenimiento	Botón que permite elegir el Algoritmo de Limpieza

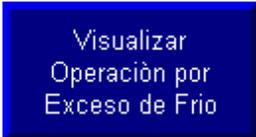


 Momentary push button	Boton_Pruebas	No aplica	<ul style="list-style-type: none">• Menú Mantenimiento	Botón que permite elegir el Algoritmo de Pruebas de Funcionamiento
 Go to display button	No aplica	Visibilidad	<ul style="list-style-type: none">• Menú Mantenimiento	Goto que permite acceder a la pantalla de Limpieza . Es visible cuando se eligió la opción Limpieza.
 Go to display button	No aplica	Visibilidad	<ul style="list-style-type: none">• Menú Mantenimiento	Goto que permite acceder a la pantalla de Pruebas de Funcionamiento . Es visible cuando se eligió la opción Pruebas.
 Go to display button	No aplica	No Aplica	<ul style="list-style-type: none">• Menú Mantenimiento• Estado de Emergencia<ul style="list-style-type: none">• Finalizar• Operaciones	Goto que permite acceder a la pantalla de Menú Principal
 Go to display button	No aplica	Visibilidad	<ul style="list-style-type: none">• Pruebas de Funcionamiento• Túnel en Limpieza	Goto que permite acceder a la pantalla de Menú Mantenimiento . Es visible siempre y cuando las velocidades de los motores sean



				cero.
 Momentary push button	Finalizar_Pruebas	No Aplica	<ul style="list-style-type: none">• Pruebas de Funcionamiento	Botón que permite Finalizar el Algoritmo de Pruebas. Coloca en cero las velocidades de motores.
 Momentary push button	Finalizar_Limpieza	No Aplica	<ul style="list-style-type: none">• Túnel en Limpieza	Botón que permite Finalizar el Algoritmo de Limpieza. Coloca en cero las velocidades de motores.
 Momentary push button	Boton_Conf_Ejec_Algor_Exceso_Frio	Visibilidad	<ul style="list-style-type: none">• Operaciones	Botón que permite ejecutar el Algoritmo de Operación por Exceso de Frio. Es visible cuando el rango de temperatura sea el adecuado.
 Momentary push button	Boton_Conf_Ejec_Algor_Arr_Auto	Visibilidad	<ul style="list-style-type: none">• Operaciones	Botón que permite ejecutar el Algoritmo de Operación de Arranque Automático. Es visible cuando el rango de temperatura sea el adecuado
 Momentary push button	Boton_Conf_Ejec_Algor_Congelacion	Visibilidad	<ul style="list-style-type: none">• Operaciones	Botón que permite ejecutar el Algoritmo de Operación de Congelación. Es visible

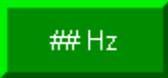


				cuando el rango de temperatura sea el adecuado
 Go to display button	No aplica	Visibilidad	<ul style="list-style-type: none">Operaciones	Goto que permite acceder a la pantalla de Operación por Exceso de Frio . Es visible siempre y cuando se ejecute el algoritmo correspondiente.
 Go to display button	No aplica	Visibilidad	<ul style="list-style-type: none">Operaciones	Goto que permite acceder a la pantalla de Operación por Arranque Automático . Es visible siempre y cuando se ejecute el algoritmo correspondiente.
 Go to display button	No aplica	Visibilidad	<ul style="list-style-type: none">Operaciones	Goto que permite acceder a la pantalla de Operación de Congelación . Es visible siempre y cuando se ejecute el algoritmo correspondiente.

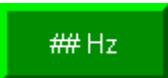


 Manual Momentary push button	Boton_Congelacion_Manual	No Aplica	<ul style="list-style-type: none">• Menú Congelación	Botón que permite ejecutar el Algoritmo de Operación de Congelación Manual.
 Automático Momentary push button	Boton_Congelacion_Automático	No Aplica	<ul style="list-style-type: none">• Menú Congelación	Botón que permite ejecutar el Algoritmo de Operación de Congelación Automático
 Ver Congelación Automática Go to display button	No aplica	Visibilidad	<ul style="list-style-type: none">• Menú Congelación	Goto que permite acceder a la pantalla de Operación de Congelación Automática . Es visible cuando se eligió la opción Congelación Automática.
 Ver Congelación Manual Go to display button	No aplica	Visibilidad	<ul style="list-style-type: none">• Menú Congelación	Goto que permite acceder a la pantalla de Operación de Congelación Manual . Es visible cuando se eligió la opción Congelación Automática.



 Cambiar Modo de Congelaciòn Go to display button	No aplica	No Aplica	<ul style="list-style-type: none">• Congelaciòn Automática• Congelaciòn Manual	Goto que permite acceder a la pantalla de Operaciòn de Congelaciòn
 FINALIZAR Go to display button	No aplica	No Aplica	<ul style="list-style-type: none">• Congelaciòn Automática• Congelaciòn Manual	Goto que permite acceder a la pantalla de Finalizaciòn.
 Iniciar Finalizaciòn Momentary push button	Boton_Finalizar	No Aplica	<ul style="list-style-type: none">• Finalizar	Botòn que permite ejecutar el Algoritmo de Finalizaciòn.
 #### °C Numeric input enable	Set_Point	No Aplica	<ul style="list-style-type: none">• Operaciones	Permite ingresar el valor de Set Point de Temperatura
 ## Hz Numeric input enable	Vel_Banda_Congelacion_Manual	No Aplica	<ul style="list-style-type: none">• Congelaciòn Automática• Congelaciòn Manual<ul style="list-style-type: none">• Pruebas de Funcionamiento• Túnel en Limpieza	Permite ingresar el valor de velocidad de la banda transportadora cuando se congele de forma manual.
 ## Hz Numeric input enable	Vel_Banda_Congelacion_Automatico	No Aplica	<ul style="list-style-type: none">• Congelaciòn Automática• Congelaciòn Manual<ul style="list-style-type: none">• Pruebas de Funcionamiento• Túnel en Limpieza	Permite ingresar el valor de velocidad de la banda transportadora cuando se congele de forma automática.



 Numeric input enable	Vel_Banda_Limpieza	No Aplica	<ul style="list-style-type: none">• Congelación Automática• Congelación Manual<ul style="list-style-type: none">• Pruebas de Funcionamiento• Túnel en Limpieza	Permite ingresar el valor de velocidad de la banda transportadora cuando se limpie el túnel.
 Numeric input enable	Vel_Banda_Pruebas	No Aplica	<ul style="list-style-type: none">• Congelación Automática• Congelación Manual<ul style="list-style-type: none">• Pruebas de Funcionamiento• Túnel en Limpieza	Permite ingresar el valor de velocidad de la banda transportadora cuando se hagan pruebas de funcionamiento del túnel.
 Numeric input enable	Vel_Extractor_Congelacion_Manual	No Aplica	<ul style="list-style-type: none">• Congelación Manual<ul style="list-style-type: none">• Pruebas de Funcionamiento	Permite ingresar el valor de velocidad del extractor cuando se congele de forma manual.
 Numeric input enable	Vel_Extractor_Pruebas	No Aplica	<ul style="list-style-type: none">• Congelación Manual<ul style="list-style-type: none">• Pruebas de Funcionamiento	Permite ingresar el valor de velocidad del extractor cuando se hagan pruebas de funcionamiento del túnel.
 Numeric input enable	Vel_Sopladores_Congelacion_Manual	No Aplica		Permite ingresar el valor de velocidad de los sopladores cuando se congele de forma manual.



 Numeric input enable	Vel_Sopladores_Pru ebas	No Aplica	<ul style="list-style-type: none">• Congelación Manual<ul style="list-style-type: none">• Pruebas de Funcionamiento	Permite ingresar el valor de velocidad de los sopladores cuando se hagan pruebas de funcionamiento del túnel.
 Numeric Display	Vel_Banda_Transpor tadora	No Aplica	<ul style="list-style-type: none">• Estado de Emergencia de Mantenimiento• Estado de Emergencia• Operación Por exceso de Frio<ul style="list-style-type: none">• Finalizar	Permite observar el valor de velocidad de la banda transportadora
 Numeric Display	Vel_Extractor	No Aplica	<ul style="list-style-type: none">• Estado de Emergencia de Mantenimiento• Estado de Emergencia• Operación Por exceso de Frio<ul style="list-style-type: none">• Finalizar• Túnel en Limpieza	Permite observar el valor de velocidad del extractor
 Numeric Display	Vel_Sopladores	No Aplica	<ul style="list-style-type: none">• Estado de Emergencia de Mantenimiento• Estado de Emergencia• Operación Por exceso de Frio<ul style="list-style-type: none">• Finalizar• Túnel en Limpieza	Permite observar el valor de velocidad de los sopladores
	Set_Point	No Aplica	<ul style="list-style-type: none">• Congelación Manual• Congelación Automática	Permite observar el valor del Set Point



Numeric Display			<ul style="list-style-type: none">Operación por exceso de Frio	elegido
 Numeric Display	Error_1	No Aplica	<ul style="list-style-type: none">Operaciones	Permite observar el valor del error calculado.
 Numeric Display	RTDPT100_1	No Aplica	<ul style="list-style-type: none">Operaciones	Permite observar el valor de la temperatura actual zona inyección.
 Numeric display	Tempo1_15min	No Aplica	<ul style="list-style-type: none">Finalizar	Permite observar el valor de tiempo restante cuando se finaliza la operación de congelación manual.
 Numeric display	Tempo2_15min	No Aplica	<ul style="list-style-type: none">Finalizar	Permite observar el valor de tiempo restante cuando se finaliza la operación de congelación automático.
 Text	RTDPT100_1	No Aplica	<ul style="list-style-type: none">Congelación AutomáticaCongelación ManualOperación Arranque AutomáticoEstado de EmergenciaOperación Por Exceso de FrioOperaciones	Permite observar el valor de la temperatura actual zona inyección.



 <p>Zona Distribución #### ° C Text</p>	RTDPT100_2	No Aplica	<ul style="list-style-type: none">• Congelación Automática• Congelación Manual• Operación Arranque Automático• Estado de Emergencia• Operación Por Exceso de Frio<ul style="list-style-type: none">• Operaciones	Permite observar el valor de la temperatura actual zona distribución.
 <p>Zona Descarga #### ° C Text</p>	RTDPT100_3	No Aplica	<ul style="list-style-type: none">• Congelación Automática• Congelación Manual• Operación Arranque Automático• Estado de Emergencia• Operación Por Exceso de Frio<ul style="list-style-type: none">• Operaciones	Permite observar el valor de la temperatura actual zona descarga.
 <p>Indicador</p>	Boton_Paro1	Visibilidad	<ul style="list-style-type: none">• Estado de Emergencia<ul style="list-style-type: none">• Finalizar• Estado de Emergencia Mantenimiento• Túnel en Limpieza<ul style="list-style-type: none">• Pruebas de Funcionamiento• Operaciones• Operación por Exceso de	Indicador por botón de paro 1 no presionado



			<p>Frio</p> <ul style="list-style-type: none">• Operación Arranque Automático• Congelación Manual• Congelación Automática	
 <p>Indicador</p>	Boton_Paro1	Visibilidad	<ul style="list-style-type: none">• Estado de Emergencia<ul style="list-style-type: none">• Finalizar• Estado de Emergencia Mantenimiento• Túnel en Limpieza<ul style="list-style-type: none">• Pruebas de Funcionamiento• Operaciones• Operación por Exceso de Frio• Operación Arranque Automático• Congelación Manual• Congelación Automática	Indicador por botón de paro 1 presionado
 <p>Indicador</p>	Boton_Paro2	Visibilidad	<ul style="list-style-type: none">• Estado de Emergencia<ul style="list-style-type: none">• Finalizar• Estado de Emergencia Mantenimiento• Túnel en Limpieza<ul style="list-style-type: none">• Pruebas de Funcionamiento• Operaciones	Indicador por botón de paro 2 no presionado



			<ul style="list-style-type: none">• Operación por Exceso de Frio• Operación Arranque Automático• Congelación Manual• Congelación Automática	
 Indicador	Boton_Paro2	Visibilidad	<ul style="list-style-type: none">• Estado de Emergencia<ul style="list-style-type: none">• Finalizar• Estado de Emergencia Mantenimiento<ul style="list-style-type: none">• Túnel en Limpieza<ul style="list-style-type: none">• Pruebas de Funcionamiento• Operaciones• Operación por Exceso de Frio• Operación Arranque Automático• Congelación Manual• Congelación Automática	Indicador por botón de paro 2 presionado
 Indicador	Boton_Paro3	Visibilidad	<ul style="list-style-type: none">• Estado de Emergencia<ul style="list-style-type: none">• Finalizar• Estado de Emergencia Mantenimiento<ul style="list-style-type: none">• Túnel en Limpieza<ul style="list-style-type: none">• Pruebas de Funcionamiento• Operaciones	Indicador por botón de paro 3 no presionado

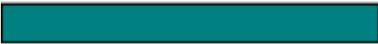
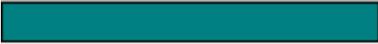


			<ul style="list-style-type: none">• Operación por Exceso de Frio• Operación Arranque Automático• Congelación Manual• Congelación Automática	
 Indicador	Boton_Paro3	Visibilidad	<ul style="list-style-type: none">• Estado de Emergencia<ul style="list-style-type: none">• Finalizar• Estado de Emergencia Mantenimiento• Túnel en Limpieza<ul style="list-style-type: none">• Pruebas de Funcionamiento• Operaciones• Operación por Exceso de Frio• Operación Arranque Automático• Congelación Manual• Congelación Automática	Indicador por botón de paro 3 presionado
 Indicador	Boton_Paro4	Visibilidad	<ul style="list-style-type: none">• Estado de Emergencia<ul style="list-style-type: none">• Finalizar• Estado de Emergencia Mantenimiento• Túnel en Limpieza<ul style="list-style-type: none">• Pruebas de Funcionamiento	Indicador por botón de paro 4 no presionado

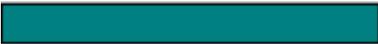


			<ul style="list-style-type: none">• Operaciones• Operación por Exceso de Frio• Operación Arranque Automático• Congelación Manual• Congelación Automática	
 Indicador	Boton_Paro4	Visibilidad	<ul style="list-style-type: none">• Estado de Emergencia<ul style="list-style-type: none">• Finalizar• Estado de Emergencia Mantenimiento• Túnel en Limpieza<ul style="list-style-type: none">• Pruebas de Funcionamiento• Operaciones• Operación por Exceso de Frio• Operación Arranque Automático• Congelación Manual• Congelación Automática	Indicador por botón de paro 4 presionado
 Imagen puerta	Interruptor_Pta_1	Color	<ul style="list-style-type: none">• Estado de Emergencia<ul style="list-style-type: none">• Finalizar• Estado de Emergencia Mantenimiento• Túnel en Limpieza<ul style="list-style-type: none">• Pruebas de	Indicador del estado de la puerta 1



			<p>Funcionamiento</p> <ul style="list-style-type: none">• Operaciones• Operación por Exceso de Frio• Operación Arranque Automático• Congelación Manual• Congelación Automática	
 Imagen puerta	Interruptor_Pta_2	Color	<ul style="list-style-type: none">• Estado de Emergencia<ul style="list-style-type: none">• Finalizar• Estado de Emergencia Mantenimiento• Túnel en Limpieza<ul style="list-style-type: none">• Pruebas de Funcionamiento• Operaciones• Operación por Exceso de Frio• Operación Arranque Automático• Congelación Manual• Congelación Automática	Indicador del estado de la puerta 2
 Imagen puerta	Interruptor_Pta_3	Color	<ul style="list-style-type: none">• Estado de Emergencia<ul style="list-style-type: none">• Finalizar• Estado de Emergencia Mantenimiento• Túnel en Limpieza	Indicador del estado de la puerta 3



			<ul style="list-style-type: none">• Pruebas de Funcionamiento• Operaciones• Operación por Exceso de Frio• Operación Arranque Automático• Congelación Manual• Congelación Automática	
 Imagen puerta	Interruptor_Pta_4	Color	<ul style="list-style-type: none">• Estado de Emergencia<ul style="list-style-type: none">• Finalizar• Estado de Emergencia Mantenimiento• Túnel en Limpieza<ul style="list-style-type: none">• Pruebas de Funcionamiento• Operaciones• Operación por Exceso de Frio• Operación Arranque Automático• Congelación Manual• Congelación Automática	Indicador del estado de la puerta 4
 Imagen motor	Ventilador_1	Rotación	<ul style="list-style-type: none">• Estado de Emergencia<ul style="list-style-type: none">• Finalizar• Estado de Emergencia Mantenimiento	Imagen del estado del ventilador 1



			<ul style="list-style-type: none">• Túnel en Limpieza<ul style="list-style-type: none">• Pruebas de Funcionamiento• Operaciones• Operación por Exceso de Frio• Operación Arranque Automático• Congelación Manual• Congelación Automática	
 Momentary push button	<ul style="list-style-type: none">• Bot_Arranque_Cong_Man_Ven1• Bot_Arranque_Prueba_Ven1	No Aplica	<ul style="list-style-type: none">• Congelación Manual<ul style="list-style-type: none">• Pruebas de Funcionamiento	Botón que permite arrancar al Ventilador 1
 Momentary push button	<ul style="list-style-type: none">• Bot_Paro_Cong_Man_Ven1• Bot_Paro_Prueba_Ven1	No Aplica	<ul style="list-style-type: none">• Congelación Manual<ul style="list-style-type: none">• Pruebas de Funcionamiento	Botón que permite parar al Ventilador 1
 Imagen motor	Ventilador_2	Rotación	<ul style="list-style-type: none">• Estado de Emergencia<ul style="list-style-type: none">• Finalizar• Estado de Emergencia Mantenimiento• Túnel en Limpieza<ul style="list-style-type: none">• Pruebas de Funcionamiento• Operaciones	Imagen del estado del ventilador 2



			<ul style="list-style-type: none">• Operación por Exceso de Frio• Operación Arranque Automático• Congelación Manual• Congelación Automática	
 Momentary push button	<ul style="list-style-type: none">• Bot_Arranque_Cong_Man_Ven2• Bot_Arranque_Prueba_Ven2	No Aplica	<ul style="list-style-type: none">• Congelación Manual<ul style="list-style-type: none">• Pruebas de Funcionamiento	Botón que permite arrancar al Ventilador 2
 Momentary push button	<ul style="list-style-type: none">• Bot_Paro_Cong_Man_Ven2• Bot_Paro_Prueba_Ven2	No Aplica	<ul style="list-style-type: none">• Congelación Manual<ul style="list-style-type: none">• Pruebas de Funcionamiento	Botón que permite parar al Ventilador 2
 Imagen motor	Ventilador_3	Rotación	<ul style="list-style-type: none">• Estado de Emergencia<ul style="list-style-type: none">• Finalizar• Estado de Emergencia Mantenimiento• Túnel en Limpieza<ul style="list-style-type: none">• Pruebas de Funcionamiento• Operaciones• Operación por Exceso de Frio	Imagen del estado del Ventilador 3



			<ul style="list-style-type: none">• Operación Arranque Automático• Congelación Manual• Congelación Automática	
 Momentary push button	<ul style="list-style-type: none">• Bot_Arranque_Cong_Man_Ven3• Bot_Arranque_Prueba_Ven3	No Aplica	<ul style="list-style-type: none">• Congelación Manual<ul style="list-style-type: none">• Pruebas de Funcionamiento	Botón que permite arrancar al Ventilador 3
 Momentary push button	<ul style="list-style-type: none">• Bot_Paro_Cong_Man_Ven3• Bot_Paro_Prueba_Ven3	No Aplica	<ul style="list-style-type: none">• Congelación Manual<ul style="list-style-type: none">• Pruebas de Funcionamiento	Botón que permite parar al Ventilador 3
 Imagen motor	Ventilador_4	Rotación	<ul style="list-style-type: none">• Estado de Emergencia<ul style="list-style-type: none">• Finalizar• Estado de Emergencia Mantenimiento<ul style="list-style-type: none">• Túnel en Limpieza<ul style="list-style-type: none">• Pruebas de Funcionamiento• Operaciones• Operación por Exceso de Frio• Operación Arranque Automático	Imagen del estado del Ventilador 4



			<ul style="list-style-type: none">• Congelación Manual• Congelación Automática	
 Momentary push button	<ul style="list-style-type: none">• Bot_Arranque_Cong_Man_Ven4• Bot_Arranque_Prueba_Ven4	No Aplica	<ul style="list-style-type: none">• Congelación Manual<ul style="list-style-type: none">• Pruebas de Funcionamiento	Botón que permite arrancar al Ventilador 4
 Momentary push button	<ul style="list-style-type: none">• Bot_Paro_Cong_Man_Ven4• Bot_Paro_Prueba_Ven4	No Aplica	<ul style="list-style-type: none">• Congelación Manual<ul style="list-style-type: none">• Pruebas de Funcionamiento	Botón que permite parar al Ventilador 4
 Imagen motor	Ventilador_5	Rotación	<ul style="list-style-type: none">• Estado de Emergencia<ul style="list-style-type: none">• Finalizar• Estado de Emergencia Mantenimiento• Túnel en Limpieza<ul style="list-style-type: none">• Pruebas de Funcionamiento• Operaciones• Operación por Exceso de Frio• Operación Arranque Automático	Imagen del estado del Ventilador 5

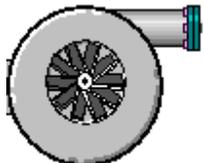


			<ul style="list-style-type: none">• Congelación Manual• Congelación Automática	
 Momentary push button	<ul style="list-style-type: none">• Bot_Arranque_Cong_Man_Ven5• Bot_Arranque_Prueba_Ven5	No Aplica	<ul style="list-style-type: none">• Congelación Manual<ul style="list-style-type: none">• Pruebas de Funcionamiento	Botón que permite arrancar al Ventilador 5
 Momentary push button	<ul style="list-style-type: none">• Bot_Paro_Cong_Man_Ven5• Bot_Paro_Prueba_Ven5	No Aplica	<ul style="list-style-type: none">• Congelación Manual<ul style="list-style-type: none">• Pruebas de Funcionamiento	Botón que permite parar al Ventilador 5
 Imagen motor	Ventilador_6	Rotación	<ul style="list-style-type: none">• Estado de Emergencia<ul style="list-style-type: none">• Finalizar• Estado de Emergencia Mantenimiento• Túnel en Limpieza<ul style="list-style-type: none">• Pruebas de Funcionamiento• Operaciones• Operación por Exceso de Frio• Operación Arranque Automático• Congelación Manual• Congelación Automática	Imagen del estado del Ventilador 6
	<ul style="list-style-type: none">• Bot_Arranque_Cong_Man_V	No Aplica	<ul style="list-style-type: none">• Congelación Manual<ul style="list-style-type: none">• Pruebas de	Botón que permite arrancar al Ventilador 6



Momentary push button	en6 <ul style="list-style-type: none">• Bot_Arranque_Prueba_Ven6		Funcionamiento	
 Momentary push button	<ul style="list-style-type: none">• Bot_Paro_Con g_Man_Ven6• Bot_Paro_Prueba_Ven6	No Aplica	<ul style="list-style-type: none">• Congelación Manual<ul style="list-style-type: none">• Pruebas de Funcionamiento	Botón que permite parar al Ventilador 6
 Imagen Soplador	Vel_Sopladores	Rotación	<ul style="list-style-type: none">• Estado de Emergencia<ul style="list-style-type: none">• Finalizar• Estado de Emergencia Mantenimiento• Túnel en Limpieza<ul style="list-style-type: none">• Pruebas de Funcionamiento• Operaciones• Operación por Exceso de Frio• Operación Arranque Automático• Congelación Manual• Congelación Automática	Imagen del estado del Soplador 1
 Imagen Soplador	Vel_Sopladores	Rotación	<ul style="list-style-type: none">• Estado de Emergencia<ul style="list-style-type: none">• Finalizar• Estado de Emergencia Mantenimiento• Túnel en Limpieza<ul style="list-style-type: none">• Pruebas de Funcionamiento• Operaciones	Imagen del estado del Soplador 2

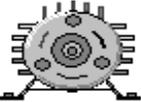


			<ul style="list-style-type: none">• Operación por Exceso de Frio• Operación Arranque Automático• Congelación Manual• Congelación Automática	
 <p>Imagen extractor</p>	Vel_Extractor	Rotación	<ul style="list-style-type: none">• Estado de Emergencia<ul style="list-style-type: none">• Finalizar• Estado de Emergencia Mantenimiento• Túnel en Limpieza<ul style="list-style-type: none">• Pruebas de Funcionamiento• Operaciones• Operación por Exceso de Frio• Operación Arranque Automático• Congelación Manual• Congelación Automática	Imagen del estado del Extractor
 <p>Imagen válvula</p>	No Aplica	No Aplica	<ul style="list-style-type: none">• Estado de Emergencia<ul style="list-style-type: none">• Finalizar• Estado de Emergencia Mantenimiento• Túnel en Limpieza<ul style="list-style-type: none">• Pruebas de Funcionamiento	Imagen de Válvula Solenoide



			<ul style="list-style-type: none">• Operaciones• Operación por Exceso de Frio• Operación Arranque Automático• Congelación Manual• Congelación Automática	
 Multistate indicator ON/OFF	Valvula_Solenoide	No Aplica	<ul style="list-style-type: none">• Estado de Emergencia<ul style="list-style-type: none">• Finalizar• Estado de Emergencia Mantenimiento• Túnel en Limpieza<ul style="list-style-type: none">• Pruebas de Funcionamiento• Operaciones• Operación por Exceso de Frio• Operación Arranque Automático• Congelación Manual• Congelación Automática	Indicadores que permiten observar el estado de la Válvula Solenoide
 Momentary push button	<ul style="list-style-type: none">• Bot_Arranque_Cong_Man_Solenoide• Bot_Arranque_Solenoide	No Aplica	<ul style="list-style-type: none">• Congelación Manual<ul style="list-style-type: none">• Pruebas de Funcionamiento	Botón que permite arrancar a la Válvula Solenoide



 Momentary push button	<ul style="list-style-type: none">• Bot_Paro_Con g_Man_Soleno ide• Bot_Paro_Prue ba_Solenoide	No Aplica	<ul style="list-style-type: none">• Congelación Manual<ul style="list-style-type: none">• Pruebas de Funcionamiento	Botón que permite parar a la Válvula Solenoide
 Imagen motor	No Aplica	No Aplica	<ul style="list-style-type: none">• Estado de Emergencia<ul style="list-style-type: none">• Finalizar• Estado de Emergencia Mantenimiento• Túnel en Limpieza<ul style="list-style-type: none">• Pruebas de Funcionamiento• Operaciones• Operación por Exceso de Frio• Operación Arranque Automático• Congelación Manual• Congelación Automática	Imagen de Motor de Banda Transportadora
 Go to display button	Alarma_Presente	Visibilida d	<ul style="list-style-type: none">• Arranque Automático<ul style="list-style-type: none">• Bienvenida• Congelación Automática• Congelación Manual<ul style="list-style-type: none">• Finalizar• Menú Congelación• Menú Mantenimiento<ul style="list-style-type: none">• Menú Principal• Operación por Exceso de Frio	Goto que permite acceder a la pantalla de Alarma Presente . Es visible cuando se ha accionado una alarma.



			<ul style="list-style-type: none">• Operaciones	
 Go to display button	Alarma_Presente_Mantenimiento	Visibilidad	<ul style="list-style-type: none">• Pruebas de Funcionamiento• Túnel en Limpieza	Goto que permite acceder a la pantalla de Alarma Presente en Mantenimiento . Es visible cuando se ha accionado una alarma en Mantenimiento.
 Go to display button	RTDPT100_1	Visibilidad	<ul style="list-style-type: none">• Exceso Frio• Arranque Automático	Goto que permite acceder a la pantalla de Menú de Operaciones . Es visible cuando se ha alcanzado los rangos de congelación adecuados.



CAPÍTULO 6

Costo del Proyecto

Es importante conocer cuánto se deberá de invertir para llevar a cabo el proyecto de automatización con el fin de que ITUMI INSTALACIONES o alguna otra empresa analice la viabilidad del proyecto.

Para ello se presenta una cotización que engloba toda la propuesta de automatización para el Túnel Criogénico, esta propuesta está dividida en dos partes que se describen a continuación:

6.1 CATÁLOGO DE CONCEPTO

En la Tabla 12 se muestra el catálogo de concepto donde se enuncia la descripción técnica de todos los elementos que conforman la automatización del Túnel Criogénico, la cantidad que se ocupara de cada uno de ellos, la unidad en que se podrán comprar, su precio de lista, el importe por cada uno y el total.

Tabla 14. Cotización de los Elementos



N°	CONCEPTO	CANT	UNID	PRECIO DE LISTA	IMPORTE
1	Sensor de Temperatura PT100 3 hilos con vaina 30cm. Sin Marca	3	Pieza	\$999.00	\$2,997.00
2	Botones tipo Hongo de paro por Emergencia Marca G&V Electric	4.00	Pieza	\$88.94	\$355.76
3	Interruptores de posición Marca Allen Bradley No. 801 de propósito general	4.00	Pieza	\$2,580.0	\$10,320.0
4	Micro Drive VS1MD21 Marca Baldor	1.00	Pieza	\$6324.61	\$6,324.61
5	Micro Drive VS1MD25 Marca Baldor	2.00	Pieza	\$11,719.1	\$23,438.26
6	Motor trifásico 2 HP Modelo: VWDM3558 Marca Baldor	2.00	Pieza	\$10,269.4	\$20,538.86
7	Motor trifásico 1HP Modelo: VWDM3546 Marca Baldor	7.00	Pieza	\$9,178.99	\$64,252.93
8	Motor Trifásico 5HP Modelo: VWDM3615T Marca Baldor	1.00	Pieza	\$18,496	\$18,496.02
9	Lámparas Piloto Modelo CL-502G Marca ABB	5.00	Pieza	\$242	\$1,210
10	Torreta de aviso Marca ABB tipo KL70-401R	1.00	Pieza	\$586.56	\$586.56
11	Foco: BA15D 5W	1.00	Pieza	\$112.23	\$112.23
12	Válvula proporcional BAUMANN 24577	1.00	Pieza	\$3,870	\$3,870
13	Válvula Solenoide de dos vías a 220 VCA Marca Magnatrol	1.00	Pieza	\$1,290	\$1,290
14	Transductor de presión STD 5000 de la marca Termo Electron Corporation	1.00	Pieza	\$8,810.07	\$8,810.07
15	Cable 14 AWG aislamiento TW	50.00	metro	\$3.95	\$197.5
16	Cable 12 AWG aislamiento TW	50.00	metro	\$5.87	\$293.5
17	Cable 8 AWG aislamiento TW	10.00	metro	\$15.00	\$150.00
18	Cable 16 AWG aislamiento TW	20.00	metro	\$2.78	\$55.6
19	Interruptor termomagnético S203U-K5 marca ABB	6.00	piezas	\$367.76	\$2,206.00
20	Interruptor termomagnético S203U-K30 marca ABB	2.00	pieza	\$386.40	\$772.8
21	Interruptor termomagnético S203U-K0.5 marca ABB	1.00	pieza	\$386.40	\$386.40
22	Interruptor General seccionador de la marca SIEMENS 3LD2704-0TK53	1.00	pieza	\$1,096.75	\$1,096.75
23	Interruptor termomagnético de 63 A de la marca ABB S203U-K63	1.00	pieza	\$493.76	\$493.76
24	Relevador contactor de la marca SIEMENS Sirius 3RT1015-1AP61	6.00	Pieza	\$189.49	\$1,136.94
25	Relevador térmico de sobrecarga de la marca SIEMENS Sirius 3RU1116-1FB0	6.00	Pieza	\$287.12	\$1722.72



26	Clema PortaFusible Calibre 12 Marca Legrand	5.00	Pieza	\$29.71	\$148.55
27	Clemas Calibre 12 Marca Legrand	93.00	Pieza	\$6.73	\$625.89
28	Clemas PortaFusible Calibre 8 Marca Legrand	2.00	Pieza	\$29.71	\$59.42
29	Clemas Calibre 8 Marca Legrand	29.00	Pieza	\$10.38	\$301.02
30	Canaleta plastica ranurada 60mm x 80mm	10.00	Metro	\$146.76	\$1,467.6
31	Riel Din	4.00	Metro	\$33.00	\$132.00
32	Peines de Interconexion Lateral Calibre 12 Legrand	1.00	Tira	\$25.85	\$25.85
33	Peines de Interconexion Lateral Calibre 8 Legrand	1.00	Tira	\$42.17	\$42.17
34	Placas de Separación para clema calibre 12 Marca Legrand	30.00	Pieza	\$5.94	\$178.2
35	Placas de Separación para clema calibre 8 Marca Legrand	3.00	Pieza	\$5.94	\$17.82
36	Placas de Separación para clema portafusible calibre 8	2.00	Pieza	\$5.94	\$11.88
37	Fusible Tipo Americano 250mA	3.00	Pieza	\$2.50	\$7.50
38	Fusible Tipo Americano 500mA	1.00	Pieza	\$2.50	\$2.50
39	Fusible Tipo Americano 1A	1.00	Pieza	\$2.50	\$2.50
40	Fusible Tipo Americano 1.5A	2.00	Pieza	\$2.50	\$5.00
41	Fusible Tipo Americano 5A	18.00	Pieza	\$2.50	\$45.00
42	PLC Unitronics V570-57-TB20	1.00	Pieza	\$16,738.63	\$16,738.63
43	Módulo de entradas y salidas de modelo V200-18-E3XB	1.00	Pieza	\$6,771.76	\$6,771.76
44	Fuente de Alimentación 24v CD Weidmuller	1.00	Pieza	\$1,128.75	\$1,128.75
TOTAL				\$198,826.31	

6.2 CATÁLOGO DE COSTOS DE INGENIERÍA

En la Tabla 13 se muestra el Catálogo de Ingeniería en donde se engloba a todo el personal que colaboró en la propuesta de automatización para el Túnel Criogénico, así como sus horas de trabajo y el precio por hora que deben de ganar y el importe total.

Tabla 15. Cotización por Horas de Trabajo

N°	PERSONAL	HORAS DE TRABAJO	N° de LAMINAS	N° de CUARTILAS	PRECIO POR LAMINAS	PRECIO POR CUARTILLA	PRECIO POR HORA	IMPORTE
1	Pasante de Ingeniería Oscar	100	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	\$150.00	\$15,000



	Flores							
2	Pasante de Ingeniería Luis Carranza	100	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	\$150.00	\$15,000
3	Pasante de Ingeniería Adrián Ortega	100	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	\$150.00	\$15,000
4	Dibujante	No aplica	4	No aplica	\$500		No aplica	\$2,000
5	Capturista	No aplica	No aplica	165	No aplica	\$10	No aplica	\$1,650
6	Asesor Especialista en Túneles Criogénicos	5	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	\$121.00	\$605
7	Técnico	2	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	\$70.00	\$140
8	Ayudante General	2	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	\$50.00	\$100
TOTAL							\$49,495.00	

La asignación del costo por hora de trabajo para el Asesor Especialista en Túneles Criogénicos, Técnico y Ayudante General fue proporcionada por ITUMI INSTALACIONES.

La asignación del sueldo de los pasantes de ingeniería será de \$150.00 por hora; este valor fue designado en base al mercado laboral.

El costo por lámina dibujada y por cuartilla capturada se asignó por medio del mercado laboral.

De esta forma se obtiene que el costo total de la Automatización es de: **\$248,321.31**

CONCLUSIONES

En base al planteamiento de una propuesta de solución a la pérdida de refrigerante que se observa en el equipo fue posible realizar pruebas experimentales que permitieran el desarrollo de algoritmos de control no existentes en el túnel actual.

Planteados los algoritmos de control fue posible la elección de los nuevos elementos de la automatización y el desarrollo de una nueva filosofía de operación con lo que se logró hacer del túnel un equipo de interacción sencilla. Con los elementos de la automatización y la filosofía de operación se desarrolló el diagrama de instrumentación en el que se plasman los nuevos lazos implementados. Se desarrollaron diagramas eléctricos de fuerza y control con



los que se logró tener documentadas las conexiones a realizar en el tablero de control propuesto.

Fue posible implementar la filosofía de operación mediante una programación en lenguaje escalera de un controlador lógico programable y una interfaz hombre máquina. Debido a que el equipo UNITRONICS propuesto no fue adquirido por ITUMI Instalaciones, se realizó la validación de esta automatización con el equipo disponible en los Laboratorios de la ESIME Zacatenco con el que se logró desarrollar una interfaz adecuada a los requerimientos de la filosofía de operación.

Mediante el planteamiento de una propuesta y a pruebas experimentales realizadas al equipo fue posible el desarrollo de la ingeniería y de una nueva filosofía de operación que permite que el usuario opere el túnel criogénico de una manera sencilla con la utilización de una HMI.

Se encontró una solución a la pérdida de refrigerante por lo que ITUMI Instalaciones puede implementarla en sus equipos actuales.

Recomendaciones

Es pertinente el estudio del tiempo de permanencia de los productos dentro del túnel, pues al tener una base de datos que permita conocer estos tiempos de congelación se podrá manipular la velocidad de la banda de manera automática dependiendo del tipo de producto a congelar. Esta nueva base de datos podría ser incluida dentro de la interfaz hombre máquina.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. L. Soldevilla, *Aplicación del Frio a los Alimentos*, Primera ed., AMV Ediciones & Mundiprensa, 2000.
- [2] J. D. L. Maas, *Tecnologías de la Conservación*, Campeche: Apuntes Instituto Tecnológico Superior de Calkiní.
- [3] Messer, «Messer Gases for Life,» [En línea]. Available: http://www.messer.es/Sectores_y_aplicaciones/Alimentacion/Ultracongelacion_y_refrigeracion/. [Último acceso: 8 Septiembre 2013].
- [4] CRIOYNFRA, *Manual de Operación de Tunel de Congelación Criogénico*, Puebla, 2012.
- [5] Katsuhiko Ogata, *Ingeniería de Control Moderna*, Quinta ed., Pearson, 2010.
- [6] V. M. Alfaro, «Identificación de procesos sobreamortiguados utilizando técnicas de lazo abierto,» [En línea]. Available: http://eie.ucr.ac.cr/uploads/file/documentos/pub_inv/articulos/valfaro01A.pdf. [Último acceso: Marzo 2014].



-
- [7] A. C. Solé, Instrumentación Industrial, Octava ed., Alfaomega, 2011.
- [8] Thermo Electron Corporation, *STD5000 and STD6000 Series Current To Pressure Transducers*, 1998.
- [9] Baldor Electric Company, *VS1MD User Manual*, 2007.
- [10] Emerson Process Management, *Baumann 24000S Stainless Steel Control Valve*, 2013.
- [11] Unitronics, *Vision™ OPLC™ Technical Specifications Models V570-57-T20B & V570-57-T20B-J, V570-57-T40B*.
- [12] Unitronics, *V200-18-E3XB Snap-in I/O Module User Manual*.
- [13] Viakon Conductores Monterrey, *Tablas de Capacidad de Conducción de Corriente*, Tabla 310-17.
- [14] Norma Oficial Mexicana NOM 001 SEDE 2012, *Instalaciones Eléctricas Artículo 430 Motores, Circuitos de motores y sus Controladores*, 2012.
- [15] D. O. Becerril, *Instalaciones Eléctricas Prácticas*, Doceava ed., Capítulo VI Conductores para Instalaciones Eléctricas en Baja Tensión, 2002, pp. 95-98.
- [16] Baldor Electric Company, "Capitulo 4 Power Wiring," in *VSM1D Instruction Manual*, 2007.
- [17] Baldor Electric Company, "4.2 Connecting Peripheral Devices to the VS1MD Drive," in *VS1MD Instruction Manual*, 2007.
- [18] Baldor Electric Company, "Table 4.3 – Circuit Breaker Ratings by Model Number," in *VS1MD Instruction Manual*, 2007.
- [19] Baldor Electric Company, "4.3 Power Terminal Wiring," in *VSM1D Instruction Manual*, 2007.
- [20] Baldor Electric Company, "4.4 Specifications for Power Terminal Block Wiring," in *VS1MD Instruction Manual*, 2007.
- [21] Weidmüller Interface GmbH & Co. KG, Data Sheet INSTA CP SNT 48W 24V 2A.
- [22] Unitronics, "Digital Outputs," in *V200-18-E3XB Snap-in I/O Module*, p. 4.
- [23] Unitronics, "Digital Inputs," in *V200-18-E3XB Snap-in I/O Module*, p.3.



-
- [24] Unitronics, "pnp (source)," in V200-18-E3XB Snap-in I/O Module, p. 11.
- [25] Unitronics, "Analog Outputs," in V200-18-E3XB Snap-in I/O Module.
- [26] Baldor Electric Company, "8.1.3 Frequency Setting via 0 to 10 [V] Input or Terminal Potentiometer," in VS1MD Instruction Manual, 2007.
- [27] Unitronics, "Digital Outputs Power Supply," in V200-18-E3XB Snap-in I/O Module, p. 11.
- [28] Unitronics, "Analog I/O Power Supply," in V200-18-E3XB Snap-in I/O Module, p. 13.
- [29] Unitronics, "Analog / PT100 / TC Inputs," in V200-18-E3XB Snap-in I/O Module, p. 6.