



Automatización del intercambiador de calor CO₂-agua del proceso de deshumificación de la planta industrial de CO₂ de la empresa Linde S.A.

Rodríguez Núñez, Danny Alexander

Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería en Electrónica Automatización y Control

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero en Electrónica, Automatización y Control

Ing. Ortiz Tulcán, Hugo Ramiro, Mgs

11 de marzo del 2021

URKUND

Document Information

Analyzed document	Tesis_Rodríguez_Danny.pdf (D98027808)
Submitted	3/11/2021 9:44:00 PM
Submitted by	Ortiz Tulcán Hugo Ramiro
Submitter email	hrtiz@espe.edu.ec
Similarity	2%
Analysis address	hrtiz.espe@analysis.orkund.com



Sources included in the report

SA	Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE / TESIS_MULTIVAr_GUEVARA_JIMENEZ_10mar2021.pdf Document TESIS_MULTIVAr_GUEVARA_JIMENEZ_10mar2021.pdf (D97878197) Submitted by: wesanchez@espe.edu.ec Receiver: wesanchez.espe@analysis.orkund.com		1
W	URL: https://docplayer.es/88831882-Escuela-politecnica-nacional.html Fetched: 7/24/2020 4:54:22 AM		2
W	URL: https://core.ac.uk/download/pdf/249337805.pdf Fetched: 7/18/2020 10:57:26 AM		1
SA	Tesis_Balon.docx Document Tesis_Balon.docx (D37020212)		1
W	URL: https://docplayer.es/87635062-Escuela-politecnica-del-ejercito.html Fetched: 7/21/2020 1:24:35 PM		1
W	URL: https://core.ac.uk/download/pdf/233005831.pdf Fetched: 7/20/2020 1:14:58 AM		1
SA	TESIS PRESION Y TEMPERATURA AUTOMATICA FINAL.docx Document TESIS PRESION Y TEMPERATURA AUTOMATICA FINAL.docx (D53592019)		1
W	URL: https://biblioteca.utb.edu.co/notas/tesis/0073434.pdf Fetched: 11/25/2019 9:12:53 AM		1
W	URL: https://www.habitatyvivienda.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2019/03/NEC-SB-IE... Fetched: 3/11/2021 9:45:00 PM		1
W	URL: https://publicaciones.fctunca.edu.py/jspui/bitstream/123456789/43/1/PFG_JUAN_RAMON... Fetched: 5/1/2020 12:40:20 AM		1
W	URL: https://www.automation24.es/siemens-sm-1231-rtd-6es7231-5pd32-0xb0 Fetched: 3/11/2021 9:45:00 PM		1
W	URL: https://www.autycom.com/tia-portal-vs-simatic-manager/ Fetched: 3/11/2021 9:45:00 PM		1



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA,
AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL**

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “Automatización del intercambiador de calor CO2-agua del proceso de deshumificación de la planta industrial de CO2 de la empresa Linde S.A.” fue realizado por el señor **Rodríguez Núñez, Danny Alexander** el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 11 de marzo de 2021



Ortiz Tulcán, Hugo Ramiro

CC: 1707721591



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**
**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA AUTOMATIZACIÓN Y
CONTROL**

RESPONSABILIDAD DE AUDITORÍA

Yo **Rodríguez Núñez Danny Alexander** con cédula de ciudadanía n° 1725200792, declaró que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **Automatización del intercambiador de calor CO2-agua del proceso de deshumificación de la planta industrial de CO2 de la empresa Linde S.A.** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 15 de marzo de 2021

Firma

Rodríguez Núñez Danny Alexander

CC.: 1725200792



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA AUTOMATIZACIÓN Y
CONTROL

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Yo **Rodríguez Núñez Danny Alexander** con cédula de ciudadanía n° 1725200792, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **Automatización del intercambiador de calor CO2-agua del proceso de deshumificación de la planta industrial de CO2 de la empresa Linde S.A.** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 15 de marzo de 2021

Firma

.....
Rodríguez Núñez Danny Alexander

CC.: 1725200792

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mi familia por brindarme su apoyo incondicional en todo momento en lo cual lo necesité, especialmente a mis padres que con su paciencia y amor me impulsaron a dar lo mejor de mi cada día. Además, a mis profesores y amigos que con sus consejos y enseñanzas fueron un pilar importante en la culminación de esta etapa tan importante en mi vida gracias de todo corazón.

Danny Alexander Rodríguez Núñez

Agradecimiento

Agradezco a Dios por ser la inspiración para culminar esta meta tan importante en mi vida, luego a mis padres y hermanos por el amor y apoyo incondicional para seguir adelante y lograr esta meta.

Quiero expresar mi gratitud a los docentes especialmente al Mgs. Hugo Ortiz por compartirme sus conocimientos y ser participe en la culminación de este proyecto de titulación, al orientarme y solventar las dudas durante este proceso.

A mis compañeros de aula por darme su amistad, ayuda y consejos para estar en esta instancia tan importante de mi vida.

También agradecer la oportunidad y confianza depositada por parte de Linde Ecuador y todo el equipo de Planta CO2 que con sus enseñanzas colaboraron en el desarrollo de mi proyecto de titulación.

Índice de contenidos

Resultados del Urkund.....	2
Certificación	3
Responsabilidad de auditoría	4
Autorización de publicación.....	4
Dedicatoria.....	6
Agradecimiento.....	7
Índice de contenidos.....	8
Índice de tablas	15
Índice de figuras.....	17
Resumen	23
Abstract.....	24
Capítulo I.....	25
Antecedentes	25
Justificación e importancia	26
Alcance del proyecto	29
Esquemático antes de la automatización del intercambiador de calor	29
Esquemático después de la automatización del intercambiador de calor	30
Objetivos.....	33
Objetivo general	33
Objetivos específicos	33

Capítulo II.....	34
Marco Referencial.....	34
Dióxido de carbono.....	34
Aplicación del CO2.....	34
Proceso de licuefacción de CO2 en Linde Ecuador S.A.....	35
Extracción de CO2 gaseoso de fuentes naturales.....	35
Transportación.....	36
Cuarto de bombeo.....	37
Post Enfriadores.....	37
Deshumificadores.....	38
Compresores.....	39
Sistema precooler.....	39
Torres de secado.....	40
Filtros de piedra.....	40
Condensación.....	41
Almacenamiento.....	41
Distribución.....	42
Proceso de deshumificación.....	43
Deshumificador.....	43
Intercambiador de calor.....	43

	10
Tipos de intercambiadores de calor	43
Tipos de intercambiadores de calor según su construcción.....	44
Tipos de intercambiadores de calor según su operación	46
Automatización industrial de procesos	47
Sensores de temperatura	48
Sensores de presión.....	51
Instrumentos para medir presión.....	51
Válvulas de control	53
Controlador Lógico programable (PLC).....	54
Interfaz hombre-máquina (HMI)	55
Elementos utilizados en la automatización del intercambiador de calor CO2-agua....	57
Capítulo III.....	59
Diseño de hardware.....	59
Requisitos de diseño	59
Arquitectura del sistema.....	60
Diagrama P&ID.....	62
Lógica de control.....	64
Selección de la técnica de control	65
Diseño del subsistema de instrumentación.....	77
Instrumentación de los deshumificadores	77

	11
Instrumentación del intercambiador de calor CO2-agua	78
Selección de sensores de temperatura.....	79
Selección del sensor de presión.....	85
Selección de la válvula de control.....	89
Diseño del subsistema de control.....	91
Determinación de entradas y salidas del controlador.....	92
Diagrama de entradas y salidas	94
Selección del controlador	95
Selección del Controlador Lógico Programable – PLC	96
Controlador Lógico Programable S7 1200 CPU 1214C AC/DC/RELÉ.....	96
Módulos de expansión.....	99
Módulos de salida analógica SB 1232, AQ 1x12 bit	101
Diseño del subsistema de supervisión.....	103
Selección de la HMI.....	103
Características técnicas generales	104
Elementos de maniobra.....	105
Relés.....	105
Paro de emergencia	105
Capítulo IV.....	107
Desarrollo de software	107

Programación del controlador	107
Tabla de asignación de recursos	108
Diagramas de flujo	111
Programación en Tia portal (Totally Integrated Automation)	113
Diseño y programación de HMI's.....	126
Arquitectura y navegación del HMI	127
Pantalla principal Deshumificadores	127
Pantalla Intercambiador	129
Pantalla Curvas	131
Capítulo V.....	132
Implementación.....	132
Diseño del tablero de control	133
Instalación del tablero eléctrico	134
Dimensiones del tablero eléctrico	135
Diagrama esquemático de control del controlador PLC_DESHUMIFICADORES.....	136
Diagrama esquemático de potencia del motor de la bomba de agua	136
Diagrama esquemático de control del controlador PLC_TANQUES	137
Disposición de los elementos	137
Instalación de los sensores de temperatura en los deshumificadores.....	143
Instalación del intercambiador de calor CO2-agua	144

Instalación de tubería de agua.....	145
Instalación de tubería de CO2.....	146
Instalación del intercambiador de calor CO2-agua	147
Integración y conexionado de dispositivos y equipos	147
Cálculo de conductores.....	147
Cálculo de protecciones.....	150
Integración de sensores.....	151
Integración de actuadores	153
Puesta en marcha	154
Parámetros de seguridad.....	155
Parámetros de operación	155
Pasos de funcionamiento del sistema	156
Capítulo VI.....	159
Pruebas y resultados.....	159
Pruebas	159
Pruebas previo a la implementación del intercambiador de calor CO2-agua.....	159
Pruebas del sistema de instrumentación	162
Pruebas de comunicación entre PLC's	162
Pruebas del sistema de control	162
Pruebas del sistema de supervisión.....	163

Resultados.....	164
Consumo energético del compresor Larking	164
Análisis de producción de LIC	167
Análisis Financiero	169
Capítulo VII.....	171
Conclusiones y recomendaciones.....	171
Conclusiones	171
Recomendaciones.....	172
Referencias	172
Anexos.....	176
Anexo A: Manual de usuario.....	176
Anexo B: Características técnicas de los equipos utilizados.....	176

Índice de tablas

Tabla 1	Rangos usuales de operación de dispositivos de medición de temperatura	48
Tabla 2	Campos de medida y exactitud de transductores para medir presión.....	52
Tabla 3	Elementos que se prevén utilizar en la automatización	57
Tabla 4	Regla de sintonía de Zingler Nichols, primer método.....	73
Tabla 5	Condiciones iniciales de funcionamiento del control de temperatura.....	76
Tabla 6	Rango de medición de temperatura de CO2	79
Tabla 7	Medición de temperatura en el intercambiador de calor CO2-agua.....	80
Tabla 8	Ponderaciones y criterios de sensores de temperatura	82
Tabla 9	Matriz de selección del sensor de temperatura	83
Tabla 10	Ponderaciones de criterios de sensores de temperatura.....	86
Tabla 11	Matriz de priorización del sensor de presión.....	87
Tabla 12	Características técnicas del posicionador CMSX Festo	90
Tabla 13	Entradas del controlador PLC_DESHUMIFICADORES.....	92
Tabla 14	Salidas del controlador PLC_DESHUMIFICADORES.....	93
Tabla 15	Entradas de controlador PLC_TANQUES.....	93
Tabla 16	Salida del controlador PLC_TANQUES	94
Tabla 17	Comparación de PLC y DCS	96
Tabla 18	Características técnicas generales del PLC S7 1200.....	97
Tabla 19	Características técnicas generales para la selección del módulo para RTD	101
Tabla 20	Características generales del módulo de salidas analógicas	102
Tabla 21	Características generales de hardware de la pantalla	104
Tabla 22	Acción al oprimir el paro de emergencia	106
Tabla 23	Tabla de asignación de recursos del controlador PLC_DESHUMIFICADORES .	108

Tabla 24 Tabla de asignación de recursos del controlador PLC_TANQUES.....	110
Tabla 25 Datos enviados de los controladores.....	117
Tabla 26 Parámetros de configuración del bloque PID_Compact.....	122
Tabla 27 Encendido de Luz de alarma por alta temperatura a la salida	128
Tabla 28 Rangos de valores limitados del set point por la HMI	130
Tabla 29 Consumo de corriente de elementos del tablero eléctrico	148
Tabla 30 Datos técnicos del motor de la bomba de agua	149
Tabla 31 Corriente de los dispositivos de control, maniobra y potencia	150
Tabla 32 Valor de breakers del tablero eléctrico	151
Tabla 33 Pruebas de flujo másico y temperaturas	161
Tabla 34 Consumo energético mensual del compresor Larking	165
Tabla 35 Análisis Financiero.....	170

Índice de figuras

Figura 1 Compresor Larking del proceso de deshumificación.....	26
Figura 2 Equipo de deshumificación.....	26
Figura 3 Intercambiador de calor CO ₂ -agua.....	27
Figura 4 Tanques de almacenamiento de mermas y recuperación de CO ₂	27
Figura 5 Esquemático antes de la automatización del intercambiador de calor	29
Figura 6 Esquemático después de la automatización del intercambiador de calor	30
Figura 7 Proceso de licuefacción de CO ₂	35
Figura 8 Perforación de fuente natural para extracción de CO ₂	35
Figura 9 Gaseoducto de CO ₂ en planta	36
Figura 10 Cuarto de bombeo	37
Figura 11 Post enfriadores de CO ₂	38
Figura 12 Deshumificadores de línea de producción Witteman y Unión.....	38
Figura 13 Compresores Unión y Witteman	39
Figura 14 Torre de secado de línea Witteman	40
Figura 15 Proceso de filtrado.....	40
Figura 16 Equipos de condensación de CO ₂	41
Figura 17 Tanque de almacenamiento de 270 toneladas	42
Figura 18 Distribución de LIC	42
Figura 19 Intercambiador de Calor de carcasa y tubos	44
Figura 20 Intercambiador de calor de tipo Plato	45
Figura 21 Intercambiador de calor de flujo paralelo	46
Figura 22 Intercambiador de calor de flujo cruzado	47
Figura 23 Curva resistencia-temperatura NTC y PTC del termistor.....	49

Figura 24 Termopar	49
Figura 25 Partes de una termorresistencia	50
Figura 26 Válvula de control	53
Figura 27 Partes del PLC S7 1200.....	55
Figura 28 Pantalla táctil KTP 700	57
Figura 29 Arquitectura del proceso de deshumificación.....	61
Figura 30 Diagrama P&ID del intercambiador de calor CO2-agua	62
Figura 31 Diagrama P&ID del compresor Larking.....	64
Figura 32 Bomba de agua del proceso de deshumificación	65
Figura 33 Válvula de control del intercambiador CO2-agua.....	67
Figura 34 Control por realimentación	67
Figura 35 Datos de temperatura del intercambiador de calor.....	70
Figura 36 Herramienta ident de Matlab para estimación del modelo del proceso	70
Figura 37 Función de transferencia del proceso	72
Figura 38 Curva sigmoideal.....	72
Figura 39 Comportamiento del proceso.....	73
Figura 40 Estructura del regulador de la variable física medida	74
Figura 41 Fórmula empírica para ajustar los parámetros del PID	75
Figura 42 Instrumentación de los deshumificadores	78
Figura 43 Instrumentación el intercambiador de calor CO2-agua	79
Figura 44 Comparación de sensores de temperatura	80
Figura 45 Ventajas y desventajas de los sensores de temperatura	81
Figura 46 Sensor de temperatura industrial encapsulado	83
Figura 47 Conexión de PT100 a 3 hilos al módulo RTD	84

Figura 48 Características técnicas de termorresistencias	85
Figura 49 Sensor de presión	87
Figura 50 Conexión del sensor de presión de 4 a 20 mA.....	88
Figura 51 Características técnicas del sensor de presión	89
Figura 52 Actuador Giratorio marca Festo	90
Figura 53 Arquitectura de entradas y salidas del controlador	92
Figura 54 Diagrama de entradas y salidas del controlador PLC_DESHUMIFICADORES ...	94
Figura 55 Diagrama de entradas y salidas del controlador PLC_TANQUES.....	95
Figura 56 Diagrama de conexión del controlador PLC_DESHUMIFICADORES.....	98
Figura 57 Diagrama de conexión del controlador PLC_TANQUES.....	98
Figura 58 Módulos de expansión Siemens	100
Figura 59 Módulo de expansión SM 1231 RTD.....	100
Figura 60 Módulo de salidas analógicas	102
Figura 61 Diseño de monitorización mediante una interfaz hombre-máquina	103
Figura 62 Pantalla táctil KTP 700 marca Siemens.....	104
Figura 63 Relé de marca Siemens.....	105
Figura 64 Paro de emergencia	105
Figura 65 Diagrama de flujo de control de la electroválvula del compresor Larking	111
Figura 66 Diagrama de flujo de control de la válvula del intercambiador de calor	112
Figura 67 Pantalla principal Tia Portal	114
Figura 68 Acondicionamiento de los sensores de temperatura.....	115
Figura 69 Acondicionamiento del sensor de presión	115
Figura 70 Topología de red en Tia Portal.....	116
Figura 71 Comunicación entre dispositivos Siemens	117

Figura 72 Configuración del bloque TSEND_C para el envío de datos	118
Figura 73 Función TSEND_C de Tia Portal para el envío de datos.....	119
Figura 74 Configuración del bloque TRCV_C para la recepción de datos.....	119
Figura 75 Función TRCV_C para la recepción de datos de un controlador hacia otro ...	120
Figura 76 Configuración del bloque PID de la válvula de control.....	121
Figura 77 Bloque PID_Compact	122
Figura 78 Control de apagado del compresor Larking.....	123
Figura 79 Horómetro de la bomba de agua.....	124
Figura 80 Entradas y salidas del controlador PLC_DESHUMIFICADORES	125
Figura 81 Entradas y salidas del controlador PLC_TANQUES	125
Figura 82 Arquitectura y navegación de las pantallas del proceso de deshumificación	127
Figura 83 Pantalla principal deshumificadores.....	128
Figura 84 Pantalla intercambiador CO2-agua.....	130
Figura 85 Pantalla de visualización de curvas del intercambiador CO2-agua	131
Figura 86 Planificación de la implementación del proyecto intercambiador de calor ...	132
Figura 87 Tablero eléctrico antiguo desinstalado del proceso de deshumificación	134
Figura 88 Proceso de instalación del tablero eléctrico.....	134
Figura 89 Dimensiones del tablero eléctrico	135
Figura 90 Instalación del tablero eléctrico	136
Figura 91 Diagrama esquemático de potencia del motor de la bomba de agua	136
Figura 92 Disposición de los elementos en el tablero eléctrico, vista frontal.....	138
Figura 93 Implementación del tablero eléctrico, vista frontal	138
Figura 94 Disposición de los elementos en el tablero eléctrico, vista interior.....	139
Figura 95 Disposición de los elementos del tablero eléctrico, vista interna	140

Figura 96 Instalación de dispositivos de maniobra en el tablero eléctrico	141
Figura 97 Fuente de voltaje de 24 VDC	141
Figura 98 Switch industrial de 5 puertos	142
Figura 99 Controlador y módulos de expansión.....	142
Figura 100 Pantalla táctil de 7 pulgadas instalada en el tablero eléctrico	143
Figura 101 Sensor de temperatura a la entrada del deshumificador.....	143
Figura 102 Sensor de temperatura a la salida del deshumificador	143
Figura 103 Intercambiador de calor CO2-agua, antes y después de la automatización	144
Figura 104 Instalación de la tubería de agua.....	145
Figura 105 Instalación de tubería de agua, entrada y salida en los deshumificadores..	145
Figura 106 Instalación de la tubería de CO2 proveniente del Cardox B.....	146
Figura 107 Unión de tubería de CO2 provenientes de tanques de almacenamiento	146
Figura 108 Instalación del intercambiador de calor CO2-agua	147
Figura 109 Selección del conductor.....	150
Figura 110 Sensores de temperatura	152
Figura 111 Instalación del sensor de presión en el intercambiador de calor.....	152
Figura 112 Vista interna de la conexión de la válvula de control.....	153
Figura 113 Vista externa e interna del tablero del compresor Larking	154
Figura 114 Control de la bomba e instrumentación de los deshumificadores.....	156
Figura 115 Funcionamiento del intercambiador de calor CO2-agua.....	157
Figura 116 Gráficas de set point de temperatura y variable de proceso	158
Figura 117 Pruebas de instrumentación.....	160
Figura 118 Pruebas realizadas de control de temperatura	160
Figura 119 Número de horas diarias de funcionamiento del compresor Larking	164

Figura 120 Número de horas mensuales de funcionamiento del compresor Larking ...	166
Figura 121 Consumo energético del compresor Larking	167
Figura 122 Comparación de temperatura de salida de CO2 en los deshumificadores ..	168
Figura 123 Producción cada hora de LIC	169
Figura 124 Gráfica del VAN vs TIR	170

Resumen

El presente proyecto tiene como objetivo la automatización del intercambiador de calor CO₂-agua del proceso de deshumificación en la planta de CO₂ de Linde S.A., la automatización del intercambiador de calor CO₂-agua posibilitó el funcionamiento en paralelo con el sistema de enfriamiento por compresión Larking que es el encargado de enfriar el agua que ingresa a los deshumificadores. Además, la automatización permitió controlar el encendido y apagado del compresor Larking que tiene un consumo de 7.6 kWh, de esta forma se disminuirá el tiempo de funcionamiento del compresor Larking mejorando la eficiencia energética del proceso productivo. Se implementó la instrumentación de sensores de temperatura RTD's para el monitoreo de temperatura a la entrada y salida de CO₂ en los deshumificadores; se implementó la instrumentación de sensores de temperatura RTD's a la entrada y salida de agua del intercambiador de calor CO₂-agua y un sensor de presión a la entrada de CO₂ del intercambiador de calor CO₂-agua. El tipo de control implementado en el intercambiador de calor CO₂-agua fue del tipo PID, se controlará el porcentaje de abertura de la válvula proporcional que se encuentra al ingreso de CO₂ del intercambiador de calor CO₂-agua esto para llevar la temperatura de salida de agua al set point indicado. Considerando los requerimientos del sistema se utilizó una comunicación PROFINET para facilitar la instrumentación de los sensores y transmisores del intercambiador de calor CO₂-agua, el controlador utilizado fue un S7 1200; para el desarrollo del HMI local se trabajó con una pantalla táctil KTP de 7 pulgadas para la visualización de las variables que intervienen en el proceso de deshumificación de la planta de CO₂.

PALABRAS CLAVE:

- **AUTOMATIZACIÓN**
- **INTERCAMBIADOR DE CALOR**
- **EFICIENCIA ENERGÉTICA**

Abstract

The following project has as its main goal the automation of the CO₂-water heat exchanger in the dehumidifying process in the CO₂ plant at Linde S.A., the automation of the CO₂-water heat exchanger enabled the operation in parallel with the Larkin cooling system which is in charge of cooling the water that will go into the dehumidifier. Furthermore, the automation allows to control the switching of the Larking compressor which has a power consumption of 7.6 kWh, by doing so the working time of the Larking compressor is reduced, improving the energy efficiency of the productive process.

It was implemented the instrumentation of RTD temperature sensors for monitoring the CO₂ temperature when entering and leaving the dehumidifier, it was implemented the instrumentation of RTD temperature sensors to monitor the water temperature when entering and leaving the CO₂-water heat exchanger and a pressure transmitter at the entrance of CO₂ of the CO₂-water heat exchanger. The type of implemented control in the CO₂-water heat exchanger was PID, the opening percentage of the proportional valve located at the entrance of CO₂ of the CO₂-water heat exchanger will be controlled to bring the temperature of the water leaving the exchanger to the specified set point. Considering the requirements of the system a PROFINET communication was used to facilitate the instrumentation of the sensors and transmitters of the CO₂-water heat exchanger, the chosen controller was a S7 1200, for the development of the local HMI a 7 inches KTP touch pad was used for the visualisation of the variables that intervene in the dehumidifying process of the CO₂ plant.

KEYWORDS

- **AUTOMATION**
- **HEAT EXCHANGER**
- **ENERGY EFFICIENCY**

Capítulo I

Antecedentes

Linde Ecuador S.A. antes llamada AGA S.A. localizada en Machachi, es una empresa internacional de gases industriales que produce y provee en el Ecuador desde 1962. Entre sus plantas están LIC, LOX, LAR, LIN; la planta LIC es la encargada del proceso de licuefacción de CO₂ y elaboración de hielo seco. Actualmente LIC cuenta en el proceso de deshumificación con un sistema de refrigeración por compresión, este proceso es el encargado de disminuir la humedad e incondensables de CO₂.

Además, Linde Ecuador S.A. busca mejorar la eficiencia energética mediante la automatización del proceso de deshumificación de CO₂; para lo cual se planteó incluir un intercambiador de calor CO₂-agua en paralelo al sistema de refrigeración por compresión que actualmente funciona con un compresor de marca Larking utilizando como refrigerante freón.

En el proceso de licuefacción de CO₂, la humedad es uno de los factores relevantes tanto en la productividad como en el funcionamiento de los equipos de refrigeración; un control inadecuado del proceso de deshumificación ocasiona valores irregulares de presión y temperatura en el proceso productivo de licuefacción de CO₂.

Existen varios equipos que permiten eliminar la humedad e incondensables de CO₂; entre ellos se tiene: los post-enfriadores, deshumificadores, precooler, torres de secado, filtros de piedra y condensadores.

La automatización del proceso de deshumificación permitirá a los operadores tener un mejor control de temperatura de agua al ingreso de los deshumificadores, facilitando la supervisión del proceso.

Justificación e importancia

Actualmente el proceso de deshumificación utiliza en el sistema de refrigeración un compresor de marca Larking con una potencia nominal de 7,6 kW funcionando 24 horas al día; este sistema de refrigeración tiene como objetivo enfriar el agua que ingresará posteriormente a los deshumificadores.

Una oportunidad de mejora que se ha observado en el ámbito de la eficiencia energética es la disminución del consumo energético del compresor de marca Larking, el mismo que opera a 220 VAC con un consumo energético promedio de 182 KWh/día con referencia a hojas de lecturas diarias medidas por los técnicos operadores de planta CO₂.

En la **Figura 1** se muestra el compresor de marca Larking del proceso de deshumificación.

Figura 1

Compresor Larking del proceso de deshumificación



En la **Figura 2** se muestra el deshumificador de la línea Witteman.

Figura 2

Equipo de deshumificación



En la **Figura 3** se muestra el intercambiador de calor CO2-agua.

Figura 3

Intercambiador de calor CO2-agua



En la **Figura 4** se muestra los tanques de almacenamiento de mermas de CO2.

Figura 4

Tanques de almacenamiento de mermas y recuperación de CO2



El proceso productivo de licuefacción de CO₂ contiene mermas de CO₂ e incondensables que son enviados a tanques de almacenamientos para posteriormente ser liberados al ambiente.

Las características físicas de las mermas de CO₂ e incondensables en los tanques de almacenamiento son : temperatura de -15°C y presión de 200 psig, estos datos son con referencia al promedio durante 20 días de los reportes diarios de los técnicos operadores de planta CO₂.

La ejecución de este proyecto se justifica y es importante ya que permitirá:

Potenciar el ahorro energético de la Empresa Linde S.A. al utilizar las mermas de CO₂ e incondensables.

En el intercambiador de calor CO₂-agua se utilizará las mermas de gas de CO₂ e incondensables del tanque de almacenamiento para el intercambio térmico con el agua, se realizará el control de temperatura de agua para posteriormente ingreso en los deshumificadores; esto ayudará a disminuir el tiempo de funcionamiento del compresor de marca Larking ya que operarán ambos sistemas en paralelo (sistema compresor e intercambiador de calor CO₂-agua).

Actualmente Linde Ecuador S.A. planta LIC, produce diariamente 29 toneladas de CO₂ líquido; con la automatización del intercambiador CO₂-agua del proceso de deshumificación se

estima aumentar la producción de 2 a 3%; mediante la automatización y control del intercambiador de calor CO2-agua, el agua entrará con una temperatura controlada a los deshumificadores lo que permitirá funcionar eficientemente y mejorar el rendimiento del proceso de licuefacción de CO2.

Alcance del proyecto

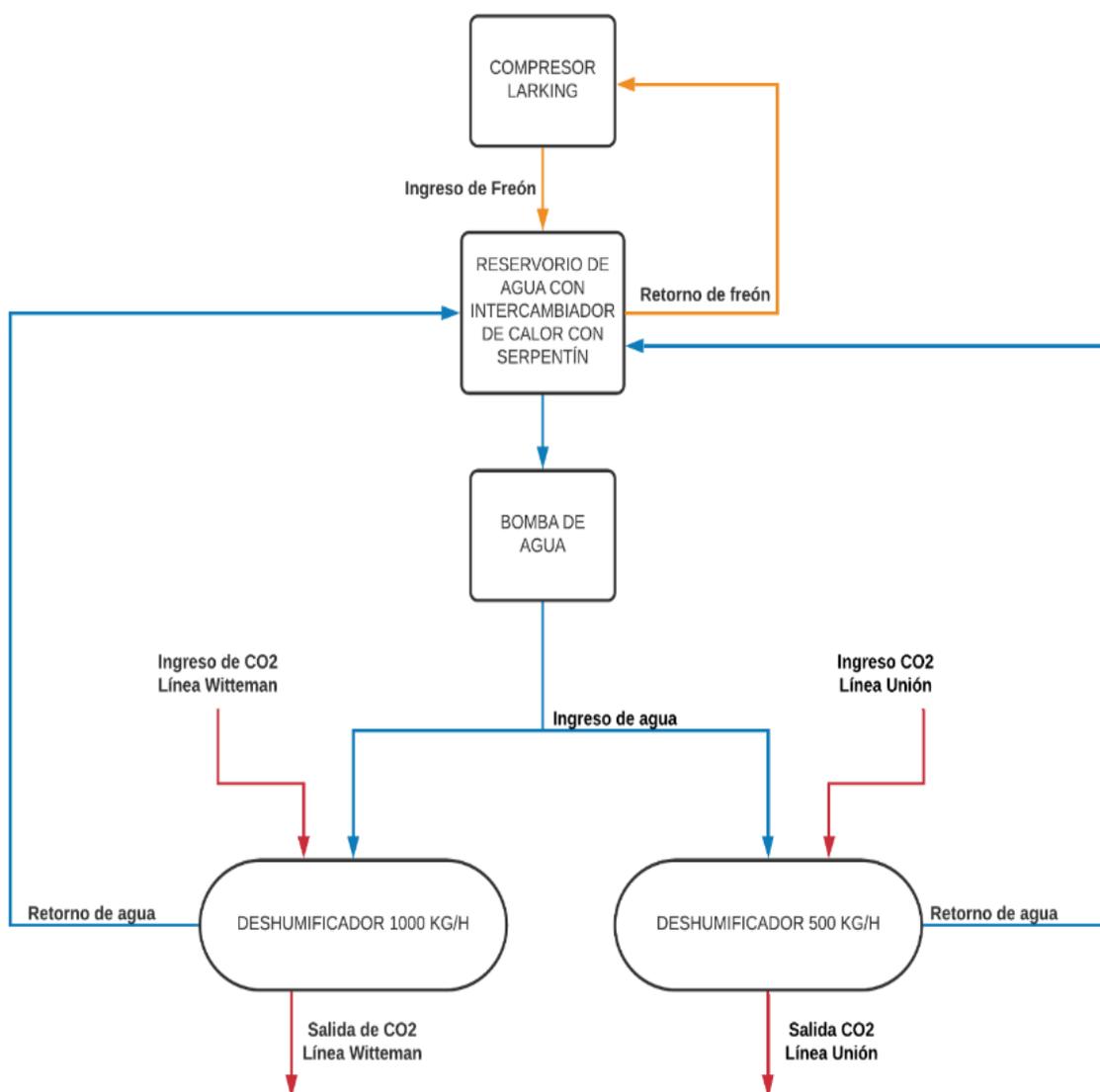
El presente proyecto incluye la automatización del intercambiador de calor CO2-agua del proceso de deshumificación; además la instrumentación por medio de sensores de temperatura a la entrada y salida de los equipos de deshumificación (deshumificadores).

Esquemático antes de la automatización del intercambiador de calor

Se presenta en la **Figura 5** el esquemático del proceso de deshumificación antes de la automatización del intercambiador de calor CO2-agua, el proceso consta de un sistema de refrigeración por compresión de freón, reservorio de agua, bomba de agua y deshumificadores.

Figura 5

Esquemático antes de la automatización del intercambiador de calor

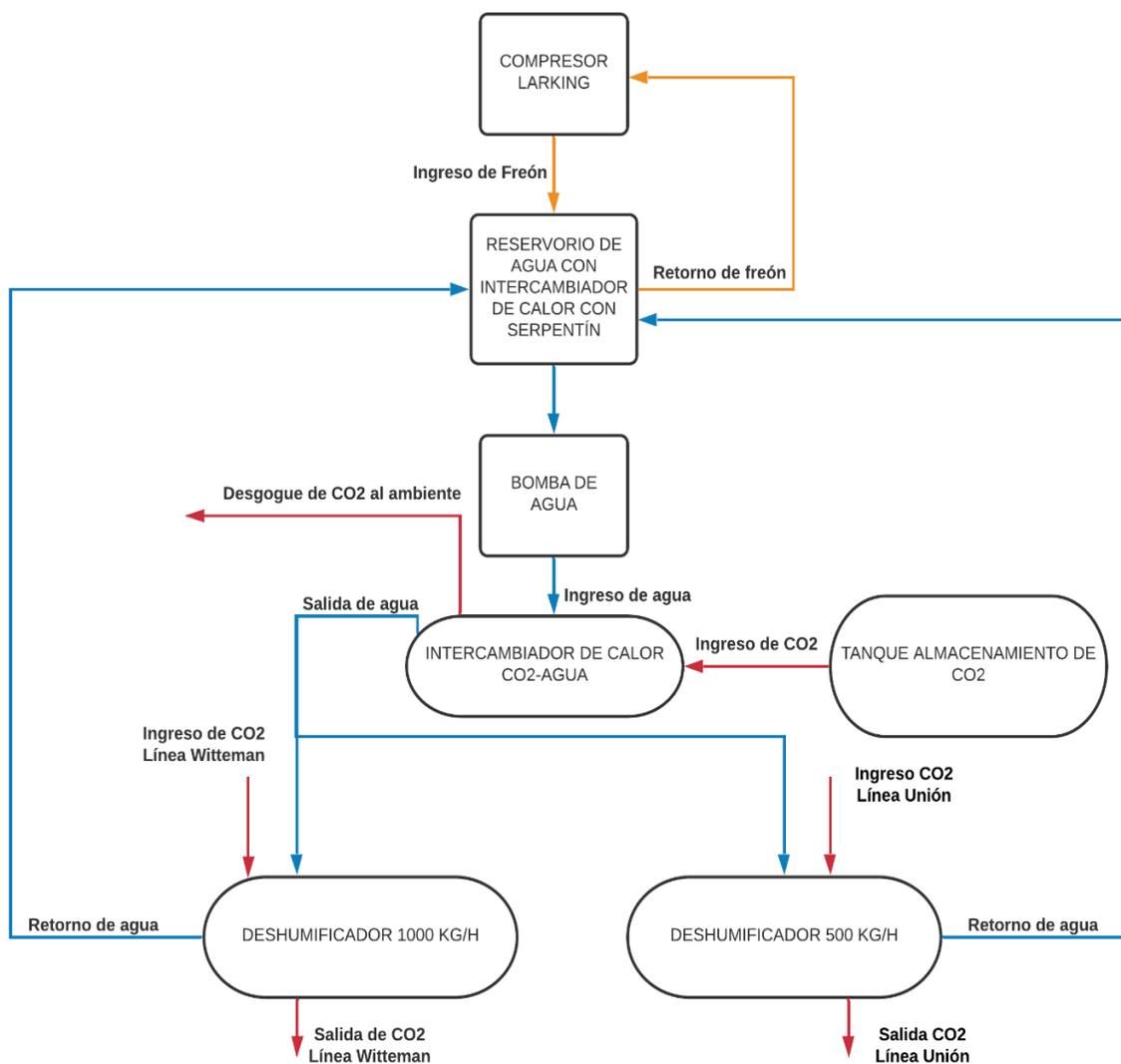


Esquemático después de la automatización del intercambiador de calor

Se presenta en la **Figura 6** el esquemático del proceso de deshumificación después de la automatización del intercambiador de calor CO₂-agua, el proceso consta de un sistema de refrigeración por compresión de freón, reservorio de agua, bomba de agua, intercambiador de calor CO₂-agua y deshumificadores.

Figura 6

Esquemático después de la automatización del intercambiador de calor



El alcance del presente proyecto incluye:

- Instrumentación de los deshumificadores; se implementará sensores de temperatura a la entrada y salida de los deshumificadores de CO2.
- Instrumentación del intercambiador de calor CO2-agua; se implementará sensores de temperatura a la entrada y salida de agua; un sensor de presión y una válvula de control a la entrada de CO2 en el intercambiador de calor CO2-agua.
- Utilización de un controlador lógico programable (PLC) y sus respectivos módulos de entradas analógicas, salidas analógicas y módulo de entrada para sensores de

temperatura para el control del intercambiador de calor CO₂-agua y monitoreo de las variables que intervienen en el proceso de deshumificación.

- Se realizará un control de temperatura en el intercambiador de calor CO₂-agua, para controlar la temperatura de salida del agua con un error en estado estacionario $ess \leq 0.4^{\circ}C$. Además, se realizará un control por presión en el intercambiador de calor CO₂-agua para tener un funcionamiento constante cuando exista presión en los tanques de almacenamiento de CO₂. Las técnicas de control a configurarse en los controladores principal y secundario serán del tipo PID y ON-OFF respectivamente.
- Se realizará el control de encendido y apagado de la bomba de agua por medio de una interfaz hombre-máquina local.
- Se realizará la monitorización por medio de una interfaz hombre-máquina local que consta de una pantalla principal y dos pantallas secundarias, la nomenclatura industrial que se utilizará es PV (Variable de Proceso), SP (Set point o Referencia).

La interfaz HMI incluirá los siguientes elementos básicos.

Pantalla principal (Deshumificadores).

- Interruptor o pulsador Start/Stop (Encendido y apagado de la bomba de agua).
- Visualización de temperatura de entrada y salida del deshumificador Witteman.
- Visualización de temperatura de entrada y salida del deshumificador Unión.

Pantalla secundaria 1 (Intercambiador CO₂-agua).

- Interruptor o pulsador Start/Stop (Modo Manual).
- Interruptor o pulsador Start/Stop (Modo Automático).
- Visualización de presión de entrada de CO₂ del intercambiador de calor CO₂-agua.
- Visualización de temperatura de entrada y salida de agua del intercambiador de calor CO₂-agua.

- Visualización de porcentaje de apertura de la válvula de control.
- Ingreso de set point de temperatura y presión.

Pantalla secundaria 2 (Gráfica de PV y SP)

- Gráficas de PV, SP

Objetivos

Objetivo general

- Automatizar el intercambiador de calor CO₂-agua del proceso de deshumificación en la planta de CO₂ de Linde S.A., para mejorar la eficiencia energética del proceso productivo.

Objetivos específicos

- Recopilar y analizar información sobre el proceso de licuefacción de CO₂, para conocer el funcionamiento general de la planta y estar en condiciones de realizar una automatización eficiente de acuerdo a los requerimientos de los procesos de la planta.
- Analizar el impacto de la automatización en la eficiencia energética del proceso productivo de planta CO₂.
- Analizar el impacto de la automatización en la producción de la licuefacción del CO₂.
- Utilizar las mermas de CO₂ e incondensables para la automatización del intercambiador CO₂-agua del proceso de deshumificación.
- Aumentar la producción de CO₂ líquido de 2 a 3% disminuyendo el tiempo de licuefacción de CO₂.
- Comparar y evaluar los resultados obtenidos con la automatización del intercambiador de calor del proceso de deshumificación.

Capítulo II

Marco Referencial

Dióxido de carbono

El dióxido de carbono en su forma natural se encuentra en su forma gaseosa, este gas es fundamental para el proceso de la fotosíntesis y por consiguiente de la vida humana.

Es de gran importancia conocer las ventajas y desventajas del CO₂, “el aumento en la cantidad de dióxido de carbono debido a la combustión de combustibles fósiles perturba el ciclo atmosférico, es por esto que las personas han definido al CO₂ con una gas perjudicial para la vida humana pero sin tomar en cuenta las aplicaciones y ventajas de este gas” (Linde, 2015).

Aplicación del CO₂

La planta industrial de CO₂ actualmente distribuye CO₂ en su forma líquida y hielo seco, dependiendo del cliente el CO₂ puede ser aplicado

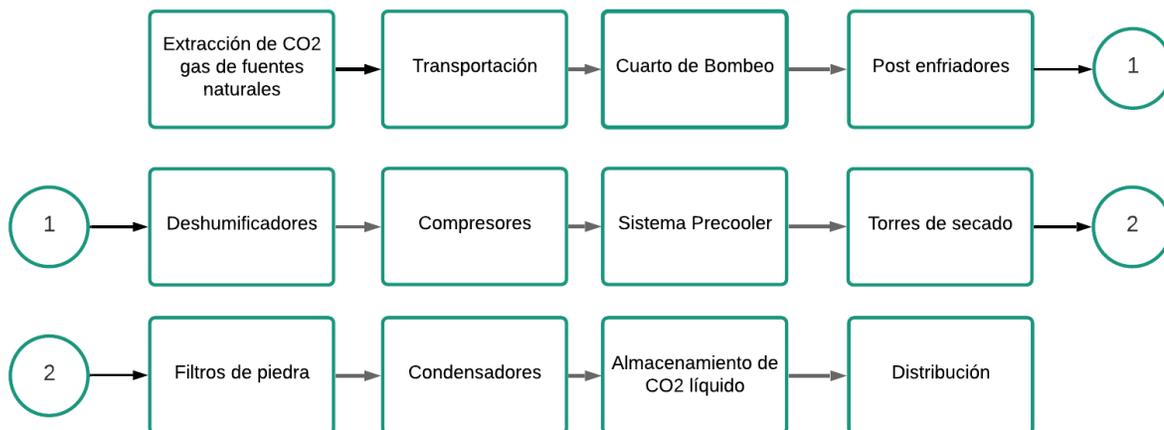
- En bebidas carbónicas: mejora su tiempo de vida y añade un sabor fresco e intenso.
- Refrigeración o congelación de alimentos.
- Limpieza de agua potable: la hace menos corrosiva.
- En invernaderos: aumenta la velocidad de crecimiento de los vegetales.
- Neutralización de aguas residuales antes de su liberación al medio ambiente.
- El dióxido de carbono, en forma de pellets de hielo seco, es un agente de enfriamiento muy eficiente y flexible que no necesita energía adicional para mantener los alimentos frescos y fríos.
- Gas de protección para soldadura de acero y procesos de corte con láser.
- En procesos industriales de enfriamiento. (Linde, 2015)

Proceso de licuefacción de CO₂ en Linde Ecuador S.A.

En la **Figura 7** se muestra las etapas para transformar el CO₂ gaseoso extraído de fuentes naturales hasta su estado líquido para su posterior almacenamiento y distribución.

Figura 7

Proceso de licuefacción de CO₂



Extracción de CO₂ gaseoso de fuentes naturales

La extracción de CO₂ en su estado gaseoso es de fuentes naturales, al existir grandes yacimientos de aguas subterráneas y minas de carbonato de calcio se mezclan estos dos elementos en el subsuelo produciendo una reacción química y transformando estos elementos en CO₂ gaseoso.

Se realizan perforaciones de 100 a 150 m para la extracción del gas natural, actualmente existen 7 fuentes naturales en planta CO₂; en condiciones normales las características del CO₂ gaseoso extraído de fuentes naturales es de 20 °C con una presión de 5 a 6 psig .

En la **Figura 8** se muestra el proceso de perforación para extracción de CO₂ de fuentes naturales.

Figura 8

Perforación de fuente natural para extracción de CO₂



Transportación

Se transporta el CO₂ gasificado en tubería de plástico PVCZ para soportar presiones de 5 a 6 psig y llevar la materia prima al proceso de bombeo.

Existen dos líneas de producción de LIC, línea Witteman con un diámetro de tubería de 8 pulgadas y línea Unión con un diámetro de tubería de 6 pulgadas, la producción de estas líneas es de 1000 kg/h y 500 kg/h respectivamente.

En la **Figura 9** se muestra la tubería de transportación de CO₂ de fuentes naturales a la planta de producción.

Figura 9

Gaseoducto de CO₂ en planta



Cuarto de bombeo

El CO₂ gaseoso de fuentes naturales es succionado hacia el cuarto de bombeo por medio de dos bombas denominas Root fabrica #1 para la línea Witteman y Root Fabrica #2 para la línea Unión, en este proceso se eleva la temperatura de 40°C a 50°C con una presión de 8 a 12 psig del gas.

En la **Figura 10** se muestra las bombas de succión de CO₂ de fuentes naturales hacia la planta de producción.

Figura 10

Cuarto de bombeo



Post Enfriadores

Para disminuir la temperatura de CO₂ gaseoso se utiliza dos post enfriadores para cada línea de producción, estos post enfriadores constan de un intercambiador de calor en el cual se utiliza el agua a temperatura ambiente para disminuir la temperatura del gas a 30 °C a 40 °C.

En la **Figura 11** se muestra el post enfriador de la línea de producción Unión.

Figura 11

Post enfriadores de CO2



Deshumificadores

El CO2 gaseoso contiene partículas de agua provenientes de fuentes naturales, para disminuir las partículas de agua y humedad del proceso se utilizan dos deshumificadores una por cada línea de producción.

En la **Figura 12** se muestra los equipos de deshumificación de la línea Unión y Witteman.

Figura 12

Deshumificadores de línea de producción Witteman y Unión



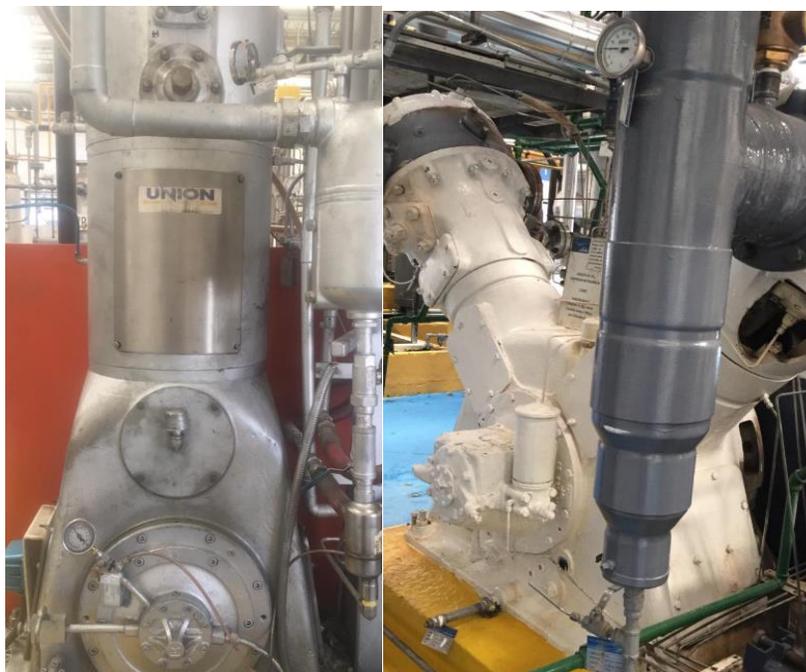
Compresores

El CO₂ gaseoso para ser transformado a su estado líquido necesita cumplir condiciones de temperatura y presión, existen dos compresores para cada línea de producción, compresor Witteman y compresor Unión; en la etapa de succión del compresor el CO₂ ingresa a una presión de 8 a 12 psig y es elevada a una presión de 300 psig en la descarga del compresor, de esta forma se cumple la primera condición para la licuefacción de CO₂.

En la **Figura 13** se muestra los compresores de producción de 500 kg/h y 1000 kg/h.

Figura 13

Compresores Unión y Witteman



Sistema precooler

En cada línea de producción existe el sistema precooler, en este proceso el CO₂ ingresa a una temperatura elevada de 30°C a 40°C por acción de compresión; para disminuir la temperatura de CO₂ se utiliza el intercambio térmico entre el CO₂ y amoníaco (NH₃) de esta manera se disminuye la temperatura de CO₂ a 8°C.

Torres de secado

Para eliminar totalmente la humedad del sistema se utilizan las torres de secado, el funcionamiento de este proceso es transferir calor al CO₂ mediante una niquelina hasta llegar a temperaturas superiores a 80°C y finalmente absorber la humedad con un material denominado lúmina.

En la **Figura 14** se muestra la torre de secado de la línea de producción Witteman.

Figura 14

Torre de secado de línea Witteman



Filtros de piedra

Para garantizar la pureza y calidad del CO₂ gaseoso este tiene que pasar por un filtro de piedra que retiene todas las micro impurezas provenientes de los procesos anteriores.

En la **Figura 15** se muestra los filtros de piedra de línea de producción Witteman.

Figura 15

Proceso de filtrado



Condensación

En este proceso se realiza la licuefacción de CO₂, el CO₂ con una presión de 300 psig al ser sometido a temperaturas menores a -20°C cambia a su estado a líquido, esto se produce por el intercambio térmico del CO₂ con el amoniaco (NH₃) que se encuentra a temperaturas menores a -40°C.

En la **Figura 16** se muestra los condensadores de la línea de producción Witteman.

Figura 16

Equipos de condensación de CO₂



Almacenamiento

El almacenamiento de CO₂ líquido es en tanques de 270 Tn y 100 Tn, las características del producto almacenado son presión de 300 psig, temperaturas menores a -25°C y pureza en su estado líquido del 99.99 %.

En la **Figura 17** se muestra el tanque de almacenamiento de CO₂ líquido de 270 toneladas.

Figura 17

Tanque de almacenamiento de 270 toneladas



Distribución

El producto es distribuido a través de tanques criogénicos para mantener las características del producto terminado.

En la **Figura 18** se muestra el semitrailer de 22 toneladas para el transporte de CO₂ líquido.

Figura 18

Distribución de LIC



Proceso de deshumificación

El objetivo principal del proceso es disminuir la humedad proveniente de fuentes naturales, para lograr esto se utilizan los equipos de deshumificación, el funcionamiento de estos equipos es a través de la transferencia de calor en contacto a diferentes temperaturas, el CO₂ gaseoso a temperaturas de 30°C transfiere calor al agua que ingresa a los equipos de deshumificación a 6 °C, de esta forma el CO₂ gaseoso sale del proceso a una temperatura de 10 °C y con un menor porcentaje de humedad.

Deshumificador

El deshumificador industrial tiene un papel fundamental en los procesos de refrigeración, al estar presente el aire en los procesos y contener gases incondensables (vapor de agua, oxígeno y nitrógeno), ocasionarían taponamientos en tuberías y equipos debido a la baja temperatura que funciona el ciclo de refrigeración, debido a esto el deshumificador ayuda a disminuir la cantidad de vapor de agua mediante el proceso de intercambio térmico con un fluido de menor temperatura.

Intercambiador de calor

Un intercambiador de calor es un equipo que permite el intercambio térmico entre dos fluidos, los fluidos ganan o pierden calor cuando están en contacto a través del metal que separa uno del otro, además “un intercambiador transfiere calor entre dos o más corrientes de proceso a diferentes temperaturas” (Dosinda González-Mendizabal, 2002).

Tipos de intercambiadores de calor

Existe una gran variedad de intercambiadores de calor dependiendo su construcción y operación, se verá una breve descripción de cada una de estas.

Tipos de intercambiadores de calor según su construcción

La construcción de los intercambiadores afecta directamente a la transferencia de calor entre los fluidos que interactúan entre sí, es de gran importancia la elección correcta considerando las ventajas y desventajas según la aplicación de estos.

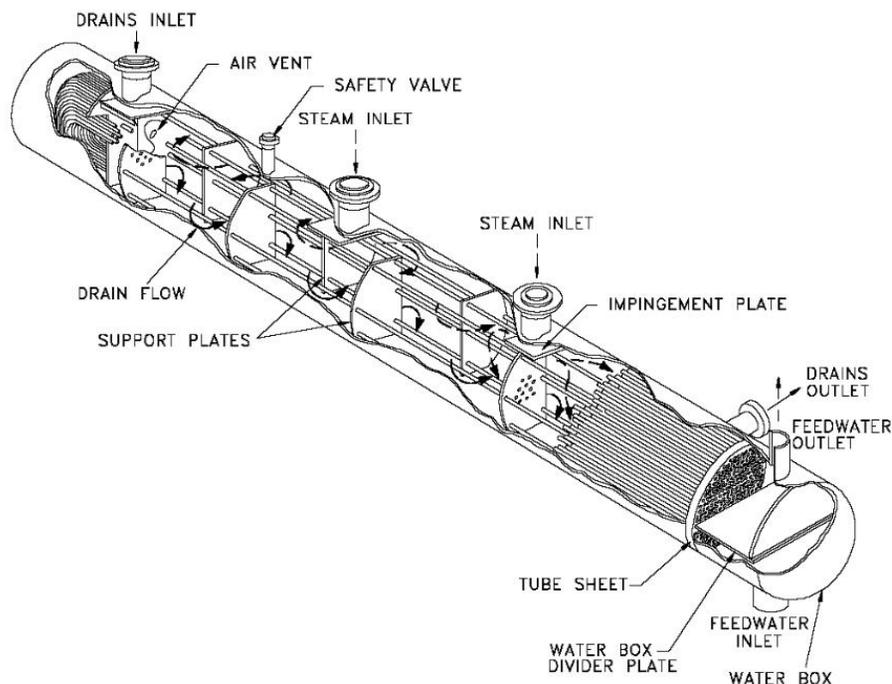
Carcaza y tubo

El intercambiador de calor más utilizado por su construcción es del tipo carcaza y tubo, su funcionamiento se basa en el intercambio térmico del fluido que se encuentra en el tubo o fluido interno y el fluido que se encuentra en la carcaza o fluido externo. Dependiendo de la presión de los fluidos, el líquido con una mayor presión circula por los tubos y el de menor presión por la carcaza. (Jaramillo, 2015)

En la **Figura 19** se muestra las partes del intercambiador de calor de carcaza y tubos.

Figura 19

Intercambiador de Calor de carcaza y tubos



Nota. Tomado de (Jaramillo, 2015).

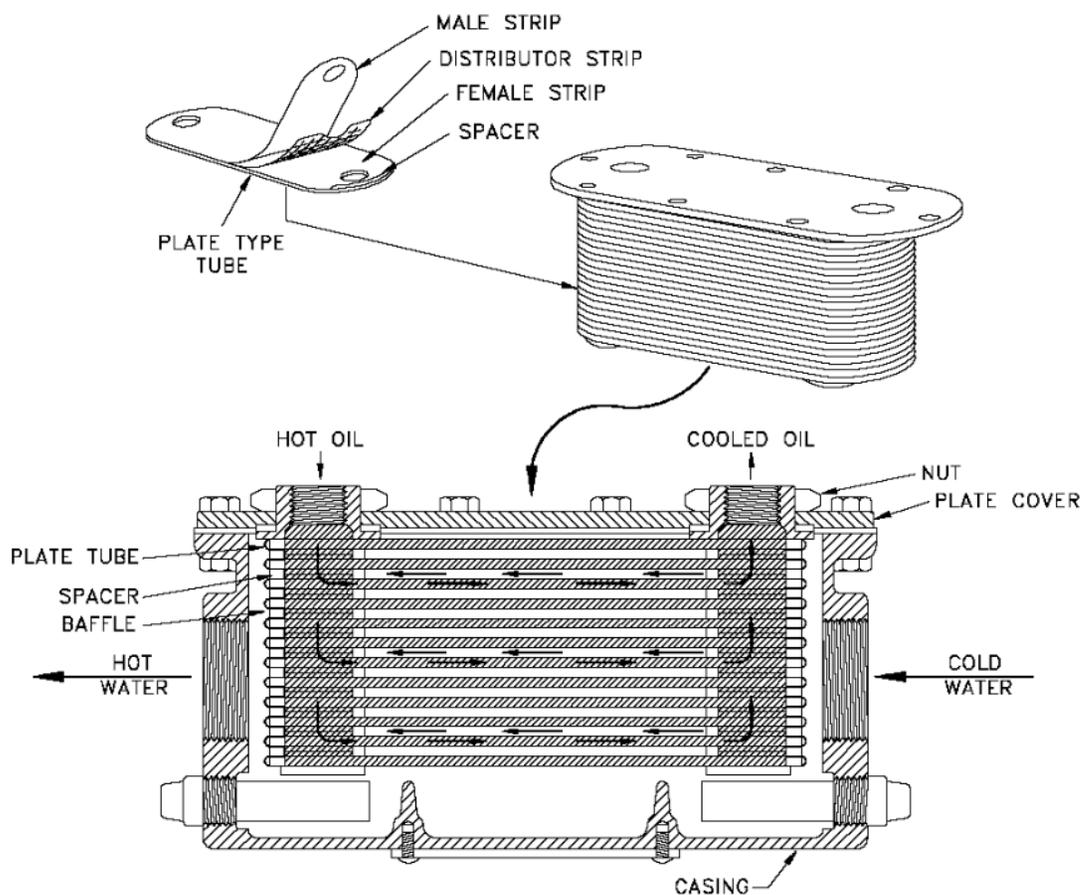
Plato

En el intercambiador de calor de tipo plato los tubos son remplazados por platos, de esta forma al haber una mayor área de contacto entre el fluido con mayor carga térmica y con la de menor carga térmica existe mayor transferencia térmica siendo más eficiente y de menor tamaño. (Jaramillo, 2015)

En la **Figura 20** se muestra las partes principales del intercambiador tipo plato.

Figura 20

Intercambiador de calor de tipo Plato



Nota. Tomado de (Jaramillo, 2015).

Tipos de intercambiadores de calor según su operación

Para transferir calor de un fluido con mayor carga térmica a uno menor los fluidos interactúan internamente sin contacto en el intercambiador, la operación interna de los intercambiadores consiste en la dirección de flujo del refrigerante y el fluido a refrigerar.

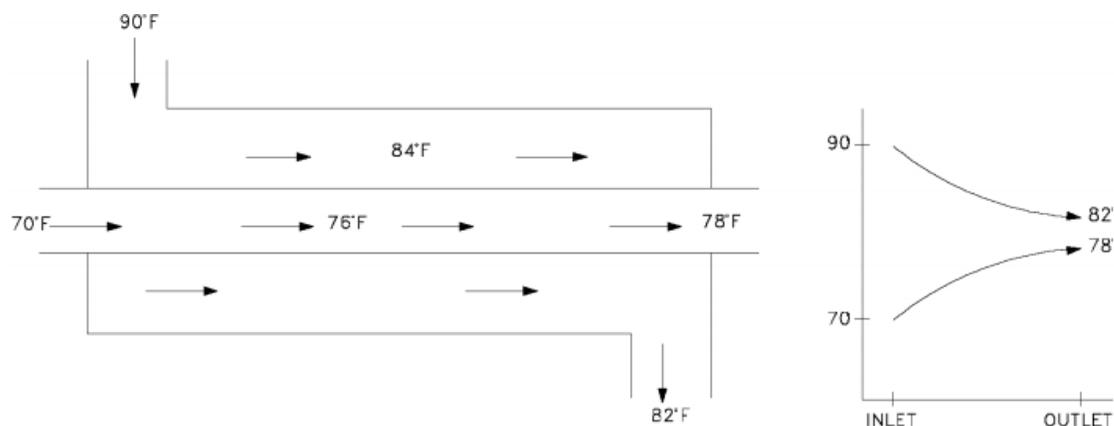
Flujo paralelo

Un intercambiador de calor de flujo paralelo en sus tubos los fluidos circulan en la misma dirección y el mismo sentido, de esta forma el fluido con mayor temperatura sede calor al fluido con menor temperatura de esta manera existiendo una transferencia de calor significativa entre los fluidos. (Jaramillo, 2015)

En la **Figura 21** se muestra la dirección de flujos del intercambiador de calor de flujo paralelo.

Figura 21

Intercambiador de calor de flujo paralelo



Nota. Tomado de (Jaramillo, 2015).

Contraflujo

En el intercambiador de calor de contraflujo el fluido de mayor temperatura y el fluido de menor temperatura ingresan por extremos diferentes de esta forma los fluidos tienen la misma dirección, pero en sentidos opuestos. (Jaramillo, 2015)

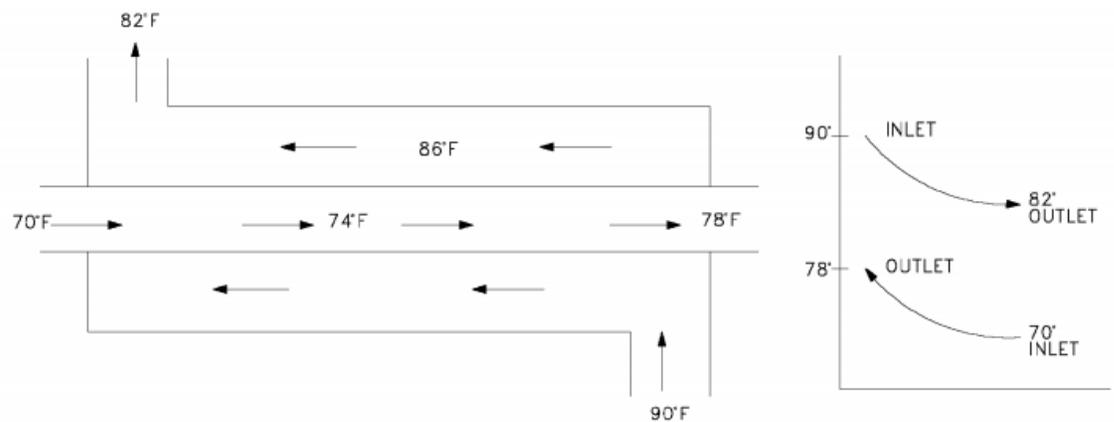
Flujo cruzado

En el intercambiador de calor de flujo cruzado uno de los flujos forma un ángulo de 90° con el otro flujo, de esta forma se asegura que uno de los fluidos circule por los tubos y el otro perpendicularmente, teniendo una mayor área de transferencia de calor. (Jaramillo, 2015)

En la **Figura 22** se muestra la dirección de flujos del intercambiador de calor de flujo cruzado.

Figura 22

Intercambiador de calor de flujo cruzado



Nota. Tomado de (Jaramillo, 2015).

Automatización industrial de procesos

La automatización de procesos industriales representa hoy en día un pilar fundamental en la mejora continua tanto en productividad y eficiencia en los procesos. El presente proyecto abarca el ámbito de la automatización y control en la empresa industrial de Linde Ecuador S.A., se implementará instrumentación, monitoreo y control a través de sensores, actuadores, controladores y una interfaz hombre máquina, a continuación, se verá una breve descripción de los elementos a utilizarse en la automatización del proceso de deshumificación.

Sensores de temperatura

Los sensores de temperatura son dispositivos que permiten transformar la variable física temperatura en una señal eléctrica para su procesamiento y uso en un proceso, “los sensores de temperatura son dispositivos encargados de transformar los cambios de temperatura en señales eléctricas” (Queralt, 2004).

Instrumentos para medir temperatura

En la actualidad hay muchas formas de medir la temperatura sea de forma eléctrica, mecánica y radiación térmica, en este apartado se fijará esencialmente en la medición de temperatura de forma eléctrica. (Llinares, 2015)

En la **Tabla 1** se muestra los rango de temperatura de los instrumentos más utilizados para medir temperatura.

Tabla 1

Rangos usuales de operación de dispositivos de medición de temperatura

Sensor	Rango en °C
Termistores	-195 a 450
Termopares	-200 a 1250
Termorresistencias	-250 a 850

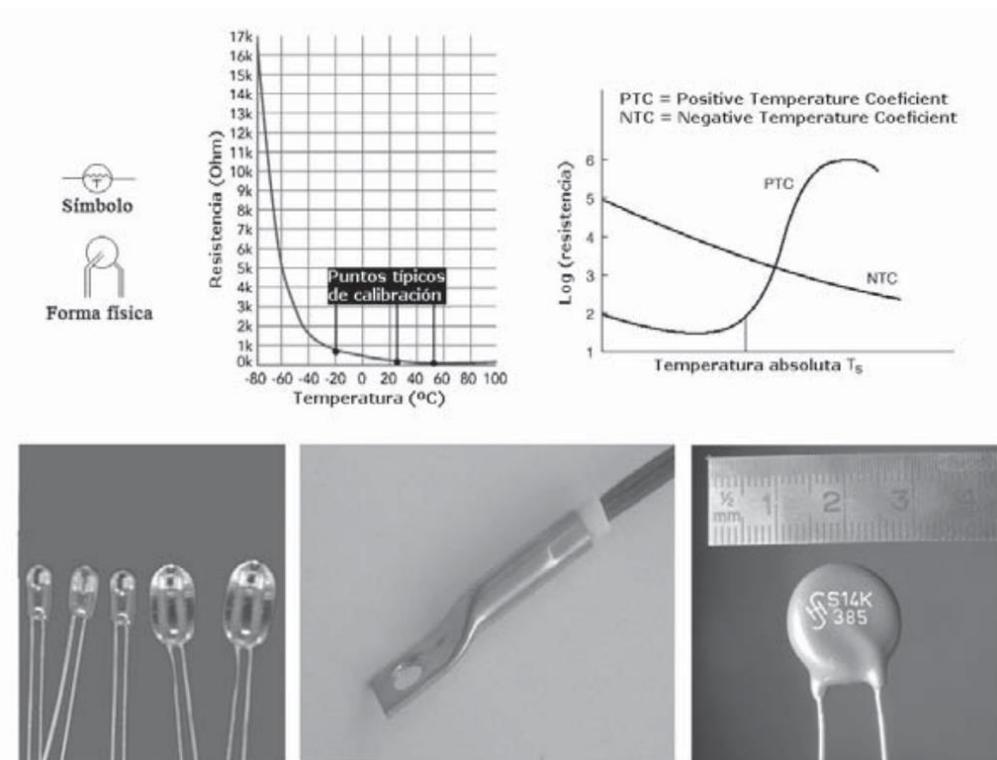
Nota. Tomado de (Llinares, 2015).

Termistores. Los termistores son sensores cuya capacidad de permitir el paso de la corriente eléctrica disminuye al aumentar la temperatura, “los termistores se fabrican con óxidos de níquel, manganeso, hierro, cobalto, cobre, magnesio, titanio y otros metales, y están encapsulados” (Creus, 2010).

En la **Figura 23** se muestra las curvas de resistencia del termistor su símbolo y forma física.

Figura 23

Curva resistencia-temperatura NTC y PTC del termistor



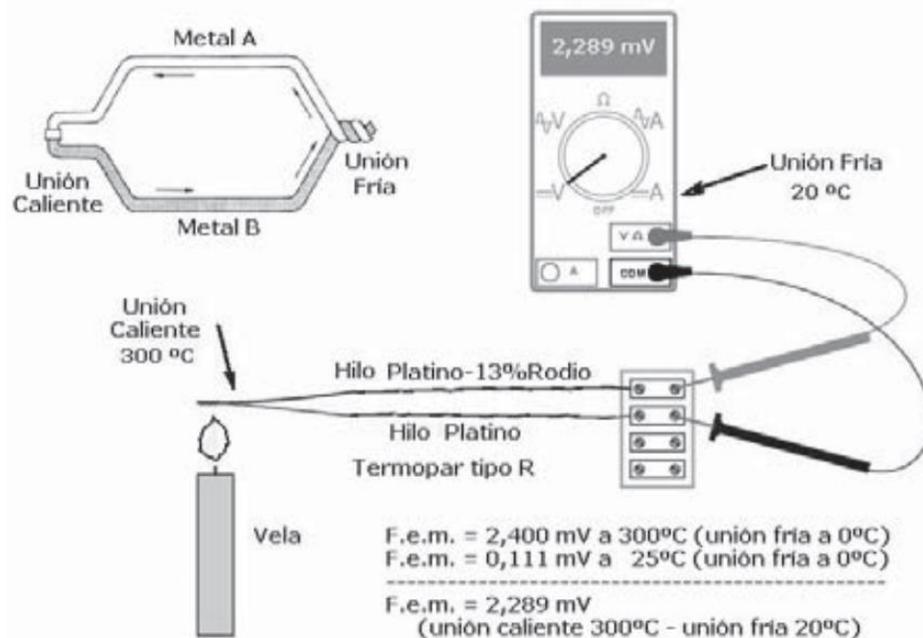
Nota. Tomado de (Creus, 2010).

Termopares. Los termopares son sensores que se basan en el efecto termoeléctrico, cuando en los extremos de un semiconductor se crea un voltaje este se transforma en temperatura y viceversa, este efecto fue descubierto por el físico Seebeck y su aplicación en la industria es como sensor temperatura por su amplio rango de medición. (Creus, 2010)

En la **Figura 24** se muestra el funcionamiento básico del sensor de temperatura termopar.

Figura 24

Termopar



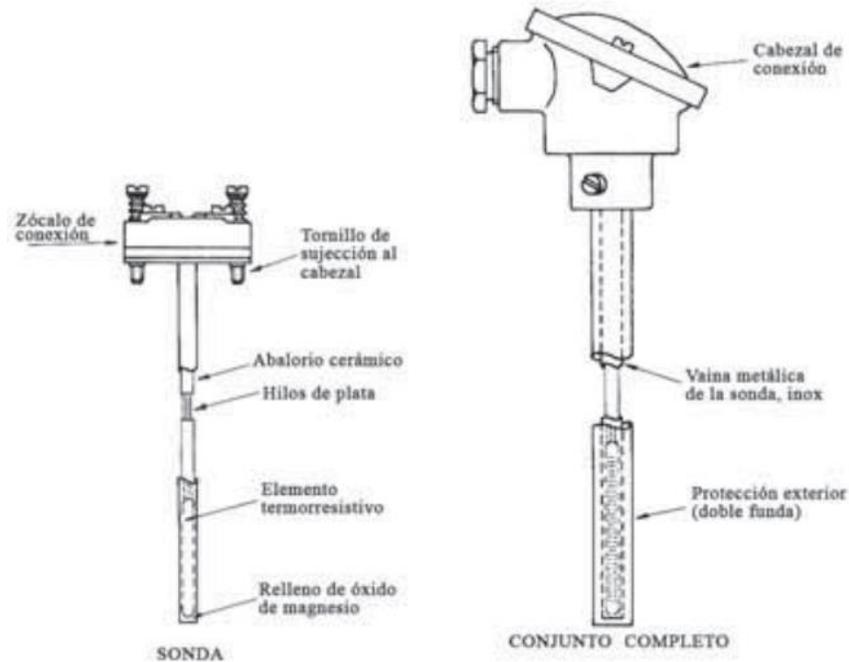
Nota. Tomado de (Creus, 2010).

Termorresistencias. Una termorresistencia es un sensor que varía su resistencia según la variación de temperatura, “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” (Creus, 2010).

En la **Figura 25** se muestra las partes principales de una termorresistencia.

Figura 25

Partes de una termorresistencia



Nota. Tomado de (Creus, 2010).

Sensores de presión

La presión es una variable comúnmente utilizada en los procesos industriales, la presión es una magnitud física que permite relacionar la fuerza de un cuerpo ejercida sobre un área específica, para el uso de esta magnitud se utilizan sensores de presión, los sensores de presión son dispositivos encargados de transformar los cambios de presión en señales eléctricas” (Queralt, 2004).

Instrumentos para medir presión

En la actualidad hay muchas formas de medir la presión sea de forma mecánica, elástica electromecánica y electrónica; en este apartado se fijará esencialmente en la medición de presión con instrumentos electromecánicos y electrónicos.

En la **Tabla 2** se muestra las principales características de los instrumentos para la medición de la presión.

Tabla 2

Campos de medida y exactitud de transductores para medir presión

Tipo de instrumento	Campo de medida	Exactitud %
Transductor resistivo	0.5-350 kg/cm ²	0,5
Transductor capacitivo	0-420 kg/cm ²	0,2
Transductor magnético	0-700 kg/cm ²	0,2
Transductor piezoeléctrico	0-350 kg/cm ²	0,2

Nota. Tomado de (Anzo & Ingenier, 2001)

Instrumentos electromecánicos y electrónicos

En el presente proyecto se utilizará instrumentos de medición electrónicos para la medición de la variable física de presión, se dará una breve explicación de cada una de estas y se hará énfasis en el transductor de presión resistivo.

Galgas extensiométricas. “Las galgas extensiométricas son semiconductores que al ser sometidos a una fuerza, tensión o esfuerzo cambian su resistencia transformando un movimiento mecánico en una señal eléctrica que posteriormente será procesada para una medición digital de la variable presión” (Anzo & Ingenier, 2001).

Transductores de Presión Resistivos. Al variar la presión en el transductor de presión resistiva este tiene un cambio en la resistencia del material, “están constituidos por un elemento elástico (tubo Bourdon, fuelle, diafragma), el cual hace variar la resistencia de un potenciómetro en función de la presión” (Anzo & Ingenier, 2001).

Transductores de presión capacitivos. Los transductores de presión capacitivos son muy utilizados cuando se desea una buena precisión en la medición; “la presión aplicada produce una deflexión en el diafragma, la capacitancia del elemento varia en proporción a la presión; ya

que la capacitancia es función del material dieléctrico entre las placas del capacitor y de las distancias entre las placas” (Anzo & Ingenier, 2001).

Transductores de presión magnéticos. Este tipo de transductores utilizan un inductor con un núcleo magnético móvil, de esta forma la inductancia en la bobina varía proporcionalmente según la posición que ocupe el núcleo dentro de la bobina, variaciones de presión sobre el sensor producen cambios en la posición del núcleo, lo que a la vez origina un cambio en la inductancia. (Anzo & Ingenier, 2001)

Transductores de Presión Piezoeléctricos. Estos transductores utilizan el principio de piezoelectricidad para generar un voltaje cuando tienen una deformación o elasticidad en el material, “un semiconductor piezoresistivo se puede describir como un elemento que produce un cambio en la resistencia, causado por un esfuerzo aplicado sobre un diafragma.” (Anzo & Ingenier, 2001).

Válvulas de control

Las válvulas de control son fundamentales cuando se desea controlar un proceso donde se necesita regular el paso de flujo a través de una tubería, la abertura en su orificio se abre a un cierto porcentaje para llevar la variable de proceso al set point deseado, de esta manera la válvula de control se abre o se cierra proporcionalmente dependiendo de la medida de la variable de proceso, “el bucle de control tiene tanta importancia como el elemento primario, el transmisor y el controlador” (Creus, 2010).

En la **Figura 26** se muestra una válvula de control marca Festo.

Figura 26

Válvula de control



Controlador Lógico programable (PLC)

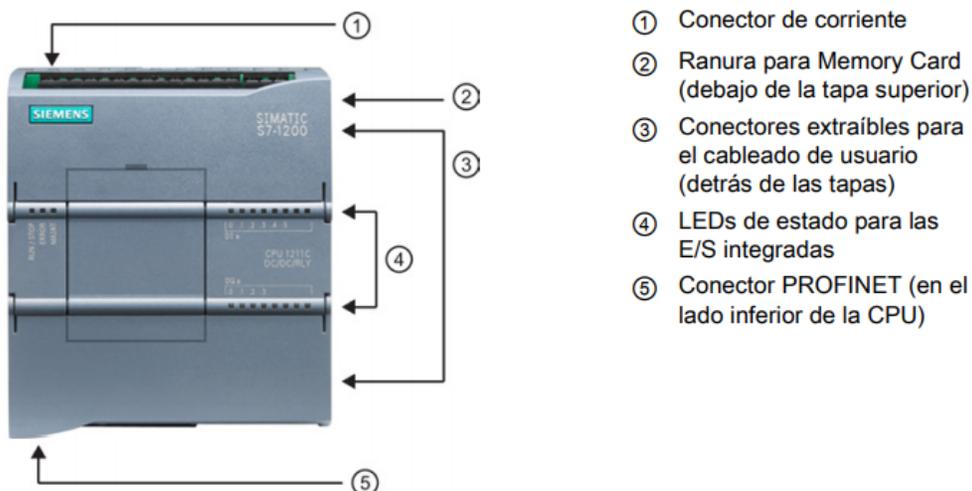
Un controlador lógico programable es un dispositivo industrial que permite el control de variables inmersas en un proceso, “se entiende por Controlador Lógico Programable (PLC), o Automata Programable, a toda máquina electrónica diseñada para controlar en tiempo real y en medio industrial procesos secuenciales” (Aguilera, 2002).

Controlador S7 1200

El controlador S7 1200 permite el control de gran variedad de procesos y es fundamental en la automatización de procesos industriales, este tipo de controlador es compacto y modular por lo que según su necesidad de automatización se consigue escalar; el controlador dispone entradas análogas, entradas y salidas digitales, y un puerto para comunicación profinet entre sus elementos básicos.

El manual de configuración de Siemens del controlador S7 1200 indica que “la CPU incorpora un microprocesador, una fuente de alimentación integrada, circuitos de entrada y salida, Profinet integrado, E/S de control de movimiento de alta velocidad y entradas analógicas incorporadas, todo ello en una carcasa compacta, conformando así un potente controlador” (Configuración et al., 2014).

En la **Figura 27** se muestra las partes principales del controlador S7 1200.

Figura 27*Partes del PLC S7 1200*

Nota. Tomado de (Configuración et al., 2014).

Interfaz hombre-máquina (HMI)

La industria ha visto la necesidad de supervisar, monitorear y controlar sus procesos, una interfaz hombre máquina permite la vinculación del hombre con el proceso de forma segura, fácil y rápida a través de la visualización de los parámetros y variables que intervienen directamente sobre los procesos a ser controlados. “Un sistema HMI (Human Machine Interface) representa la interfaz entre el hombre (operador) y el proceso (máquina/instalación)” (Cooperates et al., 2018).

Manejar procesos

El manual de usuario de Siemens para pantallas táctiles de segunda generación indica que “el operador puede controlar el proceso a través de la interfaz gráfica de usuario. Por ejemplo, el operador puede especificar una consigna para el controlador o arrancar un motor” (Cooperates et al., 2018).

Emitir avisos

El manual de usuario de Siemens para pantallas táctiles de segunda generación indica que “si durante el proceso se producen estados de proceso críticos, se emite un aviso automáticamente (por ejemplo, si se sobrepasa un valor límite especificado)” (Cooperates et al., 2018).

Archivar valores de proceso y avisos

El manual de usuario de Siemens para pantallas táctiles de segunda generación indica que “el sistema HMI puede archivar avisos y valores de proceso. Esto permite documentar el desarrollo del proceso. También será posible acceder posteriormente a datos de producción anteriores” (Cooperates et al., 2018).

Documentar valores de proceso y avisos

El manual de usuario de Siemens para pantallas táctiles de segunda generación indica que “el sistema HMI permite imprimir avisos y valores de proceso como informes. De este modo podrá, por ejemplo, obtener los datos de producción una vez finalizado el turno” (Cooperates et al., 2018).

Administrar parámetros de proceso y de máquina en recetas

El manual de usuario de Siemens para pantallas táctiles de segunda generación indica que “el sistema HMI permite almacenar los parámetros de proceso y de máquina en recetas. Estos parámetros se pueden transferir, por ejemplo, desde el panel de operador al controlador en un solo paso de trabajo para cambiar la producción a otra gama de productos” (Cooperates et al., 2018).

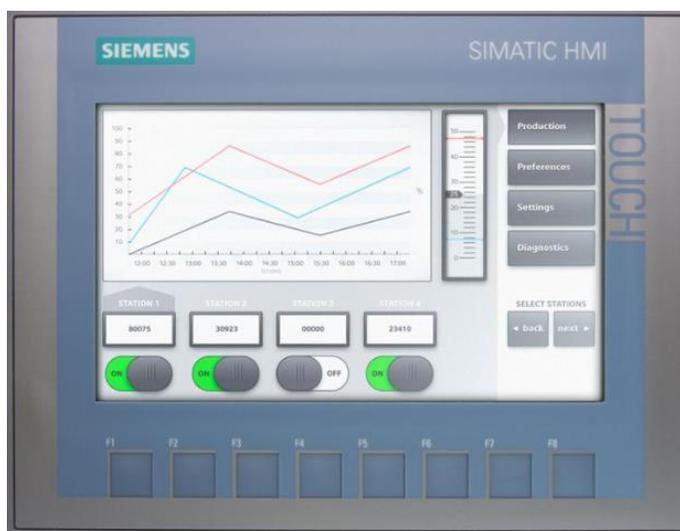
Administración de usuarios

El manual de usuario de Siemens para pantallas táctiles de segunda generación indica que “es posible asignar unos permisos concretos en los paneles para limitar las posibilidades de manejo para algunos usuarios” (Cooperates et al., 2018).

En la **Figura 28** se muestra la interfaz hombre-máquina de marca Siemens.

Figura 28

Pantalla táctil KTP 700



Nota. Tomado de (Cooperates et al., 2018).

Elementos utilizados en la automatización del intercambiador de calor CO₂-agua

En la **Tabla 3** se muestran los elementos básicos que se prevén utilizar en la automatización del intercambiador de calor CO₂-agua.

Tabla 3

Elementos que se prevén utilizar en la automatización

Elemento	Descripción
Disyuntor termomagnético	Elemento de protección para sobrecorrientes.
RTD's	Permiten tener una medida de la variable temperatura.

Elemento	Descripción
Sensor de presión	Permiten tener una medida de la variable presión.
Válvula de control	Válvula que se abre o cierra en un determinado porcentaje.
PLC y módulos de expansión	Permite realizar el control del proceso y acondicionamiento de señales de sensores.
Fuente de poder	Alimentación de equipos de 24 VDC.
Switch industrial	Permite conectar en red al controlador y pantalla HMI del proceso.
Relés	Elemento que sirve como interruptor y es accionado eléctricamente.
Luces piloto	Visualización del estado de una variable del proceso.
Pantalla táctil	Permite visualizar las variables que intervienen en el proceso.

Capítulo III

Diseño de hardware

En el presente capítulo se desarrollará el proceso de diseño de hardware que consiste en determinar los requisitos de instrumentación, control y supervisión, para cumplir los objetivos planteados en la automatización del intercambiador de calor CO₂-agua.

Se identificará los requisitos de diseño en su forma general para posteriormente explicar a detalle cada uno de los subsistemas que intervienen en la automatización (instrumentación, control y supervisión) .

Es de gran importancia determinar los factores que intervienen directamente en la automatización del intercambiador de calor CO₂-agua, de manera que se pueda identificar la necesidad de automatización y dar una solución de acuerdo a los requerimientos del proceso en general.

Requisitos de diseño

Existe una gran variedad de dispositivos de instrumentación, control y supervisión que permiten implementar la automatización del intercambiador de calor CO₂-agua, para el diseño de hardware se tomará en cuenta los rangos de funcionamiento, ventajas y desventajas de los dispositivos a utilizarse.

Después de un estudio y análisis del funcionamiento de la planta de producción de LIC en particular del proceso de deshumificación, se tomará en cuenta las variables principales que intervienen en el proceso; la presión y temperatura son indispensables para el funcionamiento normal de la planta de producción, es por esto que se efectuará la supervisión de los equipos de deshumificación (bomba de agua, compresor Larking y deshumificadores) en conjunto con la automatización del intercambiador de calor CO₂-agua para su funcionamiento en paralelo.

De forma general la automatización tendrá un controlador con sus respectivos módulos para adquirir las señales de instrumentación, una válvula de control y una interfaz hombre máquina para visualización de las variables del proceso.

Los requisitos generales de automatización son los siguientes:

- Fácil operación por los técnicos operadores.
- Fácil mantenimiento y accesibilidad de instrumentos de campo, control y supervisión.
- Controlador escalable.
- Comunicación en red con los diferentes equipos en planta CO₂.
- Supervisión desde una interfaz hombre-máquina.
- Protección eléctrica de los equipos.
- Sensores, actuadores, controladores de origen alemán o EUA.
- Precisión en la medición.

Arquitectura del sistema

El proceso de deshumificación consta de dos sub procesos, el sub proceso que controla y supervisa los equipos de deshumificación, entre estos tenemos: bomba de agua, compresor Larking y deshumificadores y el sub proceso que controla el intercambiador de calor CO₂-agua.

La distancia en que se encuentran los sub procesos es aproximadamente 120 m, es por esto que se empleará un tipo de comunicación industrial para el control y supervisión a distancia de todas las variables que operan en el proceso de deshumificación.

En la **Figura 29** se muestra la arquitectura del proceso de deshumificación que se divide en la supervisión de los equipos de deshumificación en conjunto con la automatización del intercambiador de calor CO₂-agua.

Figura 29

Arquitectura del proceso de deshumificación

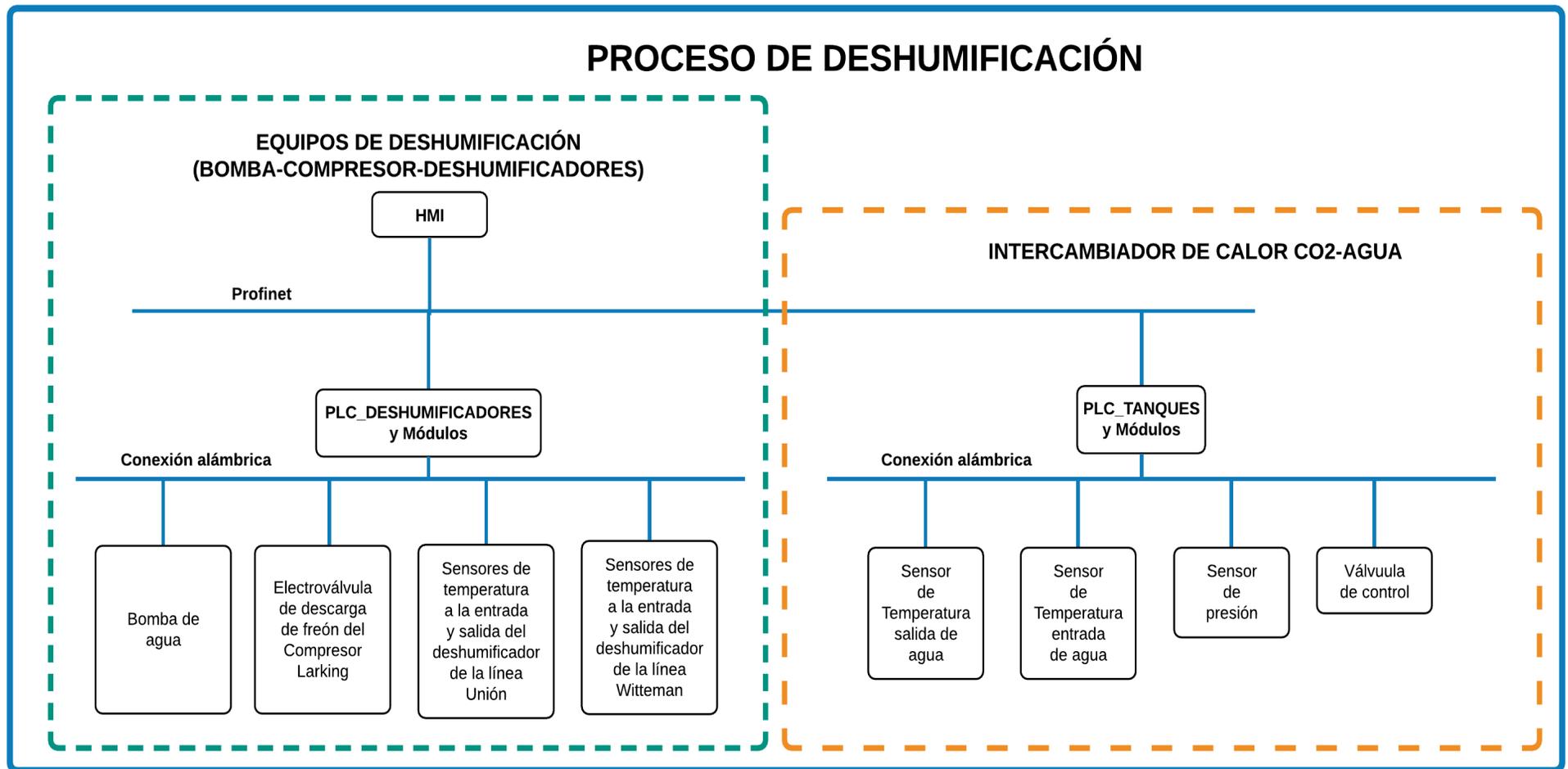


Diagrama P&ID

En la **Figura 30** y **Figura 31** se presentan los diagramas P&ID para representar el funcionamiento del intercambiador de calor CO₂-agua y compresor Larking.

Figura 30

Diagrama P&ID del intercambiador de calor CO₂-agua

COMUNICACIÓN INDUSTRIAL

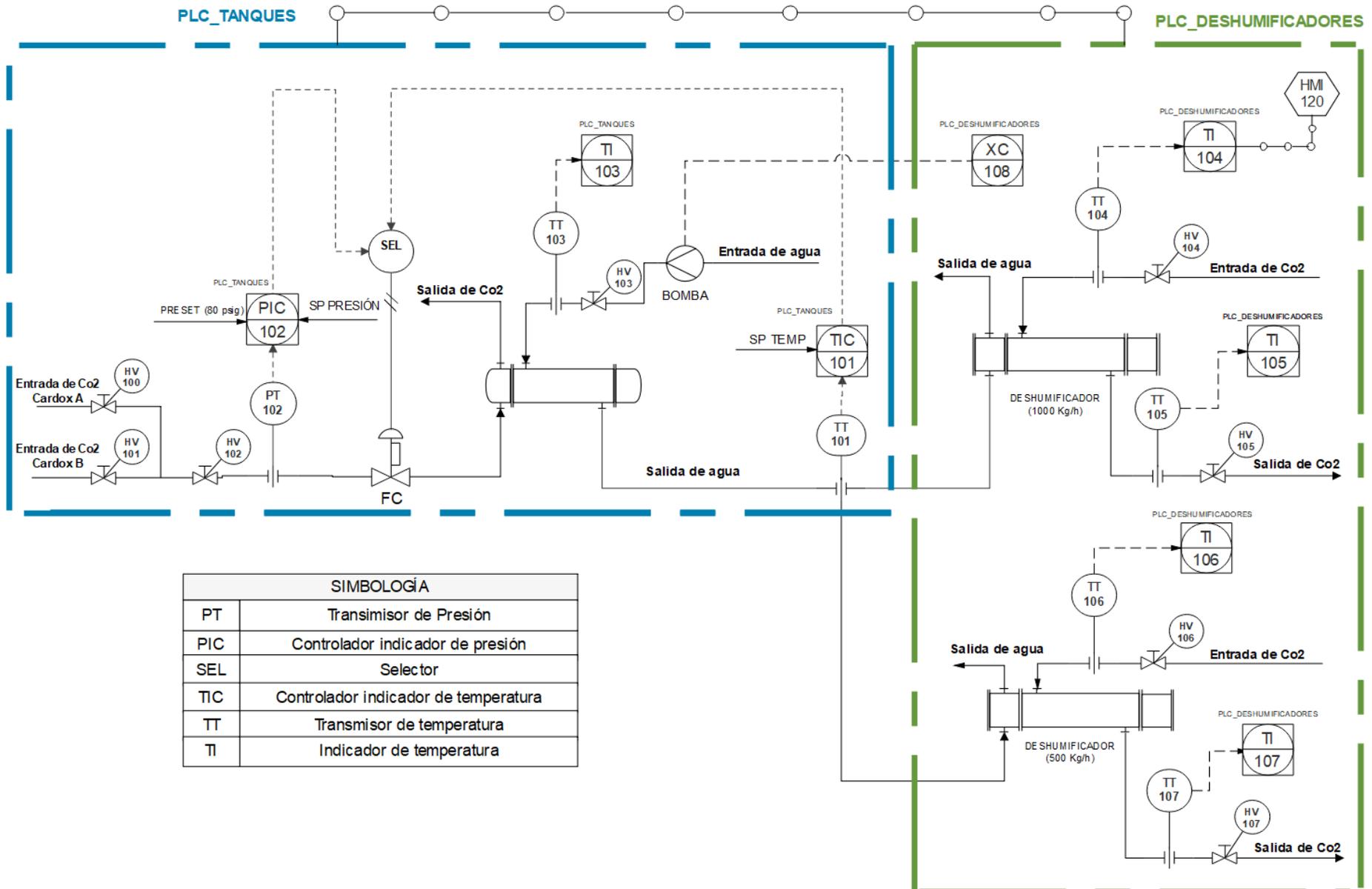
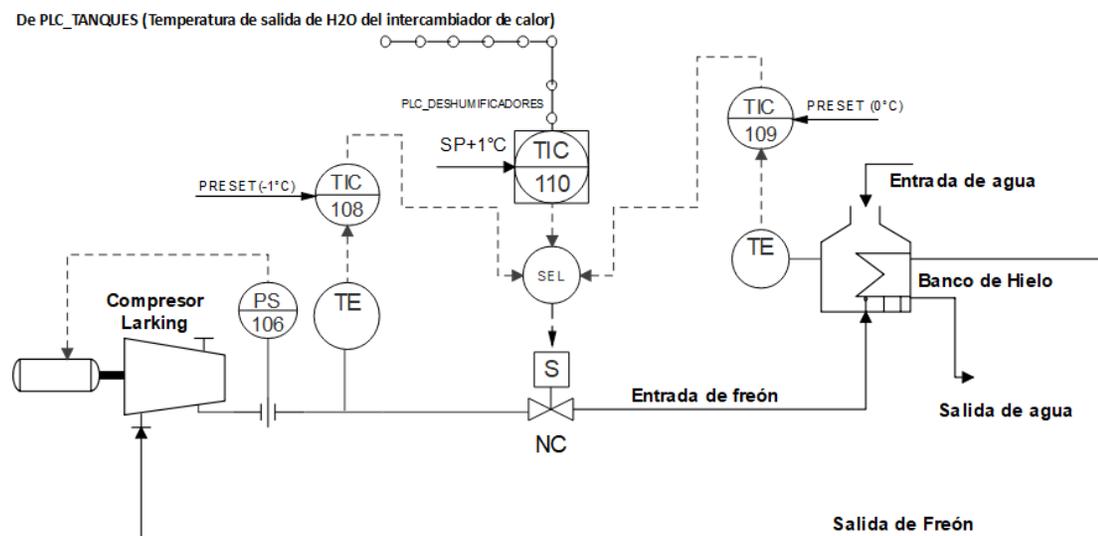


Figura 31

Diagrama P&ID del compresor Larking



SIMBOLOGÍA	
L108	Lazo de control de temperatura de freón
L109	Lazo de control de temperatura de agua
L110	Lazo de control de temperatura en el intercambiador de calor

Lógica de control

El controlador es fundamental en cualquier sistema de control ya que de este depende la adquisición de las señales de los sensores y la ejecución de las acciones de control. Se realizó durante los capítulos anteriores un estudio del sistema a controlar, entradas y salidas de los controladores, de manera que se procederá a diseñar la lógica de control que satisfaga los requerimientos de proceso de deshumificación.

En el diseño de la lógica de control se tendrá en cuenta las acciones de control a implementar en cada uno de los actuadores para lo cual se realizará una caracterización del proceso lo que incluirá el estudio de las acciones de control de los equipos (bomba de agua, electroválvula del compresor Larking, válvula de control del intercambiador de calor CO2-agua).

La correcta elección de control en los equipos permitirá al proceso funcionar eficientemente disminuyendo el consumo energético del proceso de deshumificación y en general del proceso de producción de LIC.

La acción de control se diseñará de acuerdo a los parámetros de cada actuador tomando en cuenta estabilidad, precisión y tiempo de respuesta.

La lógica de control se realizará en los controladores PLC_DESHUMIFICADORES y PLC_TANQUES; los controladores realizarán acciones independientes, pero se relacionarán por medio de una red de comunicación industrial ya que simultáneamente habrá el envío y recepción de datos para el control bidireccional de las variables en los controladores.

Selección de la técnica de control

Para el control eficiente del proceso de deshumificación se caracterizó la acción de control de cada actuador.

Motor de la bomba de agua

En la **Figura 32** se muestra la bomba de agua del proceso de deshumificación, su función es enviar el agua del reservorio hacia los deshumificadores para que se produzca el intercambio térmico entre el CO₂ y el agua.

Actualmente la bomba de agua está controlada por un contactor y botones, en el presente proyecto se implementará en el controlador PLC_DESHUMIFICADORES un control ON-OFF que permita el encendido y apagado de la bomba de agua desde el HMI local.

Figura 32

Bomba de agua del proceso de deshumificación



Electroválvula del compresor Larking

El control en la electroválvula se accionará cuando la temperatura de salida de agua sea mayor a 1°C que el set point seteado en la HMI local, de forma que el controlador enviará una señal de activación a la electroválvula haciendo que se cierre y posteriormente se apague el compresor Larking por alta presión de descarga de freón.

Debido al funcionamiento antes mencionado se empleará un control ON-OFF con histéresis en la electroválvula del compresor Larking para disminuir el número de conmutaciones del actuador permitiendo cuidar el equipo controlado.

Realizar el control de la electroválvula del compresor Larking ayudará al proceso a mejorar la eficiencia energética mediante la disminución del tiempo de funcionamiento del compresor Larking.

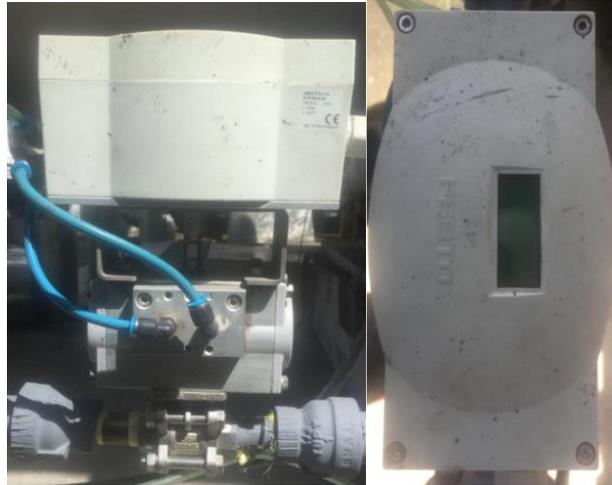
Válvula de control del intercambiador de calor CO₂-agua

La **Figura 33** muestra la válvula de control que permitirá el paso de CO₂ por el intercambiador de calor CO₂-agua para realizar el intercambio térmico con el agua, de forma

que el agua pueda perder potencia calorífica y llegar a la temperatura seteada desde el HMI local.

Figura 33

Válvula de control del intercambiador CO2-agua

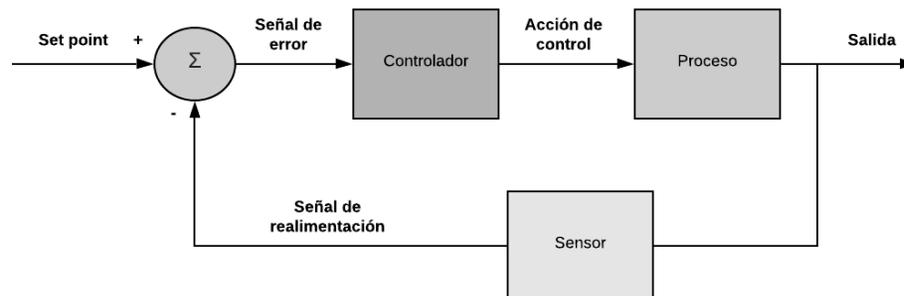


Control por realimentación. El control en el intercambiador de calor CO2-agua se realizará en lazo cerrado esto quiere decir que existe un lazo entre los elementos de control (controlador, actuador y sensor) como se muestra en la **Figura 34**.

La variable de proceso es medida y comparada con el set point, el objetivo de esta comparación es disponer una señal de error de referencia para el controlador; el propósito del lazo es que la variable de proceso sea igual al set point.

Figura 34

Control por realimentación



Caracterización del proceso. Para identificar la acción de control en la válvula del intercambiador de calor es necesario comprender el tipo de proceso a controlar, de forma que se realizará el modelamiento matemático de un sistema térmico.

Modelo matemático de un sistema Térmico. Se efectuará el modelamiento de un sistema térmico mediante la deducción de modelos térmicos vista en (Ogata, 2010).

Se efectuó la deducción para los tipos de transferencia de calor por conducción y convección como se indica en (Ogata, 2010) *“el calor fluye de una sustancia a otra de tres formas diferentes: por conducción, por convección y por radiación. Aquí sólo se considerarán la conducción y la convección”*.

$$q = k\Delta\theta \quad (1)$$

Donde

q = flujo de calor, kcal/seg

$\Delta\theta$ = diferencia de temperatura, °C

K = coeficiente, kcal/seg °C

El coeficiente K se obtiene mediante

$$K = \frac{kA}{\Delta X}, \text{ por conducción}$$

$$K = HA, \text{ por convección}$$

Donde

k = conductividad térmica, kcal/m seg °C

A = área normal para flujo de calor, m²

ΔX = espesor del conductor, m

H = coeficiente de convección, $\frac{\text{kcal}}{\text{m}^2} \text{ seg } ^\circ\text{C}$

Resistencia y capacitancia térmica

$$R = \frac{\text{cambio en la diferencia de temperatura, } ^\circ\text{C}}{\text{cambio en el flujo de calor, kcal/seg}}$$

$$C = \frac{\text{cambio en el calor almacenado, kcal}}{\text{cambio en la temperatura, } ^\circ\text{C}}$$

$$R = \frac{d(\Delta\theta)}{dq} = \frac{\Delta\theta}{q} \quad (2)$$

$$C = \frac{q(dt)}{d\theta} \quad (3)$$

Despejando "q" de la Ecuación 3 e igualando en la Ecuación 4

$$\frac{Cd\theta}{dt} = \frac{\Delta\theta}{R} \quad (4)$$

$$Cs\theta = \frac{\theta_f - \theta_i}{R} \quad (5)$$

$$\frac{\theta_i}{\theta_f} = \frac{1}{RCs + 1} \quad (6)$$

Identificación del proceso. Luego de conocer el modelo matemático de un sistema térmico el cual es de primer orden como se muestra en la **Ecuación 6** se procederá a identificar el proceso del intercambiador de calor CO2-agua.

Luego de adquirir los datos de tiempo, temperatura de entrada y salida de agua del intercambiador de calor se procederá a utilizar las herramientas de Matlab para la identificación del proceso a controlar.

En la **Figura 35** se observan los datos de entrada y salida de agua del intercambiador de calor CO2-agua, los mismo que son adquiridos con el controlador para posteriormente ser importados y normalizados en Excel.

Figura 35

Datos de temperatura del intercambiador de calor

Tiempo	Temperatu...	Temperatu...	Temperatu...	VarName5
Number	Number	Number	Number	Number
Tiempo	Temperatur...	Temperatur...	Temperatur...	
4	1.8000	0.5556	1.9000	1.8000
6	1.8000	0.5556	1.8000	1.8000
8	1.5000	0.6667	1.5000	1.5000
10	1.5000	0.6667	1.5000	1.5000
12	1.5000	0.6667	1.5000	1.5000
14	1.5000	0.6667	1.5000	1.5000
16	1.5000	0.6667	1.5000	1.5000
18	1.5000	0.6667	1.5000	1.5000
20	1.5000	0.6667	1.5000	1.5000
22	1.5000	0.6667	1.5000	1.5000
24	1.5000	0.6667	1.5000	1.5000
26	1.5000	0.6667	1.5000	1.5000
28	1.5000	0.6667	1.5000	1.5000
30	1.5000	0.6667	1.5000	1.5000
32	1.5000	0.6667	1.5000	1.5000
34	1.5000	0.6667	1.5000	1.5000
36	1.5000	0.6667	1.5000	1.5000
38	1.5000	0.6667	1.5000	1.5000
40	1.5000	0.6667	1.5000	1.5000
42	1.5000	0.6667	1.5000	1.5000
44	1.4000	0.7143	1.5000	1.4000
46	1.4000	0.7143	1.5000	1.4000
48	1.4000	0.7143	1.5000	1.4000
50	1.4000	0.7143	1.5000	1.4000
52	1.4000	0.7143	1.5000	1.4000

Los modelos de primer orden con retardo $G(s) = \frac{k}{Ts+1} e^{-Ls}$ son usualmente procesos

lentos y no oscilatorios como la temperatura, es por esto que se empleará este modelo para la identificación del proceso.

En la **Figura 36** se muestra la herramienta ident de Matlab para la estimación del proceso del intercambiador de calor CO2-agua.

Figura 36

Herramienta ident de Matlab para estimación del modelo del proceso

Par	Known	Value	Initial Guess	Bounds
K	<input type="checkbox"/>	0.6514	Auto	[-Inf Inf]
Tp1	<input type="checkbox"/>	34.3207	Auto	[0 34991.420]
Tp2	<input type="checkbox"/>	0	0	[0 Inf]
Tp3	<input type="checkbox"/>	0	0	[0 Inf]
Tz	<input type="checkbox"/>	0	0	[-Inf Inf]
Td	<input type="checkbox"/>	2.914	Auto	[0 30]

Disturbance Model:	None	Initial condition:	Auto	Regularization...
Focus:	Simulation	Covariance:	Estimate	Options...

<input type="checkbox"/> Display progress	Continue
---	----------

Donde

$$G(s) = \frac{k}{1 + T * s} * e^{-Ls}$$

$$k = 0.6514$$

$$T = 34.321$$

$$L = 2.914$$

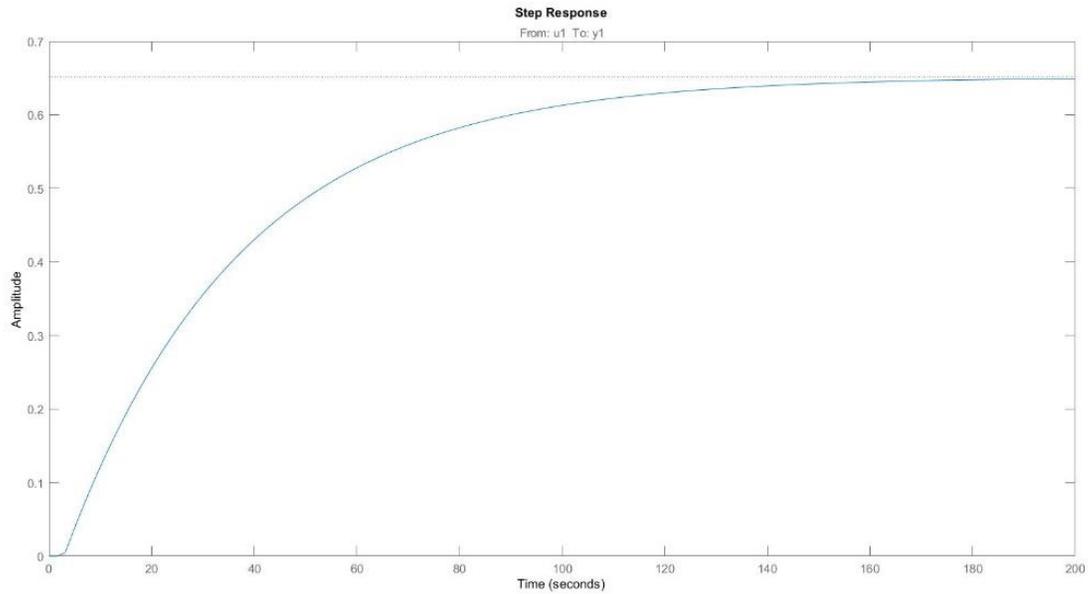
$$G(s) = \frac{0.6514}{1 + 34.321s} * e^{-2.914s}$$

La **Figura 37** muestra la función de transferencia en lazo abierto ante una entrada escalón del proceso, donde para la sintonización del controlador se empleará las reglas de Zingler Nichols para el control realimentado.

Debido que la **Figura 37** muestra una forma sigmoïdal se aplicará el primer método determinado por Zingler Nichols, debido que existe un retardo L en el proceso se concluye que se empleará la acción integral en el controlador.

Figura 37

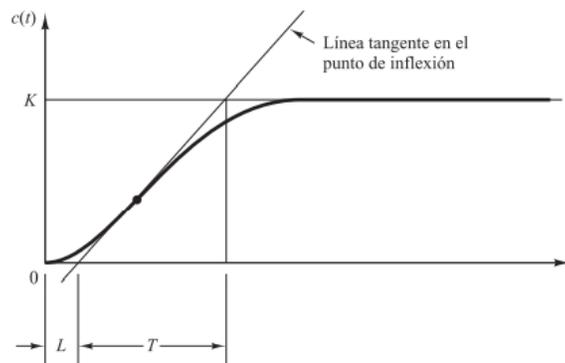
Función de transferencia del proceso



Sintonización PID del controlador. Como se mencionó anteriormente se empleará las reglas de Ziegler-Nichols para sintonizar controladores PID donde se utilizará el primer método de Ziegler Nichols debido que el proceso ante una entrada escalón carece de integradores y polos dominantes.

Figura 38

Curva sigmoideal



Nota: Tomado de (Ogata, 2010).

Tabla 4

Regla de sintonía de Zingler Nichols, primer método

Tipo de controlador	Kp	Ti	Td
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$0.9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2 \frac{T}{L}$	2 L	0.5 L

Nota: Tomado de (Ogata, 2010).

$$k_p = 1.2 \frac{T}{L} = \frac{41.18}{2.91} = 14.1$$

$$T_i = 2 L = 5.82 \text{ s}$$

$$G_c(s) = 0.6 T \frac{\left(s + \frac{1}{L}\right)^2}{s}$$

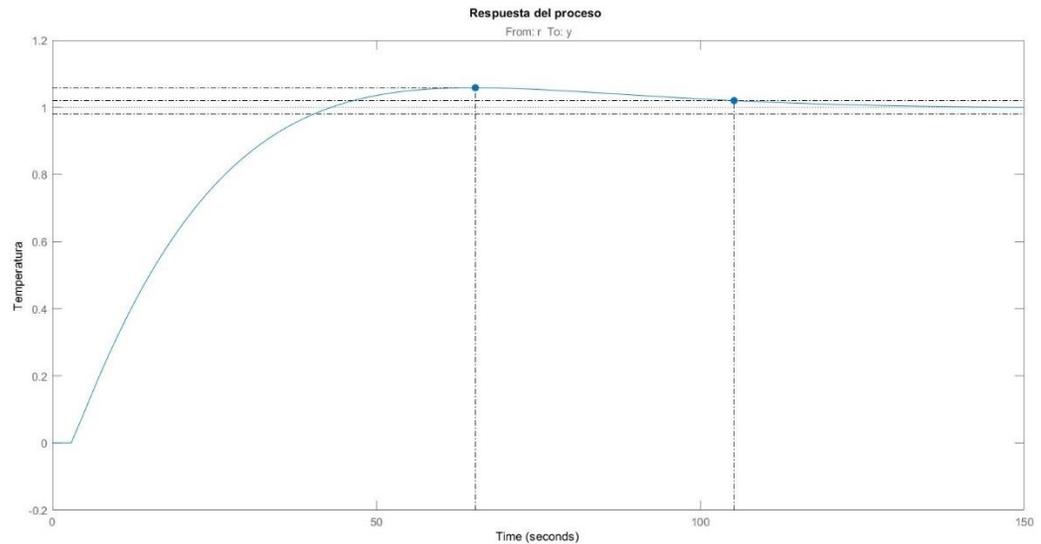
La función de transferencia del controlador sintonizado con el primer método de Zingler Nichols se muestra a continuación.

$$G_c(s) = 20.59 \frac{\left(s + \frac{1}{2.91}\right)^2}{s}$$

$$G_c(s) = \frac{20.59 s^2 + 14.14 s + 2.47}{s}$$

En la **Figura 39** se muestra el comportamiento del control de temperatura PID en el proceso del intercambiador de calor CO2-agua.

Figura 39*Comportamiento del proceso*



Control PID en Tia Portal. Debido a la caracterización del proceso donde se controlará la temperatura de salida de agua en el intercambiador de calor CO2-agua, la temperatura al tener cambios lentos en el tiempo se propuso una estructura de regulación PID.

El control de la válvula se realizará mediante la acción de control PID, este tipo de control permitirá la abertura en un cierto porcentaje de la válvula dependiendo de la temperatura de salida de agua, la configuración de la acción de control es directa debido que si la señal de temperatura de salida del agua aumenta la señal de salida del controlador aumentará proporcional.

La **Figura 40** muestra el tipo de regulador a utilizarse para la magnitud física de temperatura.

Figura 40

Estructura del regulador de la variable física medida

Magnitud física	Estructura de regulador			
	P	PD	PI	PID
	Error de regulación permanente		Error de regulación no permanente	
Temperatura	Para exigencias reducidas y sistemas P con $T_u/T_g < 0,1$	Muy apta	Estructuras de regulador idóneas para exigencias elevadas (con excepción de reguladores especiales adaptados)	
Presión	Apta, si el tiempo de retardo no es significativo	No apta	Estructuras de regulador idóneas para exigencias elevadas (con excepción de reguladores especiales adaptados)	
Caudal	No apta, porque el rango GAIN requerido suele ser demasiado grande	No apta	Válido, pero el regulador I solo suele ser mejor	Casi no es necesaria

Nota. Tomado de (SIEMENS, 2019).

Constantes del PID. Para el ajuste de los parámetros del controlador se utilizó la herramienta de regulación que provee Tia Portal.

Para que la regulación arroje buenos resultados en el control es imprescindible elegir un tipo de regulador apropiado, que pueda ser adaptado óptimamente a la rapidez de respuesta del sistema regulado. Por lo tanto, es esencial conocer a fondo los datos característicos y el tipo del sistema regulado para poder configurar la acción P, I y D del regulador. (SIEMENS, 2019)

La **Figura 41** muestra la fórmula empírica utilizada por Tia Portal para ajustar las constantes del regulador PID.

Figura 41

Fórmula empírica para ajustar los parámetros del PID

Estructura de regulador	Ajuste
P	$GAIN \approx v_{max} \times T_u [^{\circ}C]$
PI	$GAIN \approx 1,2 \times v_{max} \times T_u [^{\circ}C]$ $TI \approx 4 \times T_u [min]$
PD	$GAIN \approx 0,83 \times v_{max} \times T_u [^{\circ}C]$ $TD \approx 0,25 \times v_{max} \times T_u [min]$ $TM_LAG \approx 0,5 \times TD [min]$
PID	$GAIN \approx 0,83 \times v_{max} \times T_u [^{\circ}C]$ $TI \approx 2 \times T_u [min]$ $TD \approx 0,4 \times T_u [min]$ $TM_LAG \approx 0,5 \times TD [min]$
PD/PID	$GAIN \approx 0,4 \times v_{max} \times T_u [^{\circ}C]$ $TI \approx 2 \times T_u [min]$ $TD \approx 0,4 \times T_u [min]$ $TM_LAG \approx 0,5 \times TD [min]$

Nota. Tomado de (SIEMENS, 2019).

Control ON-OFF. La válvula dispone de un control de presión ON-OFF, este tipo de control de presión funciona cuando en la entrada de CO₂ del intercambiador de calor CO₂-agua por medio de un sensor de presión se detecta baja presión en los tanques de almacenamiento de mermas de CO₂ (presión baja < 80 psig).

El control fue implementado ya que los tanques de almacenamiento de mermas de CO₂ proveen de gas de instrumentación a los equipos del proceso de producción de LIC, de manera que los tanques de almacenamiento deben estar presurizados con al menos 70 psig.

La **Tabla 5** muestra las condiciones para el funcionamiento del control de temperatura del intercambiador de calor CO₂-agua de acuerdo a la presión seteada y presión de los tanques de almacenamiento de mermas de CO₂.

Tabla 5

Condiciones iniciales de funcionamiento del control de temperatura

Condiciones iniciales de presión	Control de temperatura
<ul style="list-style-type: none"> Presión en Tanques < 80 psig 	<ul style="list-style-type: none"> Control de temperatura OFF / Válvula de control cerrada
<ul style="list-style-type: none"> Presión en Tanques > 80 psig y Presión en Tanques \geq set point de presión 	<ul style="list-style-type: none"> Funcionamiento del Control de temperatura en Automático o Manual, funcionará el control de temperatura hasta que la Presión en tanques sea < 80 psig
<ul style="list-style-type: none"> Presión en Tanques > 80 psig y Presión en Tanques < set point de presión 	<ul style="list-style-type: none"> Control de temperatura OFF/ Válvula de control cerrada

Diseño del subsistema de instrumentación

La instrumentación de un proceso industrial es indispensable cuando se requiere controlar de manera eficiente una máquina o proceso, la correcta medición de una variable posibilita al controlador tener una señal de referencia que es la diferencia entre el set point y la variable medida o variable de proceso.

El control a implementarse en la automatización del intercambiador de calor CO₂-agua será por retroalimentación, en este tipo de control la entrada del controlador es la diferencia entre set point y la señal medida, de tal forma que la salida del controlador tenga la señal correcta para mantener o acercar la variable medida al set point.

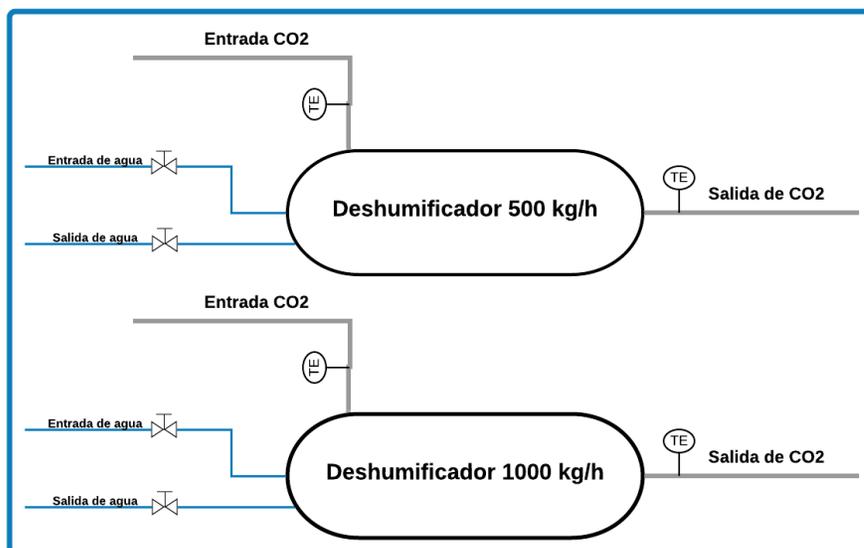
Para el diseño de instrumentación se utilizaron sensores con rangos referente a la variable donde se va a medir, estos deberán ser de tipo industrial y fácil mantenimiento.

Instrumentación de los deshumificadores

Actualmente no existe una medición de temperatura en los deshumificadores para verificar la eficiencia del proceso de deshumificación. Se instalará sensores de temperatura a la entrada y salida de los deshumificadores para monitorear el intercambio térmico de CO₂ con el agua. La instrumentación ayudará a tener una óptima supervisión en un punto crítico del proceso de producción de LIC.

Además, se utilizará válvulas manuales a la entrada y salida de agua en los deshumificadores para operación manual de interrupción de flujo de agua hacia los deshumificadores, esta instrumentación se la hará para facilitar el mantenimiento de tuberías y accesorios.

En la **Figura 42** se muestra la instrumentación de los deshumificadores por medio de sensores de temperatura y válvulas manuales.

Figura 42*Instrumentación de los deshumificadores****Instrumentación del intercambiador de calor CO2-agua***

La instrumentación del intercambiador de calor CO2-agua consiste en la instalación de sensores de temperatura a la entrada y salida de agua, sensor de presión a la entrada de CO2 y una válvula de control a la entrada de CO2.

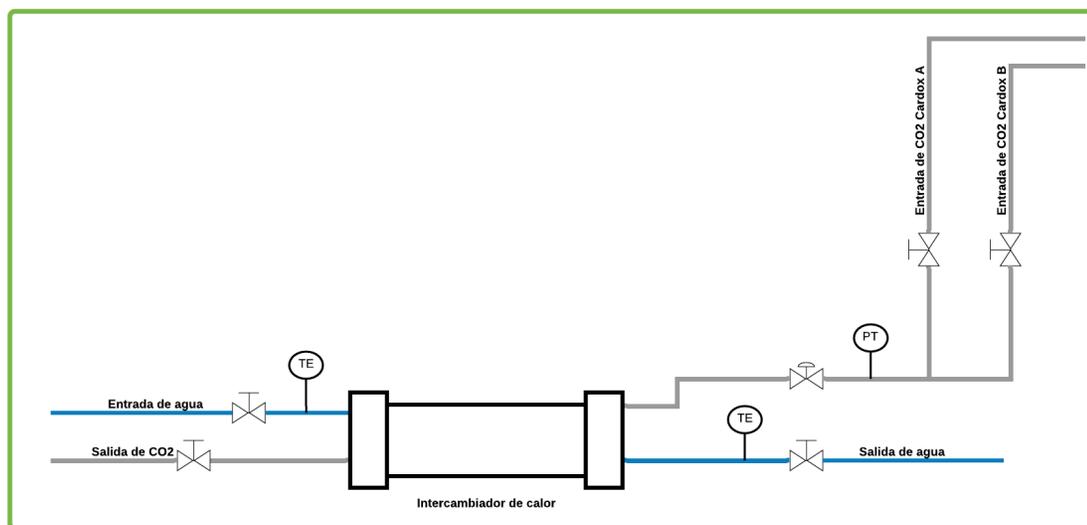
Los elementos de campo son fundamentales para realizar un control eficiente en el intercambiador de calor, debido a que se realizará un control por retroalimentación es indispensable una medición de temperatura a la salida de agua para comparar con el set point deseado y realizar el control adecuado para posteriormente actuar en el elemento final o válvula de control.

Además, se utilizará válvulas manuales a la entrada y salida de agua en el intercambiador de calor CO2-agua. Se empleará dos válvulas manuales para cada entrada de CO2 provenientes de cardox, esto se realizará para operación manual de interrupción de flujo de agua y CO2 respectivamente.

En la **Figura 43** se muestra la instrumentación del intercambiador de calor CO₂-agua por medio de sensores de temperatura, sensor de presión, válvula de control y válvulas manuales.

Figura 43

Instrumentación el intercambiador de calor CO₂-agua



Selección de sensores de temperatura

Para realizar una instrumentación de acuerdo a los requerimientos del sistema se deben conocer con anterioridad la temperatura de CO₂ y agua en los puntos a medir, se utilizará un pirómetro que es un dispositivo que se basa en infrarrojo para medir temperatura, de esta manera se tendrá un rango de medición para seleccionar el sensor que cumpla con las características del proceso.

En la **Tabla 6** se muestra el rango de medición de temperatura a la entrada y salida de los deshumificadores medidas con el pirómetro.

Tabla 6

Rango de medición de temperatura de CO₂

	Temperatura de entrada de CO ₂	Temperatura de salida de CO ₂
Línea Unión	33 °C a 35 °C	6 °C a 8°C

	Temperatura de entrada de CO2	Temperatura de salida de CO2
Línea Witteman	38 °C a 40 °C	10 °C a 12°C

En la **Tabla 7** se muestra el rango de medición de temperatura de CO2 y agua en el intercambiador de calor CO2-agua medidas con el pirómetro.

Tabla 7

Medición de temperatura en el intercambiador de calor CO2-agua

	CO2	Agua
Temperatura de entrada	-23 °C a -15 °C	3 °C a 10°C
Temperatura de salida	-3 °C a 0 °C	1°C a 10 °C

Matriz de priorización para la selección del sensor de temperatura

Se empleará la matriz de priorización como herramienta para la selección del tipo de sensor de temperatura, de forma que se darán ponderaciones y criterios para elegir la mejor opción de acuerdo a la aplicación del presente proyecto.

En la **Figura 44** se muestra la comparación de los sensores tipo termopar, RTD y termistores.

Figura 44

Comparación de sensores de temperatura

Criterios	Termopar	RTD	Termistor
Rango de temperaturas	Muy amplio -450 °F +4200 °F	Amplio -400 °F +1200 °F	Estrecho -100 °F +500 °F
Intercambiabilidad	Bueno	Excelente	Deficiente a razonable
Estabilidad a largo plazo	Deficiente a razonable	Bueno	Deficiente
Precisión	Mediano	Alto	Mediano
Repetibilidad	Razonable	Excelente	Aceptable a bueno
Sensibilidad (salida)	Bajo	Mediano	Muy alta
Respuesta	Medio a rápido	Mediano	Medio a rápido
Linealidad	Razonable	Bueno	Deficiente
Auto calentamiento	No	Muy bajo a bajo	Alto
Sensibilidad de punto (extremo)	Excelente	Razonable	Bueno
Efecto inicial	Alto	Mediano	Bajo
Tamaño/embalaje	Pequeño a grande	Mediano a pequeño	Pequeño a mediano

Nota. Tomado de (WATLOW, 2021).

En la **Figura 45** se muestra las ventajas y desventajas de los sensores de temperatura de manera que se tomará en cuenta para la instrumentación el tipo de sensor que cumpla con los mejores requerimientos del sistema.

Figura 45

Ventajas y desventajas de los sensores de temperatura

Sensor	Ventajas	Desventajas
Termopar	<ul style="list-style-type: none"> No hay problemas de cable conductor de resistencia Respuesta más rápida Sencillo, resistente Barato Funcionamiento a alta temperatura Detección de temperatura del punto 	<ul style="list-style-type: none"> No lineal Baja tensión Menos estable, repetible El menos sensible
RTD	<ul style="list-style-type: none"> El más estable, preciso Resistente a la contaminación Más lineal que el termopar Detección de temperatura del área La medición de la temperatura más repetible 	<ul style="list-style-type: none"> Se requiere una fuente de corriente Auto calentamiento Tiempo de respuesta lento Baja sensibilidad a pequeñas fluctuaciones de la temperatura
Termistor	<ul style="list-style-type: none"> Alta salida, rápido Medición de ohmios de dos cables Económico Detección de temperatura del punto 	<ul style="list-style-type: none"> No lineal Rango limitado Frágil Se requiere una fuente de corriente Auto calentamiento

Nota. Tomado de (WATLOW, 2021).

Criterios. Los criterios a tomar en cuenta en la selección del tipo de sensor de temperatura se efectuaron luego de conocer el proceso y las características en cada uno de los puntos donde se realizará la instrumentación.

- Rango de operación
- Precisión
- Tiempo de Respuesta
- Compatibilidad con condiciones de operación

Ponderaciones. En la **Tabla 8** se muestra la ponderación de acuerdo a los criterios más críticos para la aplicación, disponiendo un porcentaje de acuerdo a la importancia en la instrumentación.

Tabla 8

Ponderaciones y criterios de sensores de temperatura

Criterio	Ponderación
Rango de operación	30%
Precisión	30%
Tiempo de Respuesta	10%
Compatibilidad con condiciones de operación	30%

Para calificar cada una de los criterios se tomó en cuenta las características descritas en la **Figura 44**.

En la **Tabla 9** se muestra la matriz de priorización de los sensores de temperatura, de manera que, el sensor que se ajusta a los requerimientos del sistema es del tipo RTD.

Tabla 9

Matriz de selección del sensor de temperatura

	Rango de temperatura	%	Precisión	%	Tiempo de respuesta	%	Compatibilidad con condiciones de operación	%	Total
Termopar	3	0.18	4	0.24	5	0.10	4	0.24	0.76
RTD	4	0.24	5	0.30	4	0.8	5	0.30	0.94
Termistor	4	0.24	4	0.24	5	0.10	4	0.24	0.82

Sensor de temperatura RTD - PT100

Los sensores empleados en la instrumentación de los deshumificadores es del tipo RTD, la operación normal de este sensor es que al variar la temperatura produce un cambio en su resistencia. El sensor RTD PT100 está construido comúnmente con un alambre de platino y su operación específica es que a una temperatura de 0 °C su resistencia es de 100 ohm, debido a su funcionamiento creciente existen tablas donde se puede verificar la temperatura a una resistencia específica. (Arian control e instrumentación, 2011)

El tipo de conexión del sensor PT100 establecida en la instrumentación es a 3 hilos debido que cumple con los requerimientos de conexión en la aplicación, la conexión entre los sensores y el tablero eléctrico se encuentra a una distancia de 10 m, a continuación, se dará una breve explicación de la conexión a 3 hilos con el módulo para RTD.

En la **Figura 46** se muestra la forma del sensor PT100 encapsulado a utilizarse en los deshumificadores y en intercambiador de calor CO2-agua.

Figura 46

Sensor de temperatura industrial encapsulado



Nota. Tomado de (Industry online support international, 2018).

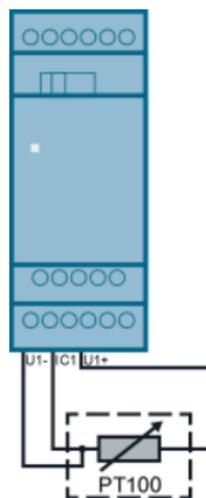
Conexión a 3 hilos del sensor PT100 con el módulo para RTD

La conexión a utilizarse en los sensores de temperatura PT100 es a 3 hilos, esto es debido a la precisión requerida en la medición y distancia de conexión entre los sensores de temperatura y el módulo de RTD, de forma que este tipo de conexión contrarresta el efecto de resistencia en los cables. “El único requisito es que los tres cables tengan la misma resistencia eléctrica pues el sistema de medición se basa en el puente de Wheatstone” (Arian control e instrumentación, 2011).

En la **Figura 47** se muestra la conexión a 3 hilos de PT100 con el módulo de RTD.

Figura 47

Conexión de PT100 a 3 hilos al módulo RTD



Nota. Tomado de (Industry Online Support Argentina, 2016).

Características Técnicas del sensor PT100

En la **Figura 48** se muestra el rango de medición del sensor de temperatura PT100 que es de -200 °C a 850 °C y cumple con los requerimientos de temperatura del proceso, para lo cual este sensor será utilizado tanto en la instrumentación de los deshumificadores y en la automatización del intercambiador de calor CO2-agua.

Figura 48

Características técnicas de termorresistencias

Entrada	Rango de medición °C (°F)	Alcance de medida mínimo °C (°F)	Precisión digital °C (°F)
Pt25 (IEC 60751)	-200 a +850 (-328 a 1562)	10 (18)	0,2 (0.36)
Pt50 (IEC 60751)	-200 a +850 (-328 a 1562)	10 (18)	0,15 (0.27)
Pt100 a Pt200 (IEC 60751)	-200 a +850 (-328 a 1562)	10 (18)	0,1 (0.18)
Pt500 (IEC 60751)	-200 a +850 (-328 a 1562)	10 (18)	0,15 (0.27)
Pt1000 (IEC 60751)	-200 a +350 (-328 a 662)	10 (18)	0,15 (0.27)
Pt25 (JIS C1604-81)	-200 a +649 (-328 a 1200)	10 (18)	0,2 (0.36)
Pt50 (JIS C1604-81)	-200 a +649 (-328 a 1200)	10 (18)	0,15 (0.27)
Pt100 a Pt200 (JIS C1604-81)	-200 a +649 (-328 a 1200)	10 (18)	0,1 (0.18)
Pt500 (JIS C1604-81)	-200 a +649 (-328 a 1200)	10 (18)	0,15 (0.27)
Pt1000 (JIS C1604-81)	-200 a +350 (-328 a 662)	10 (18)	0,15 (0.27)
Ni25 a Ni1000	-60 a +250 (-76 a 482)	10 (18)	0,1 (0.18)

Nota. Tomado de (Th, 2006).

Selección del sensor de presión

El sensor de presión transmite una señal análoga de 4 a 20 mA , esta señal será procesada dentro del controlador para su utilización en la automatización del intercambiador de calor CO2-agua.

La instrumentación del intercambiador de calor CO2-agua consiste en la implementación de un transmisor de presión a la entrada de CO2 del intercambiador de calor, el tipo de sensor a utilizarse debe manejar una presión nominal de 300 psig, esto debido a la presión máxima de los tanques de almacenamiento de mermas de CO2.

Matriz de priorización para la selección del sensor de presión

Se empleará la matriz de priorización como herramienta para la selección del tipo de sensor de presión, de forma que se darán ponderaciones y criterios para elegir la mejor opción de acuerdo a la aplicación del presente proyecto.

Criterios. Los criterios a tomar en cuenta para la selección del tipo de sensor de presión se efectuaron luego de conocer el proceso y las características en cada uno de los puntos donde se realizará la instrumentación.

- Rango de operación
- Precisión
- Condiciones de operación
- Costo

Ponderaciones. En la **Tabla 10** se muestra la ponderación de acuerdo a los criterios más críticos para la aplicación, disponiendo un porcentaje de acuerdo a la importancia en la instrumentación.

Tabla 10

Ponderaciones de criterios de sensores de temperatura

Criterio	Ponderación
Rango de operación	30%
Precisión	20%
Condiciones de operación	30%
Costo	20%

Para calificar cada una de los criterios se tomó en cuenta las características descritas en la **Tabla 2** del Capítulo II.

En la **Tabla 11** se muestra la matriz de priorización del sensor de presión, de manera que, el sensor que se ajusta a los requerimientos del sistema es del tipo piezoeléctrico.

Tabla 11

Matriz de priorización del sensor de presión

	Rango de operación	%	Precisión	%	Condiciones de operación	%	Costo	%	Total
Transmisor resistivo	4	0.24	4	0.16	4	0.24	4	0.16	0.80
Transmisor capacitivo	3	0.18	5	0.20	3	0.18	3	0.12	0.68
Transmisor magnético	2	0.12	5	0.20	3	0.18	3	0.12	0.62
Transmisor piezoeléctrico	5	0.30	5	0.20	5	0.30	4	0.16	0.96

En la **Figura 49** se muestra la forma del sensor de presión piezoeléctrico a utilizarse en el intercambiador de calor CO2-agua.

Figura 49

Sensor de presión

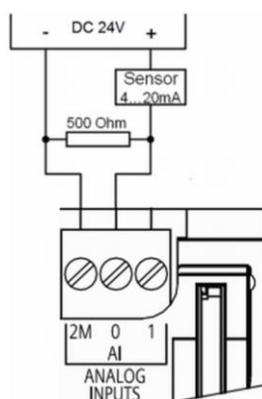


Nota. Tomado de (Distribution, 2011).

En la **Figura 50** se muestra la conexión del sensor de presión piezoeléctrico a la entrada analógica del controlador en el intercambiador de calor CO₂-agua.

Figura 50

Conexión del sensor de presión de 4 a 20 mA



Nota. Tomado de (Industry online support international, 2013).

Características técnicas del sensor de presión

En la **Figura 51** se muestra las características técnicas básicas del sensor de presión piezoeléctrico de marca Siemens, las mismas que deben incluir una señal de salida de 4 a 20 mA y un rango de medición de presión nominal de 300 psig. Se utilizará un sensor de presión de marca Siemens con las características antes descritas, a continuación, se da a conocer las características técnicas generales del sensor.

Figura 51*Características técnicas del sensor de presión*

Rango de medida para presión relativa (solo para el mercado estadounidense)	Limite de sobrecarga	Presión de ruptura
0 ... 10 psi g	$\geq -5,8 / \leq 35$ psi g	> 35 psi
0 ... 15 psi g	$\geq -5,8 / \leq 35$ psi g	> 35 psi
3 ... 15 psi g	$\geq -5,8 / \leq 35$ psi g	> 35 psi
0 ... 20 psi g	$\geq -5,8 / \leq 50$ psi g	> 50 psi
0 ... 30 psi g	$\geq -5,8 / \leq 80$ psi g	> 80 psi
0 ... 60 psi g	$\geq -11,5 / \leq 140$ psi g	> 140 psi
0 ... 100 psi g	$\geq -14,5 / \leq 200$ psi g	> 200 psi
0 ... 150 psi g	$\geq -14,5 / \leq 350$ psi g	> 350 psi
0 ... 200 psi g	$\geq -14,5 / \leq 550$ psi g	> 550 psi
0 ... 300 psi g	$\geq -14,5 / \leq 800$ psi g	> 800 psi
0 ... 500 psi g	$\geq -14,5 / \leq 1\ 400$ psi g	> 1 400 psi
0 ... 750 psi g	$\geq -14,5 / \leq 2\ 000$ psi g	> 2 000 psi
0 ... 1 000 psi g	$\geq -14,5 / \leq 2\ 000$ psi g	> 2 000 psi

Nota. Tomado de (Th, 2006).

Selección de la válvula de control

La válvula de control es comúnmente una válvula que varía su orificio según la posición de un actuador, su funcionamiento es indispensable en la instrumentación del intercambiador de calor CO₂-agua ya que posibilita el paso de flujo de CO₂ en un cierto porcentaje. La señal de salida del controlador hacia la válvula estará configurada en voltaje, esto quiere decir que la salida del controlador variará de 0 a 10 V.

Se seleccionará una válvula de control con un posicionador CMSX Festo que existe en stock en la planta de CO₂, esto se realizará para reducir costos del proyecto y utilizar los equipos existentes en planta de CO₂, la válvula de control ha sido utilizada en diferentes aplicaciones similares dentro de la planta de CO₂ y cumple con los requerimientos del sistema.

Posicionador CMSX Festo

El CMSX es un posicionador digital electroneumático. Permite una regulación sencilla y eficaz de la posición de válvulas de proceso activadas mediante actuadores neumáticos. (Cubre, 2019)

El establecimiento del valor nominal se realiza a través de señales de corriente de 0/4 ... 20 mA o señales de tensión de 0 ... 10 V, mientras que la indicación analógica de la posición tiene lugar través de una señal de corriente de 4 ... 20 mA. (Cubre, 2019)

En la **Figura 52** se muestra el posicionador industrial marca Festo a utilizarse en el intercambiador de calor CO2-agua.

Figura 52

Actuador Giratorio marca Festo



Nota. Tomado de (Automatización Industrial, Robótica e Industria 4.0, 2016).

Características Técnicas del Posicionador CMSX Festo

Las características técnicas del posicionador deben incluir una señal de entrada analógica de 0 a 10 V con un funcionamiento en un entorno industrial para lo cual se utilizará un posicionador de marca Festo con las características antes descritas, a continuación, se da a conocer en la **Tabla 12** las características técnicas generales del posicionador.

Tabla 12

Características técnicas del posicionador CMSX Festo

Características	Propiedades
Posicionador	Posicionador para automatización de procesos
Tipo de construcción	Posicionador, detección integrada de recorrido/ángulo
Forma de indicación	LCD, retroiluminado
Valor nominal	Configurable (0...10 V, 0...20 mA, 4...20 mA)
Retroseñal de posición	4..20 mA
Función	De doble efecto
Función de seguridad	Abrir y cerrar en caso de fallo del sistema

Nota. Tomado de (Cubre, 2019).

Diseño del subsistema de control

Para la determinación de los requerimientos de diseño de control se debe conocer el funcionamiento del proceso de deshumificación para posterior determinar entradas y salidas del sistema de control. Para el diseño del subsistema de control se debe seleccionar un dispositivo controlador que permita interactuar con las entradas y salidas de manera que se pueda controlar un proceso industrial.

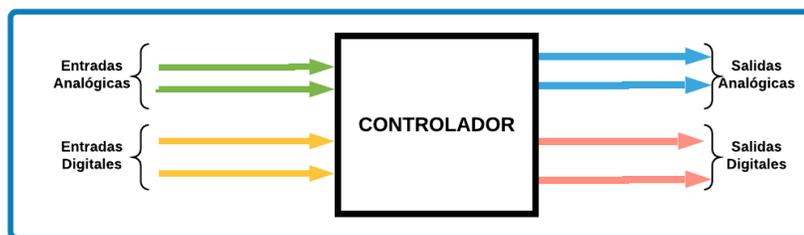
El dispositivo controlador a utilizarse permitirá el funcionamiento en el entorno industrial donde se desarrollará el presente proyecto.

El controlador a utilizarse debe ser capaz de recepción y envió de señales digitales, así como analógicas, además de ser flexible, modular y ser capaz de comunicarse con los demás equipos de control de la planta de producción LIC.

Se debe considerar que se utilizará una comunicación entre dos dispositivos controladores donde uno de ellos se encuentra instalado en campo, de forma que el nuevo controlador a seleccionarse debe cumplir con los requerimientos de comunicación con el controlador existente.

Figura 53

Arquitectura de entradas y salidas del controlador



Determinación de entradas y salidas del controlador

La automatización del intercambiador de calor CO₂-agua para funcionar en paralelo con el sistema de compresión Larking y cumplir con el objetivo de disminuir el consumo energético de la planta de producción LIC es indispensable que sus entradas y salidas estén correlacionadas de manera que se determinará exclusivamente para el proyecto a desarrollarse las entradas y salidas de los PLC's involucrados en el proyecto.

Se denominará al primer controlador PLC_DESHUMIFICADORES y al controlador instalado en campo como PLC_TANQUES.

Además, se debe recalcar que el controlador PLC_DESHUMIFICADORES es el que se encontrará en el área específica del proceso de deshumificación y el controlador PLC_TANQUES es el que está junto a los tanques de almacenamiento de mermas de CO₂ denominados cardox.

Entradas del controlador PLC_DESHUMIFICADORES

En la **Tabla 13** se muestra las variables de entrada del controlador PLC_DESHUMIFICADORES y el tipo de señal, digital o analógica.

Tabla 13

Entradas del controlador PLC_DESHUMIFICADORES

Variable	Tipo
Temperatura de entrada de CO ₂ Unión	Analógica

Variable	Tipo
Temperatura de salida de CO2 Unión	Analógica
Temperatura de entrada de CO2 Witteman	Analógica
Temperatura de salida de CO2 Witteman	Analógica
Paro de emergencia	Digital

Salidas del controlador PLC_DESHUMIFICADORES

En la **Tabla 14** se muestra el tipo de señal de salida en los actuadores del controlador PLC_DESHUMIFICADORES, se empleará una salida para el encendido y apagado de la bomba de agua y otra para el control de la electroválvula de descarga de freón del compresor Larking.

Tabla 14

Salidas del controlador PLC_DESHUMIFICADORES

Actuador	Tipo
Bomba de agua	Digital
Electroválvula de descarga de freón de C. Larking	Digital

Entradas del controlador PLC_TANQUES

Se utilizarán 2 entradas analógicas para la medición de temperatura por medio sensores RTD's y una entrada analógica para la medición de presión por medio de un sensor de presión.

En la **Tabla 15** se determina las entradas del controlador PLC_TANQUES, se debe recalcar que la adquisición de temperatura al controlador es por medio de módulos para RTD.

Tabla 15

Entradas de controlador PLC_TANQUES

Variable	Tipo
Temperatura de entrada de agua en el intercambiador de calor	Analógica
Temperatura de salida de agua en el intercambiador de calor	Analógica
Presión de entrada de CO2	Analógica

Salidas del controlador PLC_TANQUES

En la **Tabla 16** se determina las salidas del controlador PLC_TANQUES, se debe recalcar que se utilizará un módulo de salidas análogas del controlador seleccionado.

Tabla 16

Salida del controlador PLC_TANQUES

Variable	Tipo
Válvula de control	Analógica

Diagrama de entradas y salidas

Se presentará el diagrama de entradas y salidas para una mayor comprensión de las variables que están involucradas en el proceso y los actuadores que serán controlados.

Diagrama de entradas y salidas del controlador PLC_DESHUMIFICADORES

En la **Figura 54** se muestra el diagrama general de entradas y salidas del controlador PLC_DESHUMIFICADORES.

Figura 54

Diagrama de entradas y salidas del controlador PLC_DESHUMIFICADORES

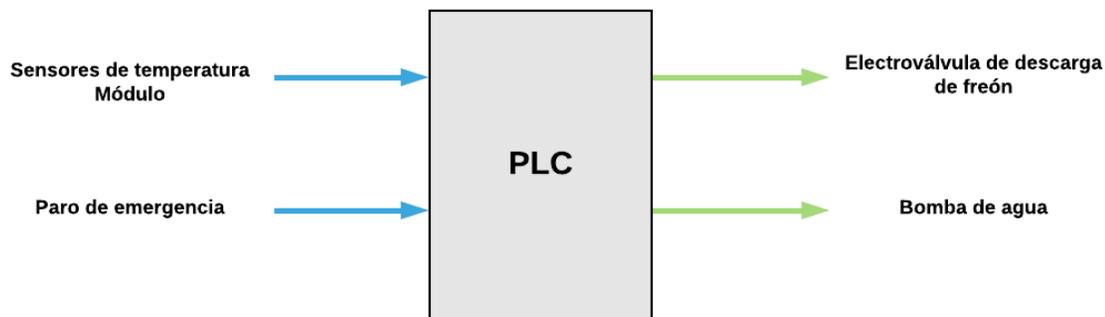
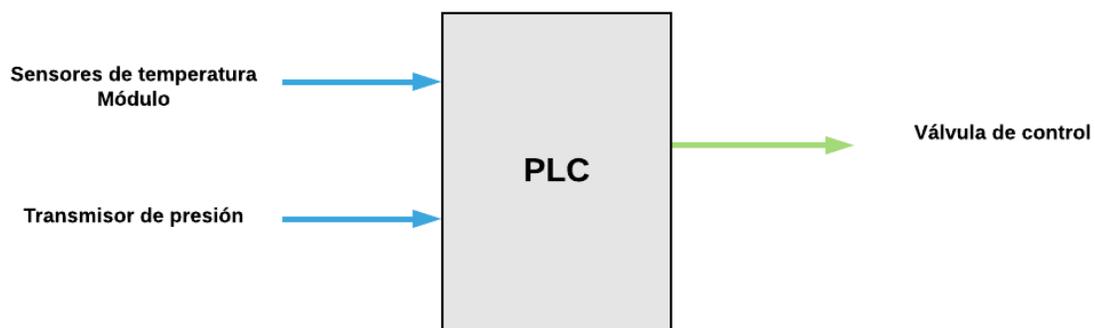


Diagrama de entradas y salidas del controlador PLC_TANQUES

En la **Figura 55** se muestra el diagrama general de entradas y salidas del controlador PLC_TANQUES.

Figura 55

Diagrama de entradas y salidas del controlador PLC_TANQUES



Selección del controlador

En la **Tabla 17** se muestra la comparación entre los controladores lógicos programables PLC y el sistema de control distribuido DCS.

El número de entradas y salidas digitales como analógicas son mínimas en el diseño del sistema de control a implementarse, además el sistema de control exige un tiempo de respuesta rápida en el control de los actuadores.

Debido a los requerimientos del sistema de control se seleccionará un controlador lógico programable PLC esto debido que el sistema a implementarse carece de la complejidad necesaria para el uso de un sistema de control distribuido.

Tabla 17*Comparación de PLC y DCS*

	Entradas y salidas digitales	Salidas analógicas	Nivel de redundancia	Tiempo de respuesta	Escalabilidad
PLC/SCADA	<300 E/S	Muy pocas	Bajo	Alto	Medio
DCS	>2000 E/S	>200	Alto	Bajo	Alto

Nota: Tomado de (PLCdesign, 2021).

Selección del Controlador Lógico Programable – PLC

Para seleccionar el controlador lógico programable se consideró que existe un PLC S7 1200 CPU 1214C AC/DC/RELÉ en campo, la adquisición de este PLC fue de acuerdo a necesidades anteriores del proceso de producción, el PLC instalado cuenta con la capacidad de expansión de hasta 8 módulos de esta manera se puede adecuar el controlador instalado a los requerimientos del presente proyecto.

Se seleccionará un controlador S7 1200 CPU 1214C AC/DC/RELÉ, ya que cumple con los requerimientos del sistema de control; el controlador dispone el número de entradas y salidas necesarias para la implementación del proyecto.

Controlador Lógico Programable S7 1200 CPU 1214C AC/DC/RELÉ

Luego de conocer los requerimientos de entradas y salidas de los controladores se seleccionará el PLC S7 1200 CPU 1214C que cumple con las características de hardware del sistema de control. El controlador utilizado tiene 14 entradas digitales, 10 salidas digitales a relé, 2 entradas analógicas, capacidad de expansión de hasta 8 módulos y comunicación por medio de ethernet.

Características técnicas generales

En la **Tabla 18** se presentan las características técnicas generales del PLC S7 1200 a utilizarse.

Tabla 18

Características técnicas generales del PLC S7 1200

Función	Característica
CPU	1214C
Referencia	6ES7 214-1BG40-0XB0
Entradas digitales	14
Salidas digitales	10
Entradas analógicas	2
Ampliación con módulos de señales	8
Módulos de comunicación	3
Puerto de comunicación Ethernet PROFINET	1

Nota. Tomado de (Configuración et al., 2014).

Diagrama de entradas y salidas del PLC

A continuación, se presentan los diagramas de entradas y salidas de los controladores que son empleados en el proceso de deshumificación

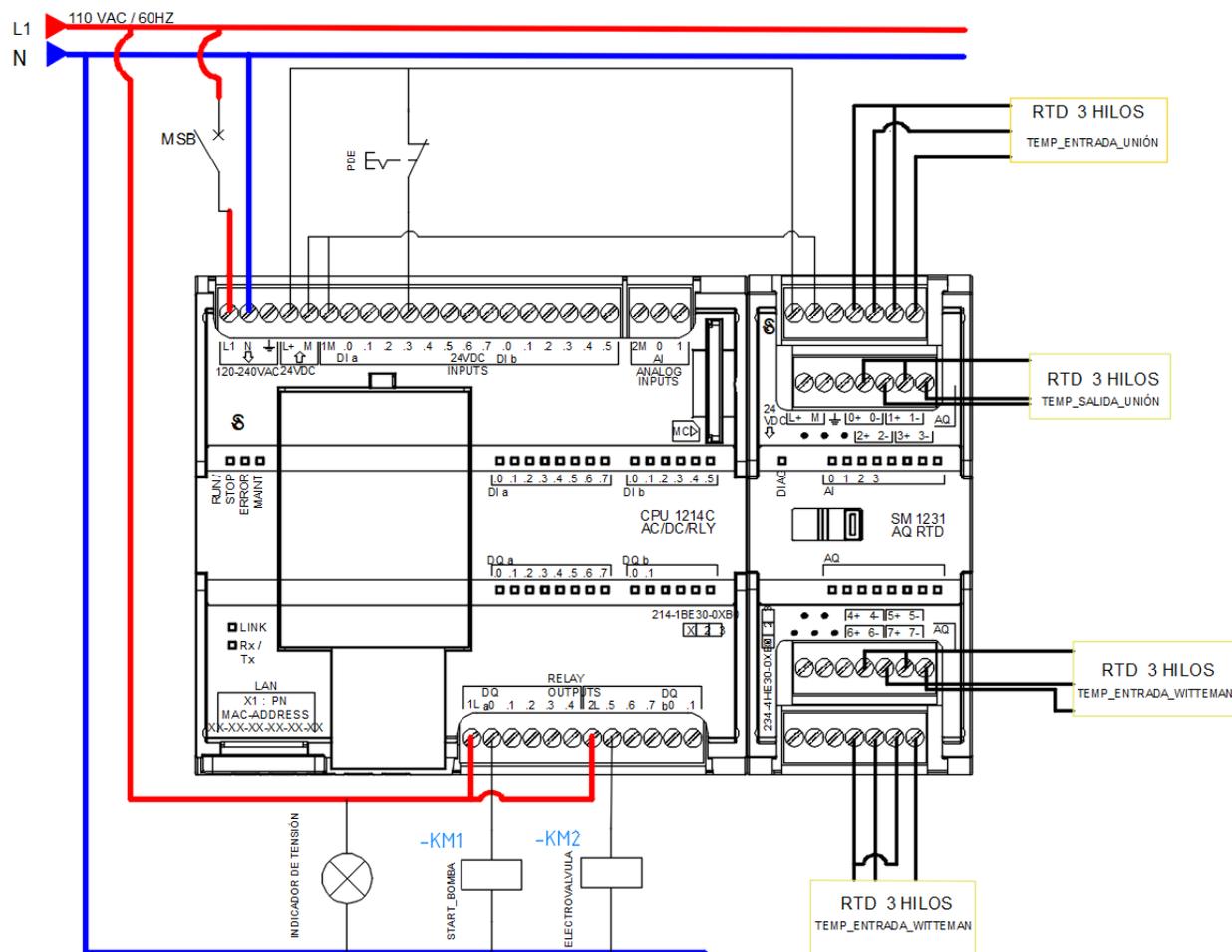
En la **Figura 56** se muestra *las entradas* y salidas del controlador

PLC_DESHUMIFICADORES, entradas análogas de sensores de temperatura, entrada digital del

pulsador de emergencia, salida digital de la bomba de agua y salida digital de la electroválvula del compresor Larking.

Figura 56

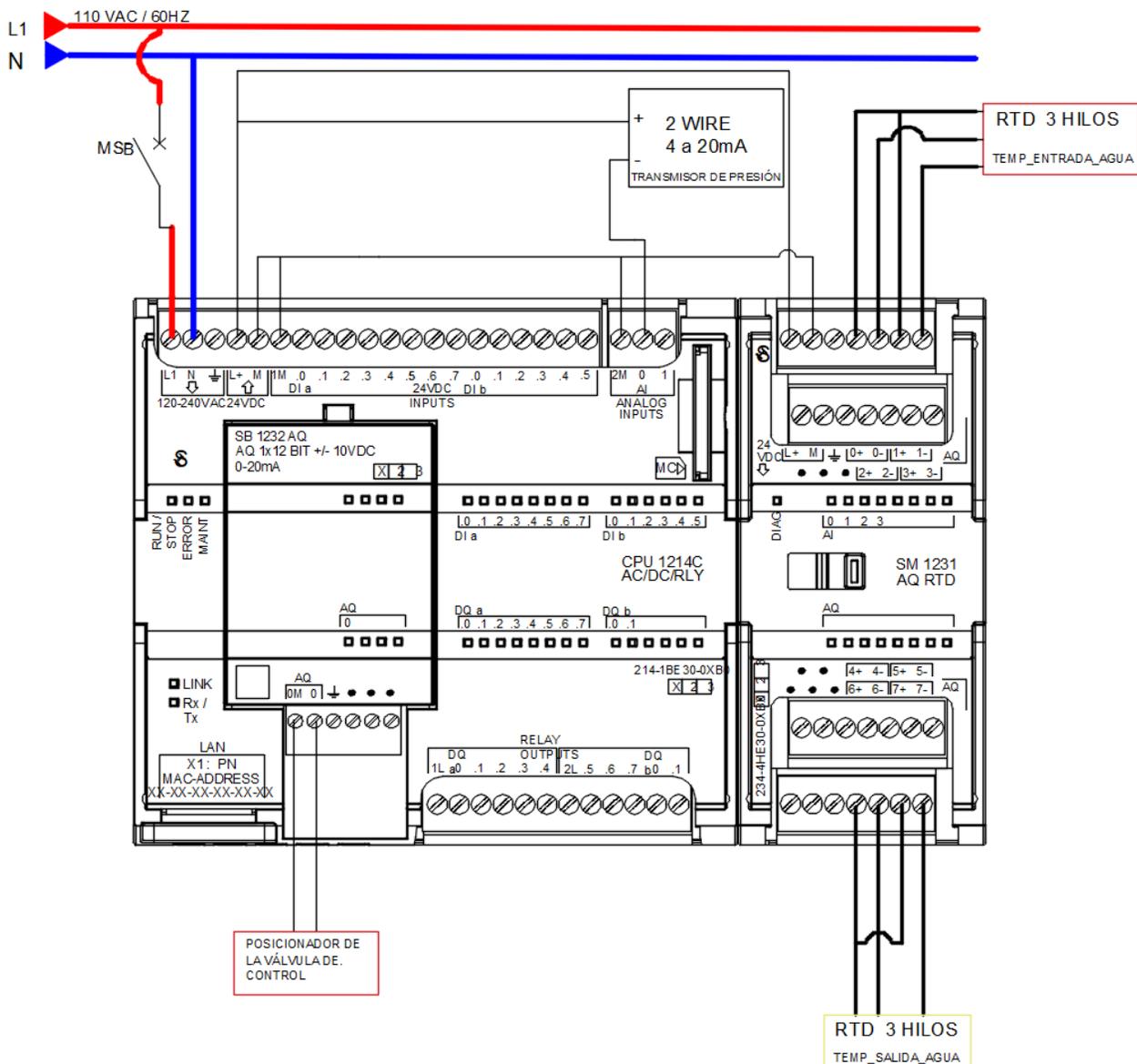
Diagrama de conexión del controlador PLC_DESHUMIFICADORES



En la **Figura 57** se muestra las entradas y salidas del controlador PLC_TANQUES, entradas analógicas de sensores de temperatura, entrada analógica del transmisor de presión y salida analógica de control de la válvula.

Figura 57

Diagrama de conexión del controlador PLC_TANQUES



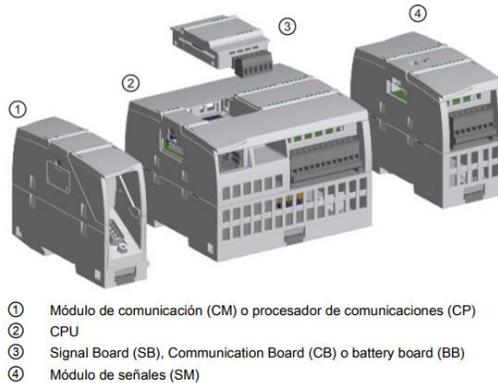
Módulos de expansión

Se utilizarán módulos de expansión para la adquisición de señales y control de actuadores, es por esto que se empleará módulos de temperatura para RTD que servirán para la adquisición de señales de temperatura provenientes de los sensores de temperatura PT100, además se utilizará un módulo con una salida analógica para el control de la válvula en el intercambiador de calor CO2-agua.

En la **Figura 58** se muestra los módulos de expansión de marca Siemens a utilizarse en la implementación del presente proyecto.

Figura 58

Módulos de expansión Siemens



Nota. Tomado de (Configuración et al., 2014).

Se emplearán dos módulos de expansión para RTD en el proyecto, el controlador PLC_DESHUMIFICADORES utilizará 4 entradas analógicas del primer módulo de expansión para la adquisición de las temperaturas de entradas y salidas de los deshumificadores y el controlador PLC_TANQUES utilizará el segundo módulo de expansión para la adquisición de las temperaturas de entrada y salida del agua en el intercambiador de calor CO2-agua.

El módulo de expansión de 4 entradas cumple con los requerimientos para la utilización en el sistema.

En la **Figura 59** se muestra el módulo de expansión marca Siemens para la adquisición de los sensores de temperatura.

Figura 59

Módulo de expansión SM 1231 RTD



Nota. Tomado de (Automation24, 2021b).

Características técnicas generales

En la **Tabla 19** se muestra las características técnicas del módulo de expansión para la adquisición de señales de temperatura.

Tabla 19

Características técnicas generales para la selección del módulo para RTD

Función	Característica
Referencia	6ES7 231-5PD32-0XB0
Número de entradas	4
Tipo	RTD y Ω indicado por el módulo
Resolución	0,1 °C/0,1 °F
Longitud de cable (metros)	100 metros hasta el sensor (máx.)
Alimentación	24 VDC
Consumo de corriente	40 mA

Nota. Tomado de (Configuración et al., 2014)

Módulos de salida analógica SB 1232, AQ 1x12 bit

En la **Figura 60** se muestra el módulo de salidas analógicas implementado para el control de válvula.

Figura 60*Módulo de salidas analógicas*

Nota. Tomado de (Nt, 2011).

Características técnicas generales

La **Tabla 20** muestra las características generales tomadas para el uso del módulo de salidas analógicas.

Tabla 20*Características generales del módulo de salidas analógicas*

Función	Característica
Referencia	6ES7232-4HA30-0XB0
Intensidad de alimentación max	25 mA
Número de salidas analógicas	1
Rango de salida de tensión, intensidad	-10 V a +10 V, 0 a 20 mA
Longitud de cable máximo	100 m, apantallado, par trenzado

Nota. Tomado de (Nt, 2011).

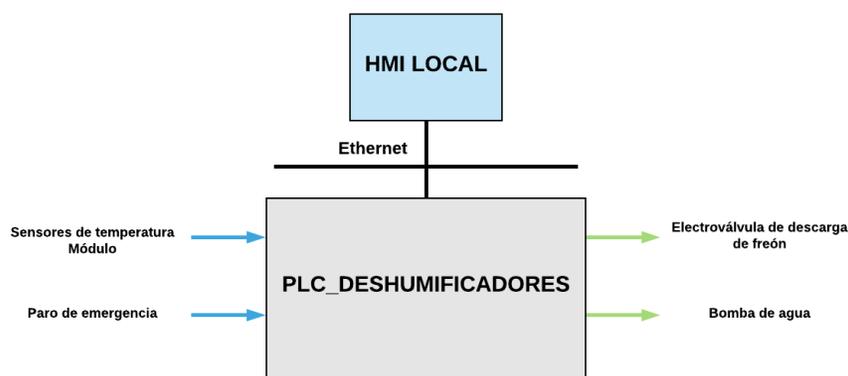
Diseño del subsistema de supervisión

Para constatar el correcto funcionamiento del proceso de deshumificación y setear los valores de control del PLC se utilizará una pantalla táctil para visualizar las variables que intervienen en el proceso, entre estas tenemos temperatura de entrada y salida de CO2 en los deshumificadores, temperatura de entrada y salida de agua en el intercambiador de calor CO2-agua, visualización del estado de encendido o apagado de la bomba de agua, visualización de las gráficas del set point y temperatura de salida de agua en el intercambiador de calor CO2-agua.

Se utilizará una interfaz HMI local con puerto ethernet para la comunicación con el controlador PLC_DESHUMIFICADORES, a través de esta HMI se tendrá la supervisión completa del proceso de deshumificación, de manera que la monitorización del proceso en conjunto con el operario conformará el sistema de supervisión.

Figura 61

Diseño de monitorización mediante una interfaz hombre-máquina



Selección de la HMI

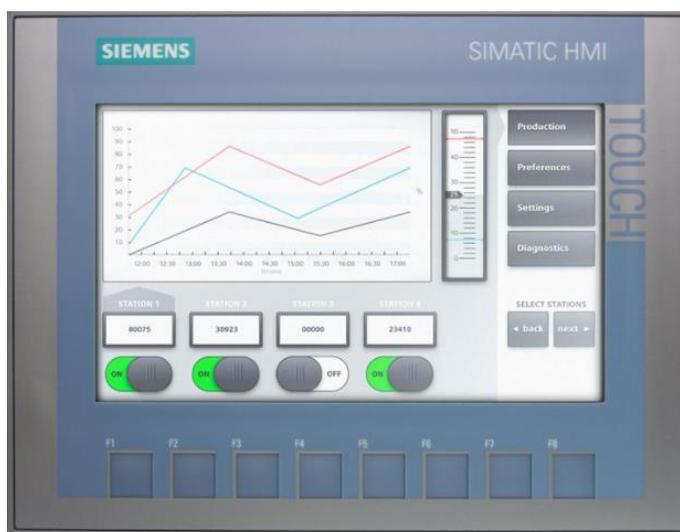
La selección de la interfaz hombre - máquina se efectuará tomando en cuenta la adaptación de la interfaz con el PLC S7 1200, de manera que se seleccionó una pantalla táctil Siemens KTP 700 Basic de 7 pulgadas.

Pantalla táctil Siemens KTP 700 Basic

La **Figura 62** muestra la pantalla táctil de 7 pulgadas marca Siemens. La pantalla cumple con los requisitos generales del sistema la misma que dispone de comunicación ethernet con el controlador S7 1200 seleccionado lo que hace una fácil adaptación de la pantalla con el sistema.

Figura 62

Pantalla táctil KTP 700 marca Siemens



Nota. Tomado de (Cooperates et al., 2018).

Características técnicas generales

En la **Tabla 21** se presentan las características generales de la pantalla táctil KTP 700.

Tabla 21

Características generales de hardware de la pantalla

Función	Característica
Área activa de la pantalla	154,1 x 85,9 mm (7")
Resolución	800 x 480 píxeles
Ethernet	10/100 Mbits/s
Tensión nominal	+24 V DC

Función	Característica
Consumo de potencia	5,5 W

Nota. Tomando de (Panels et al., 2019).

Elementos de maniobra

Los elementos de maniobra implementados en el proceso de deshumificación ayudarán en la seguridad del proceso.

Relés

Los relés son elementos de accionamiento electromecánico y están conectados en el presente proyecto entre las salidas del controlador y los actuadores, de manera que si existiese una situación anormal como una sobrecorriente estos dispositivos soportarán la corriente ayudando a que no se quemen las salidas del controlador.

Figura 63

Relé de marca Siemens.



Nota. Tomado de (Automation, 2021).

Paro de emergencia

La **Figura 64** muestra el botón de paro de emergencia que es un elemento de seguridad del proceso, en caso de una situación anormal al oprimir este botón el sistema en general se detiene.

Figura 64

Paro de emergencia



Nota. Tomado de (GR, 2021).

La **Tabla 22** muestra las acciones al oprimir el paro de emergencia, dispositivos y elementos que se cierran y apagan.

Tabla 22

Acción al oprimir el paro de emergencia

Elemento	Estado
Bomba de agua	Apagada
Válvula de control	Cerrada

Capítulo IV

Desarrollo de software

Para la automatización del intercambiador de calor CO₂-agua es necesario la programación de los controladores y de la HMI local, para lo cual se utilizará la interfaz de programación Tia Portal de Siemens que ayudará al control y monitoreo de las variables del proceso.

Para el desarrollo de la lógica de programación se empleará diagramas de flujo para un mejor entendimiento de la lógica de control, para la programación del controlador se usará el lenguaje escalera, su funcionamiento se basa en una interfaz gráfica por medio contactores, bobinas, contadores, temporizadores y funciones preestablecidas.

El desarrollo de software para la HMI se la realizará de acuerdo a las características generales del proceso de producción LIC y las plantillas establecidas para el diseño de HMI's en planta de producción LIC.

Programación del controlador

Luego de determinar las entradas y salidas del controlador se procederá a realizar la programación del controlador, de manera que se pueda cumplir con los requerimientos antes vistos en el presente proyecto.

Se empleó tablas de asignación de recursos para establecer las variables y el tipo de dato a utilizarse en la lógica de programación del controlador.

Para la representación de la lógica de programación se utilizó la metodología de diagrama de flujo que permite determinar gráficamente mediante una serie de actividades interconectadas una solución a la lógica de un proceso o problema en general.

El software de programación empleado será Tia portal propio de la marca Siemens, la programación en el software se efectuará en lógica escalera (contactores NC, contactores NA, bobinas y funciones preestablecidas).

Tabla de asignación de recursos

A través de la **Tabla 23** y **Tabla 24** se identificará las variables que interfieren en la programación del controlador en la cual se dará una descripción y tipo de dato conforme a la función de cada variable.

Tabla 23

Tabla de asignación de recursos del controlador PLC_DESHUMIFICADORES

Ord.	Descripción	Símbolo	Dirección
1	Bit del primer ciclo SCAN	FirstScan	M1.0
2	Pulsador de emergencia NC	PDE	I0.1
3	Paro manual del intercambiador de calor CO2-agua desde HMI	Paro_M	M28.2
4	Inicio manual del intercambiador de calor CO2-agua desde HMI	Start_M	M28.3
5	Inicio automático del intercambiador de calor CO2-agua desde HMI	Start_A	M28.4
6	Paro manual de la bomba de agua desde HMI	Stop_Bomba	M80.0
7	Inicio manual de la bomba de agua desde HMI	Start	M60.0
8	Apagado del compresor Larking	Electrovalvula	Q0.5
9	Encendido de la bomba	Start_Bomba	Q0.0
10	Datos de control enviados al controlador PLC_TANQUES	Datos_E_Des	MB28

Ord.	Descripción	Símbolo	Dirección
11	Entrada análoga de temperatura del deshumificador Unión (salida)	Salida_CO2_U	IW102
12	Entrada análoga de temperatura del deshumificador Witte-man (salida)	Salida_CO2_W	IW98
13	Entrada análoga de temperatura del deshumificador Unión (entrada)	Entrada_CO2_U	IW100
14	Entrada análoga de temperatura del deshumificador Witte-man (entrada)	Entrada_CO2_W	IW96
15	Temperatura de salida de CO2 del deshumificador Witte-man	Temp_Salida_W	MD24
16	Temperatura de entrada de CO2 del deshumificador Unión	Temp_Entrada_U	MD32
17	Temperatura de entrada de agua al intercambiador de calor CO2-agua	TEMPERATURA_IN_AGUA	MD85
18	Temperatura de salida de agua del intercambiador de calor CO2-agua	TEMPERATURA_OUT_AGUA	MD52
19	Set point de temperatura de agua	SetPoint	MD62
20	Porcentaje de abertura de la válvula de control	Porce	MD66
21	Temperatura de salida de CO2 del deshumificador Unión	Temp_Salida_U	MD56
22	Set point de porcentaje de abertura de la válvula en modo manual	Manual_Porcentaje	MD81

Ord.	Descripción	Símbolo	Dirección
23	Temperatura de entrada de CO2 del deshumificador Witte-man	Temp_Entrada_W	MD2
24	Presión del intercambiador	Inter_pre	MW500
25	Set point de presión	P_inter	MW333

Tabla 24

Tabla de asignación de recursos del controlador PLC_TANQUES

Ord.	Descripción	Símbolo	Dirección
1	Temperatura de entrada de agua	TEMPERATURA_ENTRADA_AGUA	MD308
2	Temperatura de salida de agua	TEMPE_SALIDA_AGUA	MD312
3	SetPoint de temperatura	SetPoint	MD320
5	Presión de entrada de CO2 al intercambiador de calor CO2-agua	PRESION	MW318
6	Paro enviado desde el HMI	Paro_M	M317.2
7	Marcha Manual enviada desde el HMI	MarchaM	M188.3
8	Marcha Automática enviada desde el HMI	MarchaA	M188.4
9	Salida de activación automática	Automático	M101.5
10	Salida de activación manual	manual	M101.6
11	Salida de paro	Stop	M101.7
12	Salida de control de la válvula del intercambiador de calor	Valvula	QW80
13	Porcentaje de abertura de la válvula	porcentaje	MD330
14	Porcentaje de abertura enviada desde el HMI	Manual_porcentaje	MD700

Ord.	Descripción	Símbolo	Dirección
15	Estado 0	E0	M101.1
16	Estado 11	E11	M100.7
17	Estado 13	E13	M101.0
18	SetPoint de presión enviada desde el HMI	SetPointPresion	MW328

Diagramas de flujo

Por medio de la utilización de diagramas de flujo se representa la lógica de control para la activación de los actuadores de la electroválvula de descarga del compresor Larking y la válvula de control del intercambiador de calor CO2-agua, se muestra en los diagramas de flujo las acciones y condiciones para la acción de control respectiva.

Diagrama de flujo del Control de la electroválvula del compresor Larking

En la **Figura 65** se presenta la lógica de control para la electroválvula del compresor Larking, el objetivo de la manipulación de la electroválvula es apagar el compresor por alta presión de descarga, un presostato instalado en la descarga de freón activa o desactiva el motor del compresor.

Figura 65

Diagrama de flujo de control de la electroválvula del compresor Larking

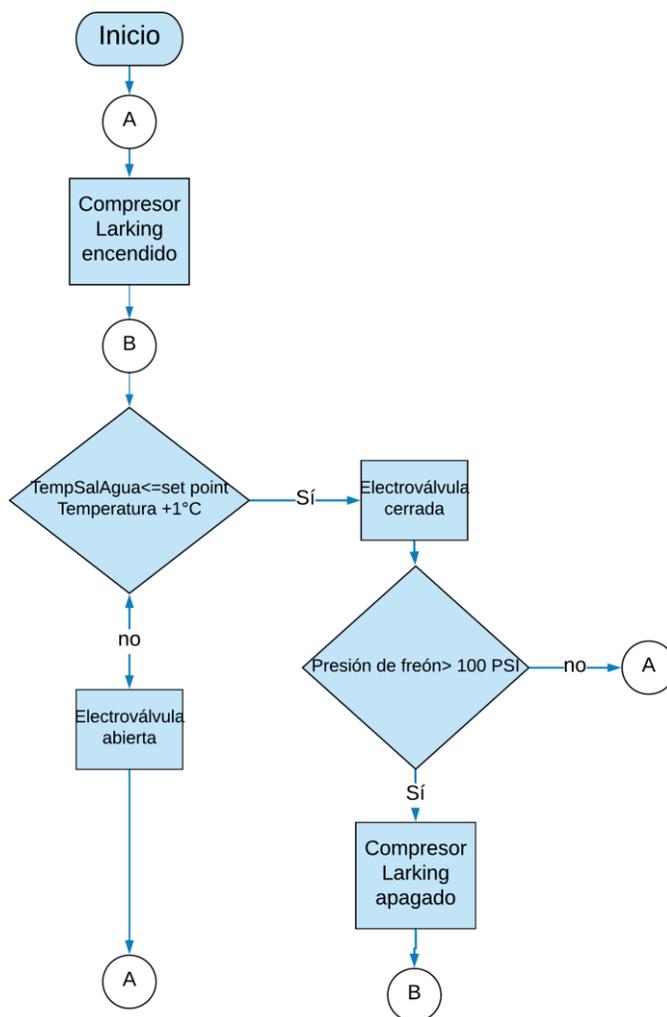
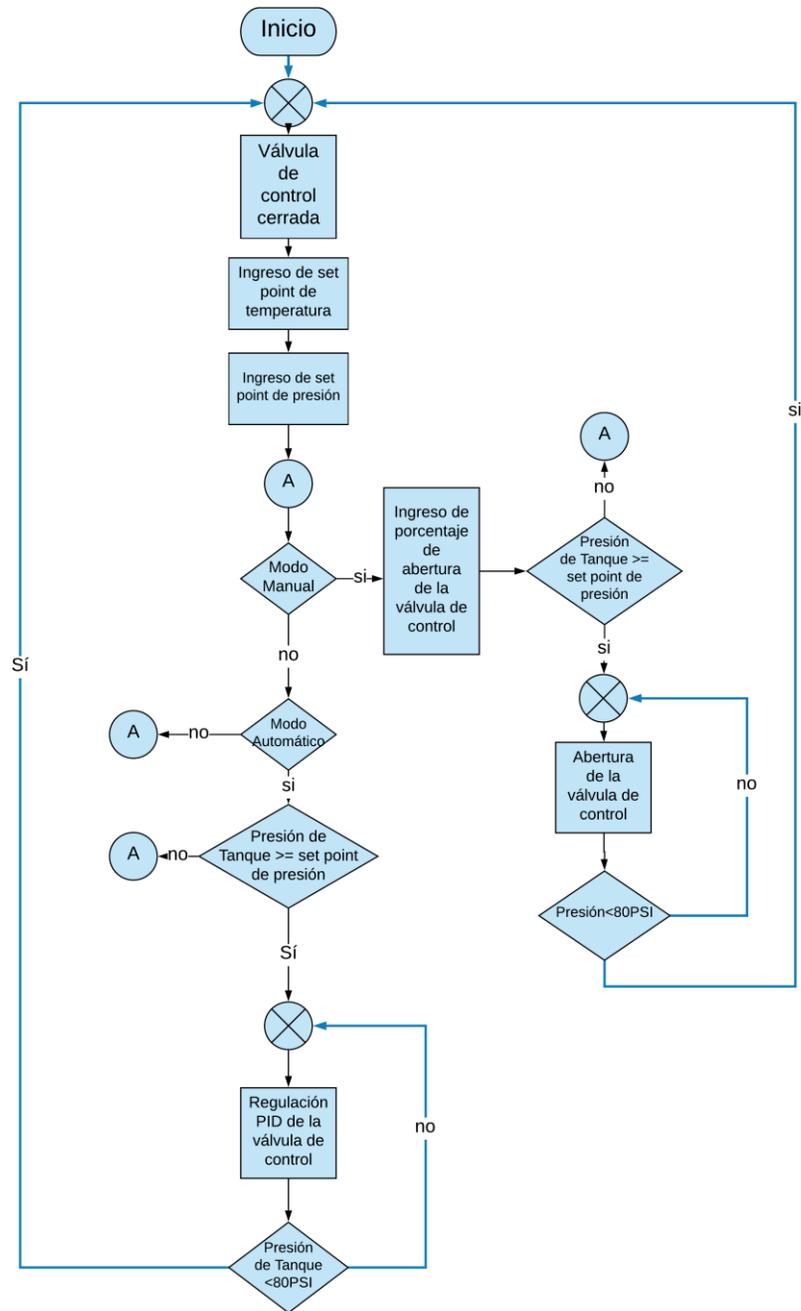


Diagrama de flujo de la válvula de control del intercambiador de calor CO2-agua

En la **Figura 66** se presenta la lógica de control de la válvula del intercambiador de calor CO2-agua.

Figura 66

Diagrama de flujo de control de la válvula del intercambiador de calor



Programación en Tia portal (Totally Integrated Automation)

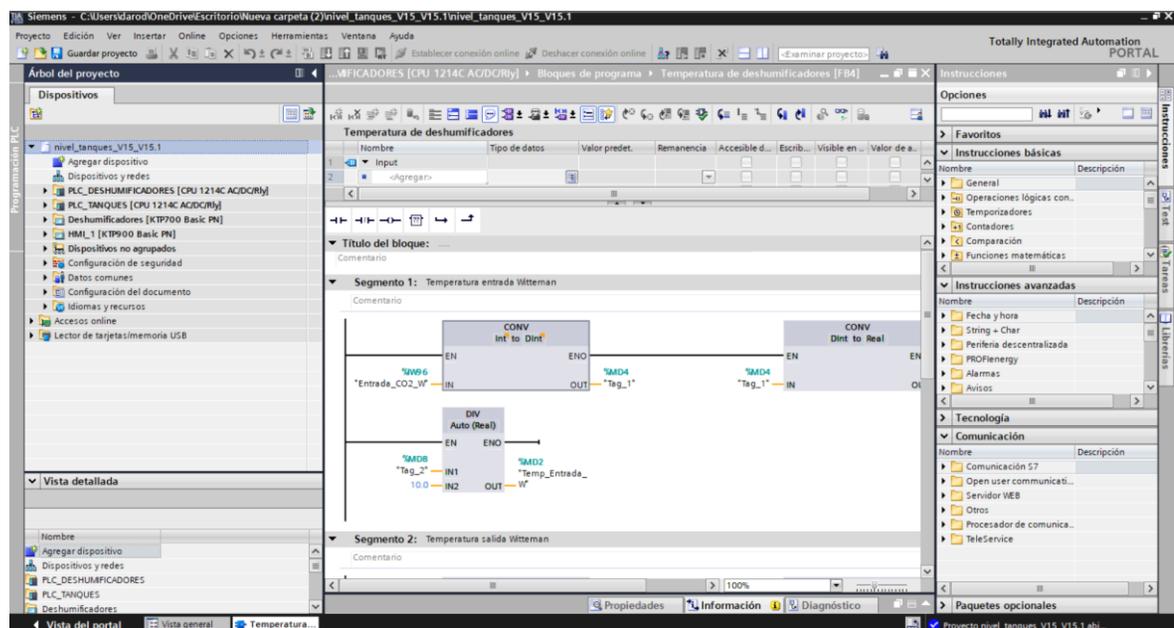
Tia portal es el software de programación de Siemens que se empleará para el desarrollo de la lógica de programación y HMI del presente proyecto. Tia portal es óptimo para la programación de los controladores Siemens 1200 y 1500 ya que el hardware de los controladores se ajusta mejor a Tia Portal. (AUTYCOM, 2021)

El lenguaje de programación que se empleará es Ladder, esta programación es sencilla, modular y permite la utilización de funciones preestablecidas como normalización, escalamiento, operaciones matemáticas, entre otras.

En la **Figura 67** se muestra la pantalla principal del software de programación de Tia Portal.

Figura 67

Pantalla principal Tia Portal



Acondicionamiento de las señales de los sensores

Se acondicionó los sensores de temperatura y presión para su procesamiento en el controlador, como se mencionó anteriormente se empleó el módulo de entradas analógicas de RTD para el acondicionamiento de los sensores de temperatura.

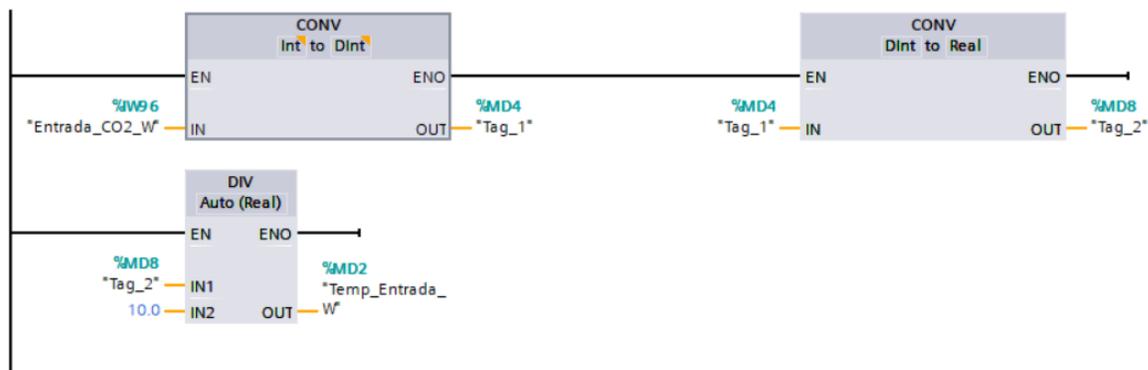
Sensores de temperatura

En la **Figura 68** se muestra el acondicionamiento de los sensores de temperatura que se realizó por medio del módulo de entradas analógicas para RTD, en Tia portal se empleará la

función CONV para convertir una entrada entera hacia una real para posteriormente utilizar la función DIV.

Figura 68

Acondicionamiento de los sensores de temperatura

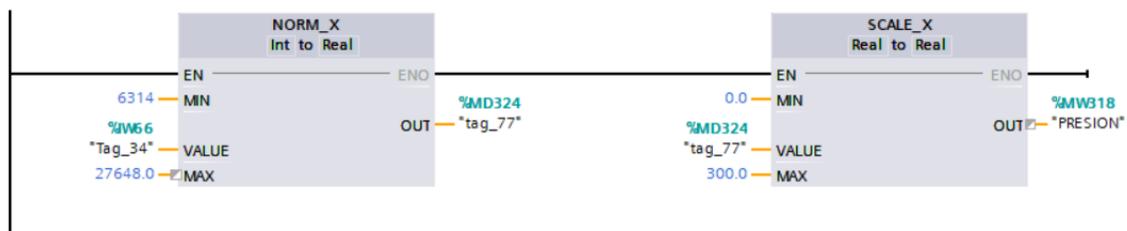


Sensor de presión

El sensor de presión envía una señal normalizada de 4 a 20 mA a la entrada analógica del controlador PLC_TANQUES, en la **Figura 69** se muestra el acondicionamiento de la señal de presión, se utiliza la función NORM_X para normalizar este valor y posterior realizar el escalamiento con la función SCALE_X con el rango máximo de presión del sensor empleado.

Figura 69

Acondicionamiento del sensor de presión



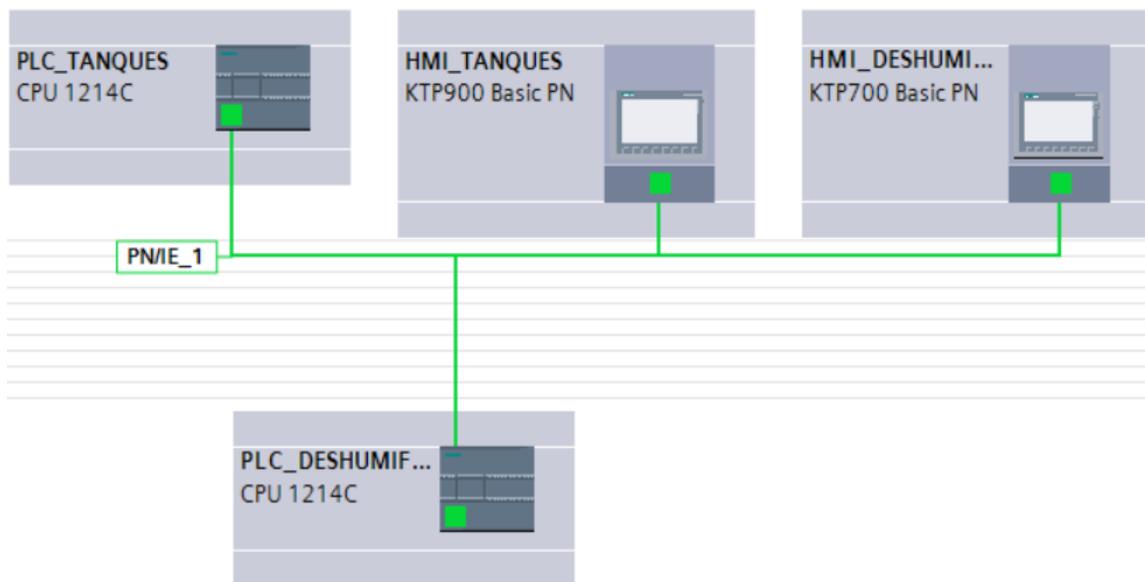
Comunicación entre el controlador PLC_DESHUMIFICADORES y el controlador PLC_TANQUES

Es de gran importancia el uso de un protocolo de comunicación para el envío y recepción de datos desde un controlador hacia otro, esto debido a que se abarca en un solo HMI la supervisión del proceso de deshumificación aun cuando el control de los actuadores del proceso se lo haga en diferentes lugares de la planta de producción LIC.

En la **Figura 70** se muestra la topología de red implementada en el proceso de deshumificación que constan de las HMI con sus respectivos controladores.

Figura 70

Topología de red en Tia Portal



Protocolo de comunicación PROFINET. Una de las herramientas que proporciona los controladores Siemens es el uso del protocolo de comunicación PROFINET, este protocolo de comunicación se empleó por su potencia, flexibilidad y capacidad de expansión.

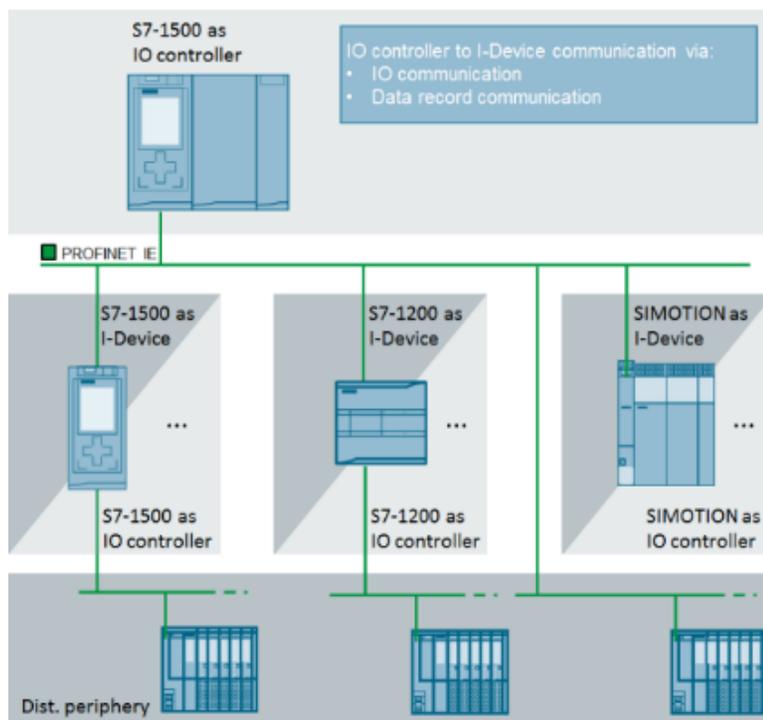
Con PROFINET IO se aplica una tecnología de conmutación que permite a cualquier estación acceder a la red en todo momento. Así, la red permite un uso mucho más efectivo

gracias a la transmisión de datos simultánea de varias estaciones. El modo dúplex del sistema Switched Ethernet permite transmitir y recibir simultáneamente. (Profinet, 2012)

En la **Figura 71** se observa la topología de comunicación entre controladores Siemens.

Figura 71

Comunicación entre dispositivos Siemens



Nota. Tomado de (Siemens, 2019).

En la **Tabla 25** se muestra la descripción de las variables enviadas de un controlador hacia otro.

Tabla 25

Datos enviados de los controladores

Datos enviados del controlador PLC_DESHUMIFICADORES al controlador PLC_TANQUES	Datos enviados del controlador PLC_TANQUES al controlador PLC_DESHUMIFICADORES
<ul style="list-style-type: none"> • Set Point de temperatura • Set Point de presión • Datos de control manual o automático de la válvula de control • Porcentaje de abertura manual de la válvula de control 	<ul style="list-style-type: none"> • Temperatura de entrada de agua del intercambiador de calor CO2-agua • Temperatura de salida de agua del intercambiador de calor CO2-agua • Porcentaje de abertura de la válvula de control del intercambiador de calor CO2-agua • Presión de entrada de CO2 del intercambiador de calor CO2-agua

Configuración de los bloques TSEND_C y TRCV_C. Se empleará el bloque TSEND_C para el envío de datos y el bloque TRCV_C para la recepción de datos de un controlador hacia otro. El protocolo de comunicación PROFINET utiliza en la comunicación una IP y una ID de conexión asociada a cada controlador, estas deben ser iguales para el bloque TSEND_C y TRCV_C, además tener en cuenta que el puerto de comunicación debe ser irrepetible en la comunicación.

En la **Figura 72** se muestra la configuración del bloque TSEN_C, el puerto debe ser el mismo en los controladores para el envío del dato.

Figura 72

Configuración del bloque TSEND_C para el envío de datos

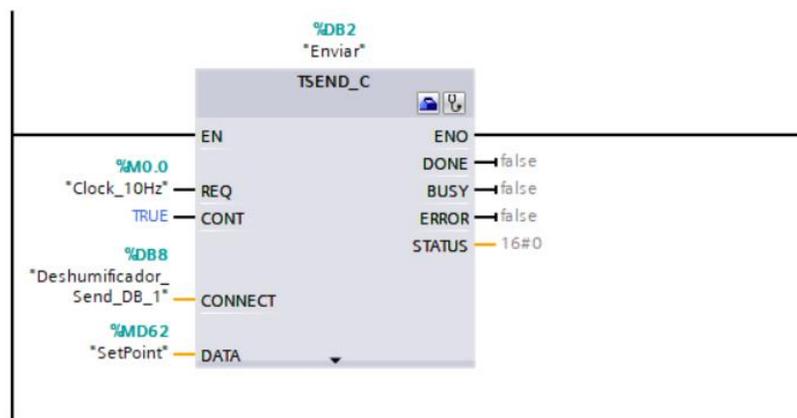
Local	Interlocutor
Punto final: PLC_DESHUMIFICADORES [CPU 1214C AC/DC/Rly]	PLC_TANQUES [CPU 1214C AC/DC/Rly]
Interfaz: PLC_DESHUMIFICADORES, Interfaz PROFINET_1[X1 :]	PLC_TANQUES, Interfaz PROFINET_1[X1 : PN(LAN)]
Subred: PN/IE_1	PN/IE_1
Dirección: 192.168.0.151	192.168.0.181
Tipo de conexión: TCP	
ID de conexión (dec): 4	6
Datos de conexión: Deshumificador_Send_DB_1	PLC_1_Receive_DB_2
<input type="radio"/> Establecimiento activo de la conexión	<input checked="" type="radio"/> Establecimiento activo de la conexión

Detalles de dirección	
Puerto local	Puerto del interlocutor
Puerto (decimal): 2000	

Los parámetros del bloque TSEN_C son: clock, variable del dato, y los datos de conexión configurados IP, ID de conexión y puerto como se muestra en la **Figura 73**.

Figura 73

Función TSEND_C de Tia Portal para el envío de datos



En la **Figura 74** se muestra la configuración del bloque TRCV_C, el puerto debe ser el mismo en los controladores para la recepción del dato.

Figura 74

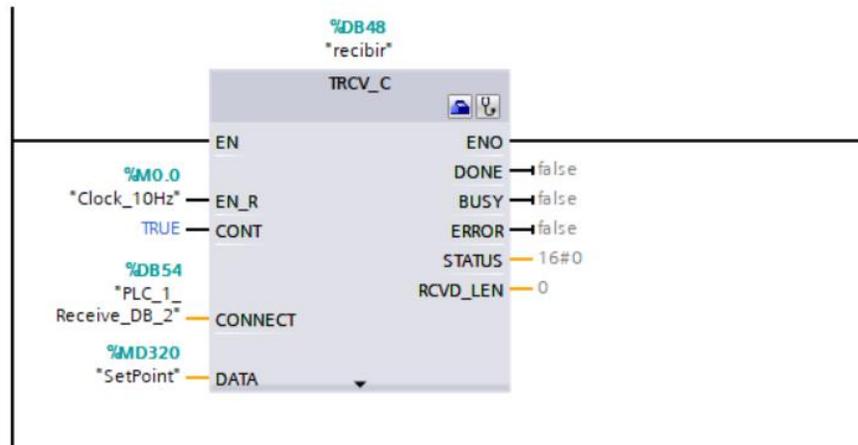
Configuración del bloque TRCV_C para la recepción de datos

Local	Interlocutor
Punto final: PLC_TANQUES [CPU 1214C AC/DC/Rly]	PLC_DESHUMIFICADORES [CPU 1214C AC/DC/Rly]
Interfaz: PLC_TANQUES, Interfaz PROFINET_1[X1 : PN(LAN)]	PLC_DESHUMIFICADORES, Interfaz PROFINET_1[X1 :]
Subred: PN/E_1	PN/E_1
Dirección: 192.168.0.181	192.168.0.151
Tipo de conexión: TCP	
ID de conexión (dec): 6	4
Datos de conexión: PLC_1_Receive_DB_2	Deshumificador_Send_DB_1
<input checked="" type="radio"/> Establecimiento activo de la conexión	<input type="radio"/> Establecimiento activo de la conexión
Detalles de dirección	
Puerto local	Puerto del interlocutor
Puerto (decimal):	2000

Los parámetros del bloque TRCV_C son: clock, variable del dato y los datos de conexión configurados IP, ID de conexión y puerto como se muestra en la **Figura 75**.

Figura 75

Función TRCV_C para la recepción de datos de un controlador hacia otro



Control PID de la válvula de control del intercambiador CO2-agua

Debido al control por realimentación en el intercambiador de Calor CO2-agua se debe realizar la acción de control en la válvula, de forma que la válvula varié su orificio proporcionalmente dependiendo de la temperatura de salida de agua, para la programación de la acción de control se usará el bloque de función PID_Compact para realizar la regulación de la válvula.

Función PID_Compact. La configuración del bloque de función PID_Compact de Tia Portal ayudará a controlar la válvula de control del intercambiador de calor CO2-agua, este bloque realizará la acción de control para alcanzar la temperatura de salida del agua al set point deseado.

Tia portal proporciona una herramienta importante dentro del bloque PID_Compact, donde se puede simular el comportamiento de las señales de salida, entrada y set point del controlador, y a su vez encontrar las constantes P, I y D óptimas de la válvula de control.

En la **Figura 76** se muestra la configuración del bloque PID_Compact esta realizará para el control de la variable física de temperatura, se invirtió la regulación debido que la válvula de control es NC y las constantes fueron reguladas automáticamente teniendo una ganancia proporcional igual 2, tiempo de integración igual 30 s y un tiempo derivativo igual 0 s.

Figura 76

Configuración del bloque PID de la válvula de control

Temperatura °C

Invertir sentido de regulación

Activar Mode tras reanunciar la CPU

Poner Mode a: Modo automático

Activar entrada manual

Ganancia proporcional: 2.0

Tiempo de integración: 30.0 s

Tiempo derivativo: 0.0 s

Coeficiente retardo derivativo: 0.2

Ponderación de la acción P: 1.0

Ponderación de la acción D: 1.0

Tiempo muestreo algoritmo PID: 1.0 s

Regla para la optimización

Estructura del regulador: PID

El objeto tecnológico PID_Compact ofrece un regulador PID continuo con optimización integrada. Así mismo, es posible configurar un regulador de impulsos. Es posible elegir entre el modo manual y el automático. (SIEMENS, 2019)

PID-Compact registra de forma continua el valor real medido dentro de un lazo de regulación y lo compara con la consigna deseada. A partir del error de regulación resultante, la instrucción PID_Compact calcula un valor de salida, con el que el valor real se iguala con la consigna con la máxima rapidez y estabilidad. (SIEMENS, 2019)

En la **Tabla 26** se muestran los parámetros usados en el bloque PID_Compact.

Tabla 26

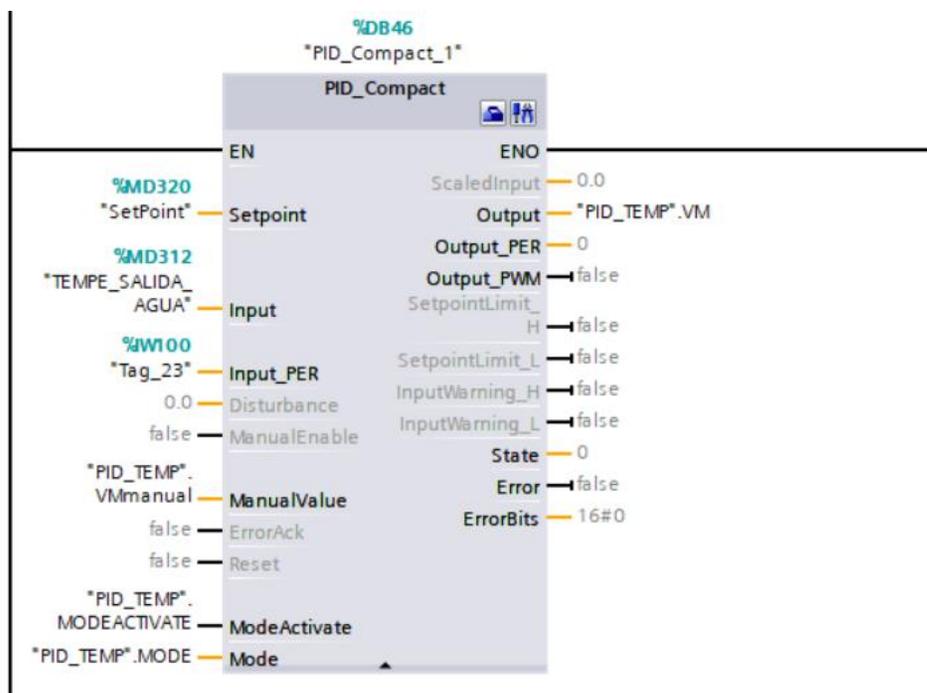
Parámetros de configuración del bloque PID_Compact

Parámetro	Descripción
SetPoint	Consigna, valor a la que se desea que la variable medida llegue
Input	Variable medida normalizada y escalada
Input_PER	Variable medida sin normalizar y escalar
ManualValue	Valor enviado manualmente a la salida
ModeActive	Marca para pasar de modo manual a automático y viceversa
Mode	Variable de modo automático (3) y modo manual (4)
Output	Salida normalizada y escalada

En la **Figura 77** se muestra la configuración del bloque PID_Compact para la ejecución del presente proyecto.

Figura 77

Bloque PID_Compact



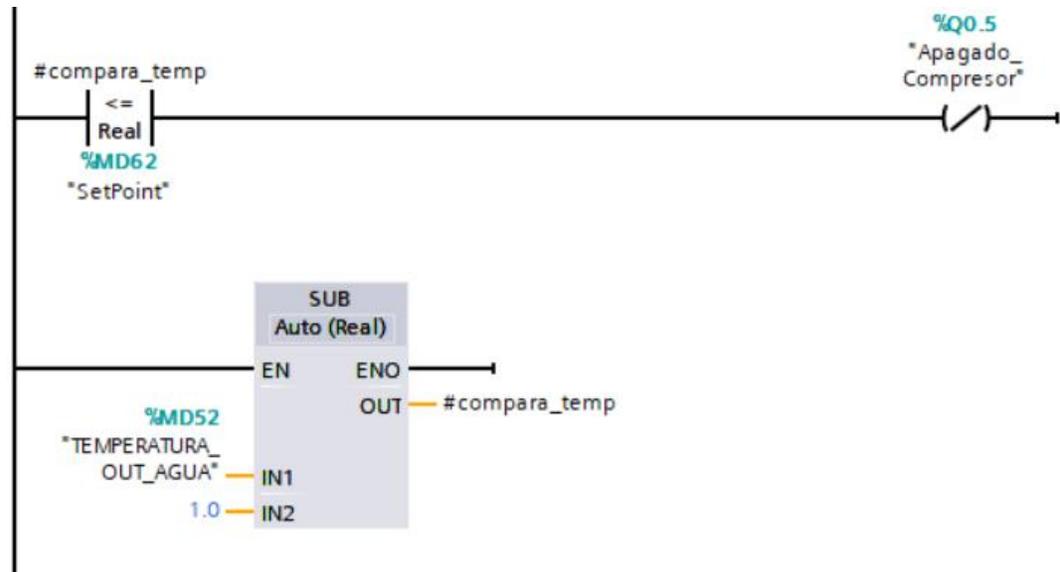
Control de apagado del compresor Larking

Como se mencionó anteriormente se actuará en la electroválvula de descarga de freón del compresor Larking para posteriormente apagar el compresor por alta presión de descarga, la electroválvula se cerrará cuando la temperatura de salida de agua sea mayor a 1°C que el set point deseado.

En la **Figura 78** se muestra el control ON-OFF con histéresis efectuado en la electroválvula de descarga de freón.

Figura 78

Control de apagado del compresor Larking



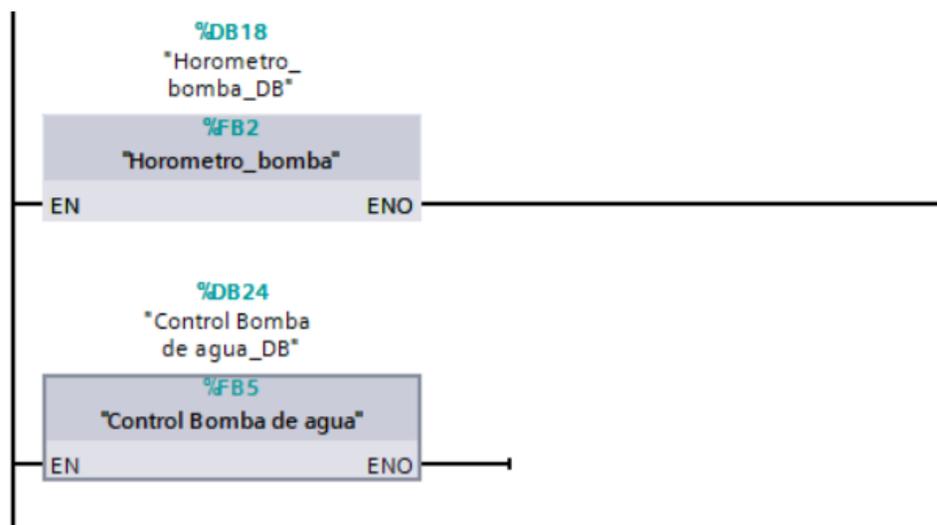
Control y horómetro de la bomba de agua

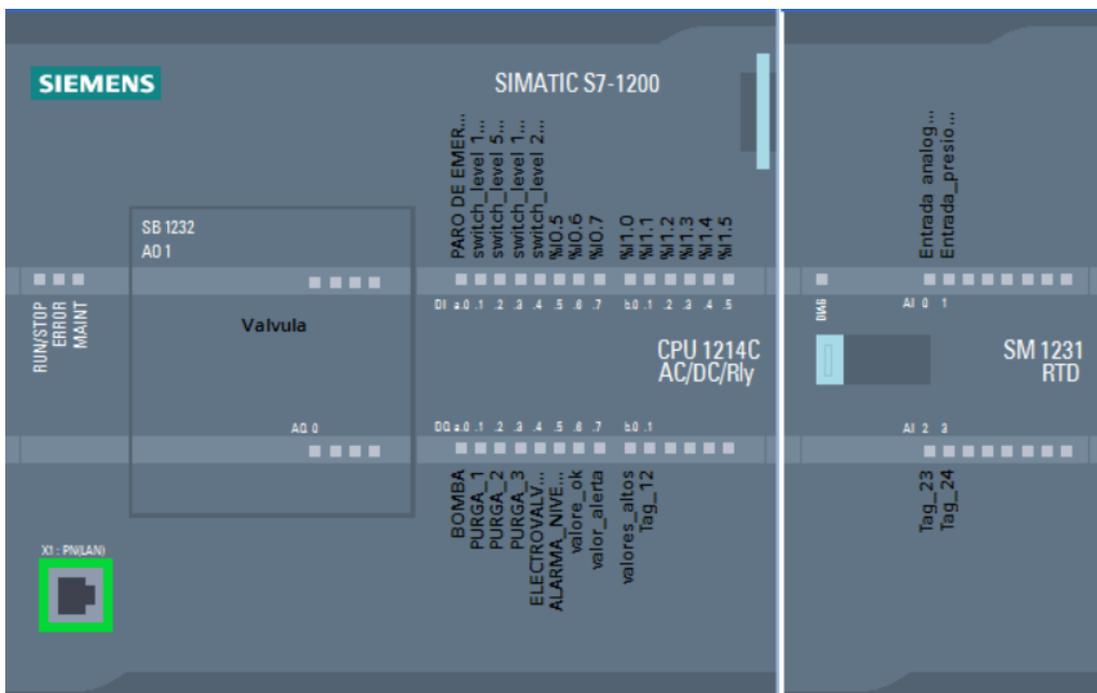
Se implementó el control de la bomba de agua por medio del controlador

PLC_DESHUMIFICADORES; además se empleó un horómetro para la visualización del tiempo de funcionamiento de la bomba de agua como se muestra en la **Figura 79**.

Figura 79

Horómetro de la bomba de agua





Diseño y programación de HMI's

La interfaz hombre máquina es un conjunto de pantallas que se emplean para la monitorización del proceso, para que de manera conjunta con los operarios lograr una supervisión completa del proceso de deshumificación.

Se dará al operador los mecanismos necesarios para identificar fallas dentro del proceso para que de forma sistemática se pueda realizar diagnósticos en conjunto con la monitorización empleada en la HMI.

Mediante la representación gráfica del proceso se desea que el operador pueda identificar en los puntos críticos las variables que se encuentran en rangos anormales para su posterior diagnóstico y solución. Se diseñará la HMI de forma que se pueda alarmar al operador visualmente mediante el encendido de luces piloto, además se visualizará temperaturas y presión en puntos críticos de manera que el operador podrá conocer alguna anomalía en el proceso.

Para la seguridad del proceso se limitará los rangos de salida en la HMI en los set point de temperatura y presión del intercambiador de calor CO₂-agua de forma que el operador identifique cuales son los rangos confiables máximos y mínimos de control del proceso.

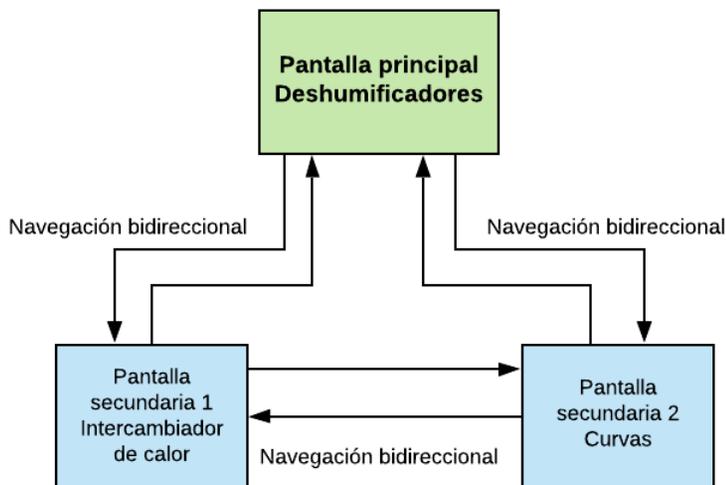
Arquitectura y navegación del HMI

La función del HMI es colaborar con el operador para que en conjunto tomar decisiones en el control del proceso, se diseñó la interfaz hombre máquina amigable, intuitiva y gráfica para una mejor operación del proceso de deshumificación.

En la **Figura 82** se muestra la navegación entre pantallas del HMI la misma que es bidireccional, de manera que de una pantalla se puede navegar a cualquier otra en el diseño.

Figura 82

Arquitectura y navegación de las pantallas del proceso de deshumificación



Pantalla principal Deshumificadores

La **Figura 83** muestra la pantalla de inicio cuando se enciende el sistema, en esta pantalla se envían los parámetros para el control de encendido y apagado de la bomba de agua así mismo se visualiza el tiempo de funcionamiento por medio de un horómetro; además en

esta pantalla se visualizan las temperaturas de entrada y salida de CO₂ en los deshumificadores en tiempo real.

A continuación, se ven las características de las señales medidas e instrumentos controlados en la pantalla deshumificadores.

- Botón de encendido de la bomba de agua.
- Botón de apagado de la bomba de agua.
- Horómetro de la bomba de agua.
- Mímico de la bomba de agua.
- Visualización de temperatura de entrada y salida de CO₂ del Deshumificador Unión.
- Visualización de temperatura de entrada y salida de CO₂ del Deshumificador Witteman.
- Luz de alarma de temperatura de alta de CO₂ en el deshumificador Unión.
- Luz de alarma de temperatura de alta de CO₂ en el deshumificador Witteman.

La temperatura de salida de CO₂ de los deshumificadores es crítica en el proceso, es por esto que se debe alarmar al operador cuando se supera el límite de temperatura adecuado para una óptima licuefacción de CO₂, estos valores de alarma de temperatura se las dispuso según la experiencia de los técnicos operadores como se muestra en la **Tabla 27**.

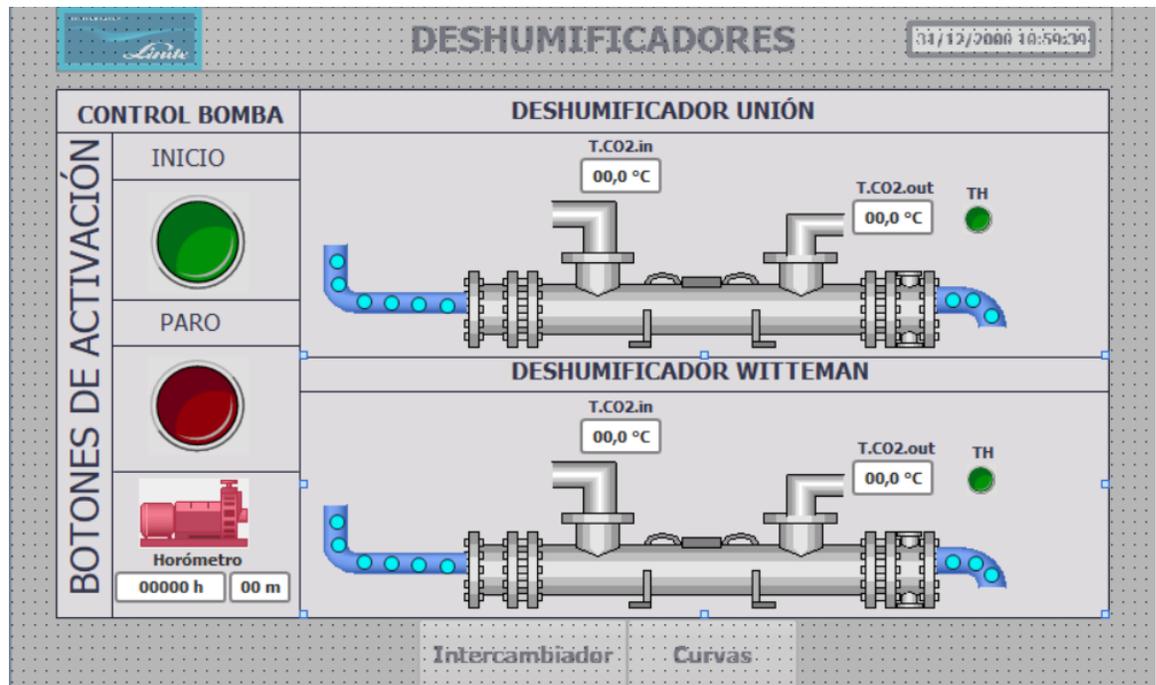
Tabla 27

Encendido de Luz de alarma por alta temperatura a la salida

Deshumificador Unión	Deshumificador Witteman
TH > 12°C	TH > 15°C

Figura 83

Pantalla principal deshumificadores



Pantalla Intercambiador

En la **Figura 84** se muestra la pantalla intercambiador la misma que permite enviar los parámetros para el control de temperatura de la válvula de control del intercambiador de calor CO2-agua, además se visualizan las variables de temperatura y presión que intervienen en el control del intercambiador de calor CO2-agua.

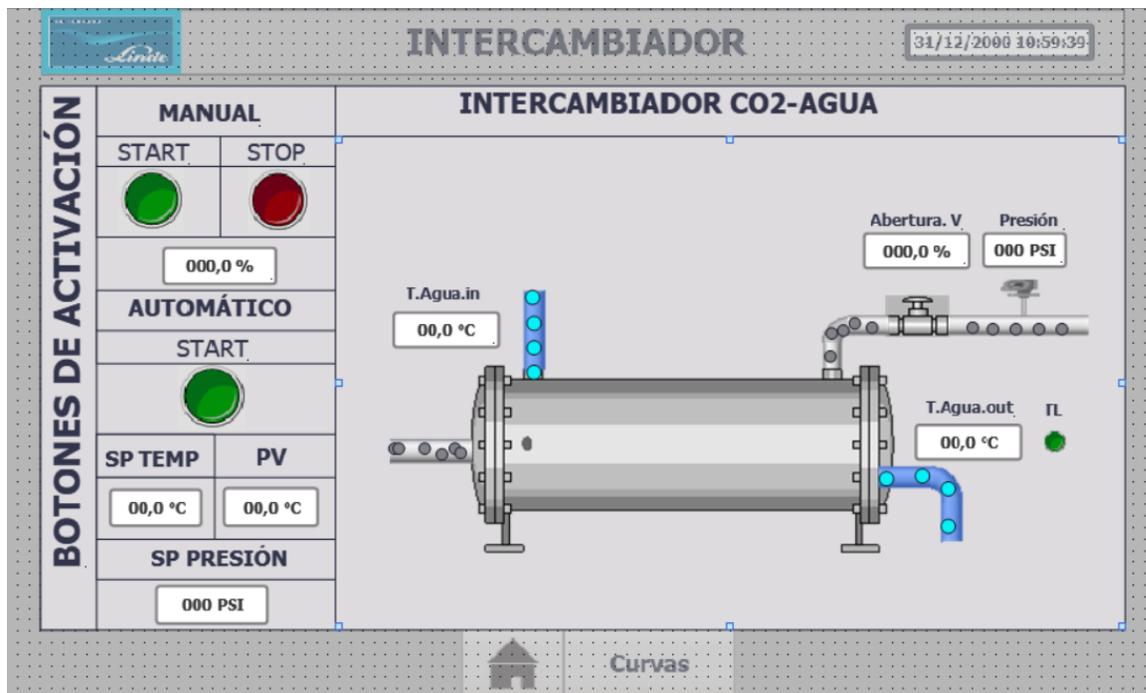
A continuación, se ven las características de las señales medidas y actuadores controlados en la pantalla intercambiador.

- Modo Manual (Botones de Inicio y Paro)
- Ingreso de porcentaje de abertura de la válvula de control solo en modo manual.
- Modo Automático (Botón de Inicio).
- Ingreso de set point de temperatura.
- Ingreso de set point de presión.
- Visualización de PV (Temperatura de salida del agua).
- Visualización de temperatura de entrada y salida de agua.

- Visualización de presión de entrada de CO2 al intercambiador de calor.
- Visualización de abertura de la válvula de control.

Figura 84

Pantalla intercambiador CO2-agua



Límites de ingreso de sets point

La pantalla intercambiador se configuró de manera que en la entrada de los set point de temperatura y presión tengan un rango admisible por seguridad del sistema, debido que la temperatura no debe ser menor a 0 °C y presión no mayor a la presión de los tanques de almacenamiento “cardox”.

La **Tabla 28** muestra los rangos admisibles de entrada de los sets point de presión y temperatura desde el HMI.

Tabla 28

Rangos de valores limitados del set point por la HMI

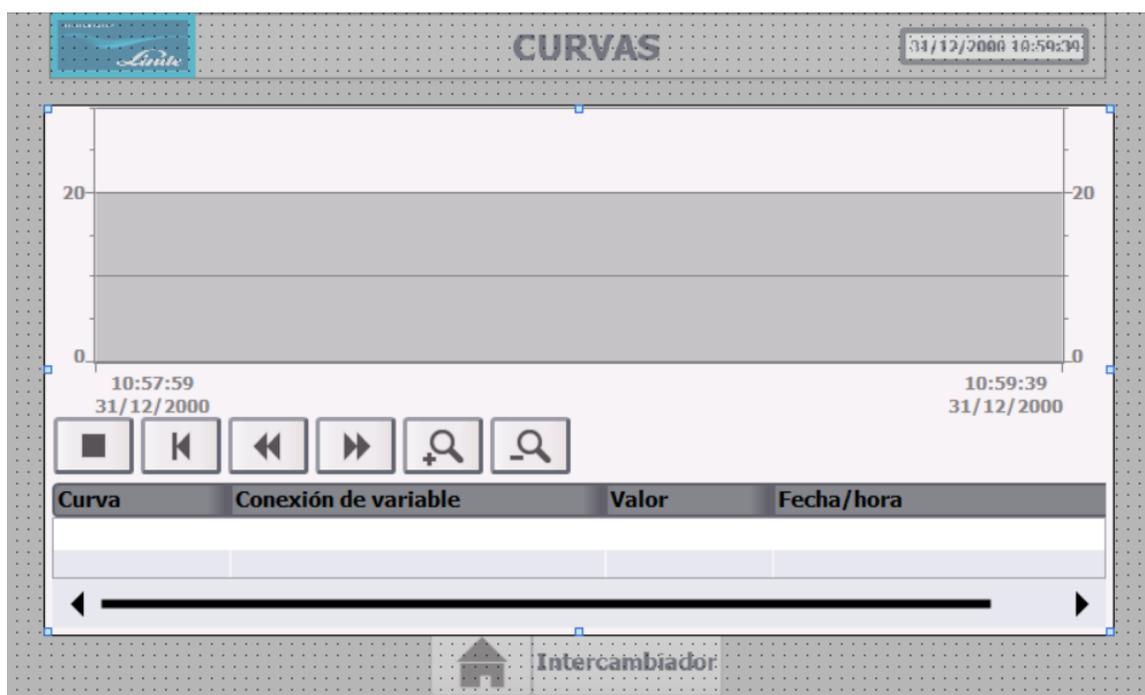
	Límite inferior	Límite superior
Temperatura	1° C	10 °C
Presión	100 psig	270 psig

Pantalla Curvas

En la **Figura 85** se muestra la pantalla curvas que permite la visualización de las curvas del set point y temperatura de salida de agua para tener un control del funcionamiento del intercambiador de calor CO2-agua en tiempo real.

Figura 85

Pantalla de visualización de curvas del intercambiador CO2-agua



Capítulo V

Implementación

La implementación de hardware y software de los elementos y dispositivos del proceso de deshumificación se realizó luego de un estudio eléctrico y mecánico de manera que se pueda optimizar el espacio de los elementos en el tablero eléctrico e instalación del intercambiador de calor CO2-agua.

La implementación del sistema del proceso de deshumificación se llevó a cabo mediante una planificación establecida por parte del gerente de producción de planta de LIC como se observa en la **Figura 86**.

Figura 86

Planificación de la implementación del proyecto intercambiador de calor

ACTIVIDADES	DURACIÓN															
	MES 1 JULIO				MES 2 AGOSTO				MES 3 SEPTIEMBRE				MES 4 OCTUBRE			
	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 5	Semana 6	Semana 7	Semana 8	Semana 9	Semana 10	Semana 11	Semana 12	Semana 13	Semana 14	Semana 15	Semana 16
1 Levantamiento de información de la planta LIC																
2 Instalación de accesorios para pruebas de funcionamiento y toma de datos																
3 Actualización de los cálculos y diagramas eléctricos y de control																
4 Adquisición de equipos, instrumentación y control																
5 Implementación y distribución del hardware en el tablero de control																
6 Instrumentación del intercambiador de calor CO2-agua																
7 Pruebas del funcionamiento de sensores y actuadores																
8 Automatización del intercambiador CO2-agua																
9 Implementación de la interfaz hombre-máquina y enlace con el Scada planta CO2 LIC																
10 Pruebas del funcionamiento de la automatización y HMI																
11 Revisión documento final																
11 Presentación y evaluación Proyecto																

A continuación, se dará a conocer el orden del implementación del sistema del proceso de deshumificación.

- Instalación del tablero eléctrico del proceso de deshumificación
- Instalación de dispositivos en el tablero eléctrico del proceso de deshumificación
- Instrumentación de los deshumificadores

- Instalación de la tubería de agua
- Instalación de la tubería de CO2
- Instalación del intercambiador de calor CO2-agua
- Instrumentación del intercambiador de calor CO2-agua
- Instalación de dispositivos en el tablero eléctrico donde se encuentra el controlador PLC_TANQUES

Diseño del tablero de control

En el diseño del tablero eléctrico se emplearon un conjunto de reglas para el cálculo de protecciones, conductores e instalación de dispositivos de control. Para el presente proyecto se consideró la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC-SB-IE.

Se empleará para el diseño del tablero eléctrico el apartado de *Tablero de distribución tipo centro de carga de la Norma NEC-SB-IE*, la misma que menciona

- Debe ser ubicado en un lugar permanentemente seco, que represente el punto más cercano a todas las cargas parciales de la instalación y en paredes de fácil acceso a personas que realicen labores de reconexión o mantenimiento.
- En el lado interior de la tapa o puerta de los tableros debe colocarse obligatoriamente el diagrama unifilar con el listado de los circuitos a los que protege cada uno de los interruptores.
- Las cargas asignadas a las fases deben balancearse en todo cuanto sea posible.
- Por cada cinco salidas que se alimenten del tablero de distribución se debe dejar por lo menos una salida de reserva.
- Todo circuito debe tener necesariamente su respectivo dispositivo de protección de sobrecorriente.

- La altura de instalación debe ser a 1,60 metros desde el nivel del piso a la base del tablero.
- El tablero de distribución debe tener barra de neutro (aislada) y barra de tierra (Unamuno, 2018).

Instalación del tablero eléctrico

En la **Figura 87** se muestra el antiguo tablero del proceso de deshumificación, este fue desinstalado para la implementación del proyecto intercambiador de calor CO2-agua.

Figura 87

Tablero eléctrico antiguo desinstalado del proceso de deshumificación

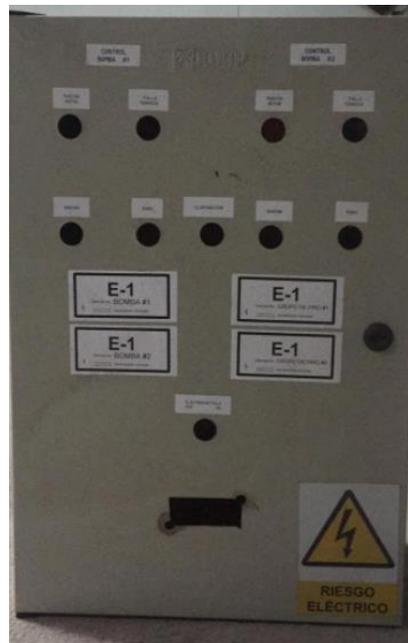


Figura 88

Proceso de instalación del tablero eléctrico



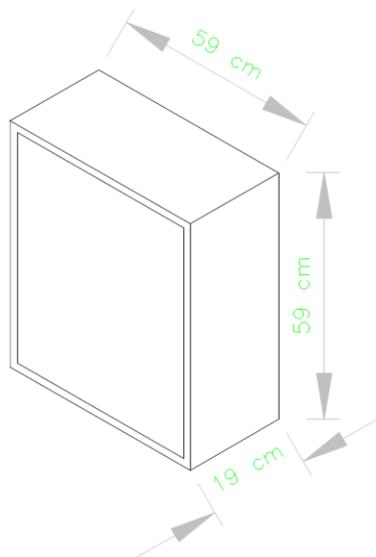
Dimensiones del tablero eléctrico

El tablero eléctrico fue adquirido con anterioridad de manera que se ajustará la implementación al tablero existente en planta CO2.

Las dimensiones del tablero se dan a conocer en la **Figura 89**.

Figura 89

Dimensiones del tablero eléctrico



En la **Figura 90** se muestra la instalación del nuevo tablero de control en el proceso de deshumificación.

Figura 90

Instalación del tablero eléctrico

***Diagrama esquemático de control del controlador PLC_DESHUMIFICADORES***

El diagrama esquemático de control se empleó para referenciar la implementación de la conexión alámbrica del controlador, módulos de expansión, sensores y actuadores. La conexión de los sensores de temperatura será a tres hilos, la conexión se muestra en la **Figura 56** del Capítulo III del presente proyecto.

Diagrama esquemático de potencia del motor de la bomba de agua

La **Figura 91** muestra el diagrama de potencia del motor de la bomba de agua, el diagrama se empleará para a la conexión del contactor, guardamotor y relé térmico para el accionamiento del motor de la bomba de agua.

Figura 91

Diagrama esquemático de potencia del motor de la bomba de agua

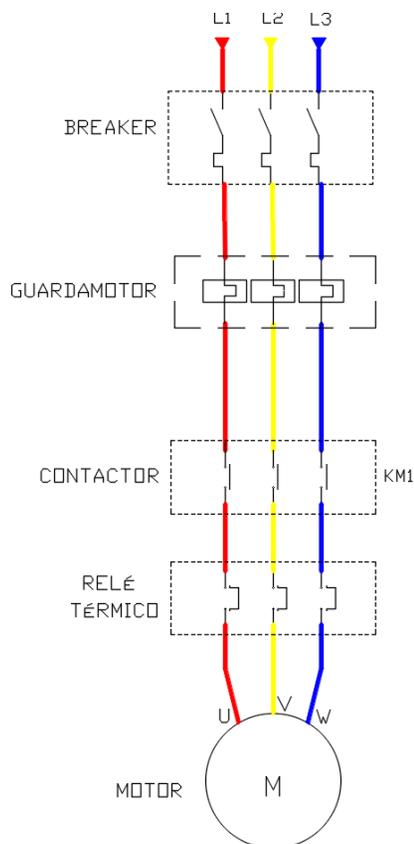


Diagrama esquemático de control del controlador PLC_TANQUES

El diagrama de control del controlador PLC_TANQUES permitió realizar la conexión alámbrica del módulo analógico para RTD con los sensores de temperatura, la conexión del sensor de presión a la entrada analógica y conexión del módulo de salida analógica con la válvula de control del intercambiador de calor CO₂-agua la conexión se muestra en la **Figura 57** del Capítulo III del presente proyecto.

Disposición de los elementos

Inicialmente en la implementación del tablero se realizó la puesta de canaletas y orificios para empotrar los elementos de maniobra y equipo de supervisión HMI.

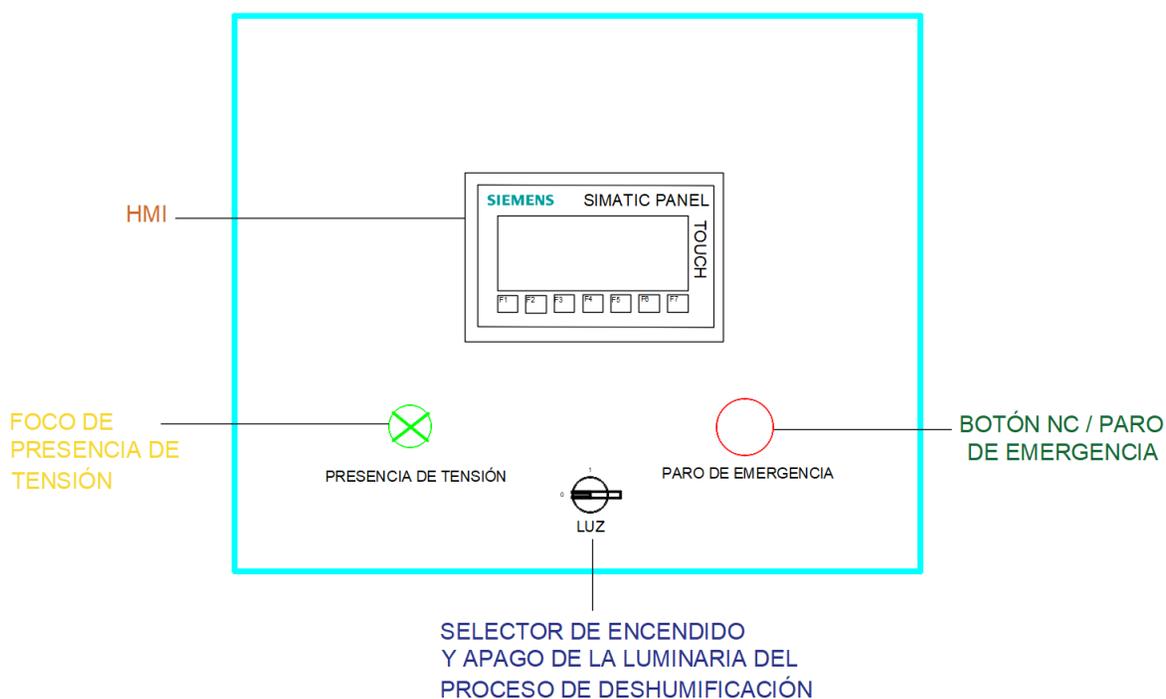
Los elementos en el tablero eléctrico se dispusieron de forma que la conexión entre los elementos de control y elementos de potencia sea sencilla, además los elementos en el tablero

de control se ubicaron de forma ordenada, separando los elementos de control y potencia entre las canaletas instaladas.

En la **Figura 92** se muestra la disposición de la HMI, luz de presencia de tensión, botón de paro de emergencia y selector de encendido o apagado de la luz del área del proceso de deshumificación.

Figura 92

Disposición de los elementos en el tablero eléctrico, vista frontal



La **Figura 93** muestra la vista frontal del tablero eléctrico después de la implementación.

Figura 93

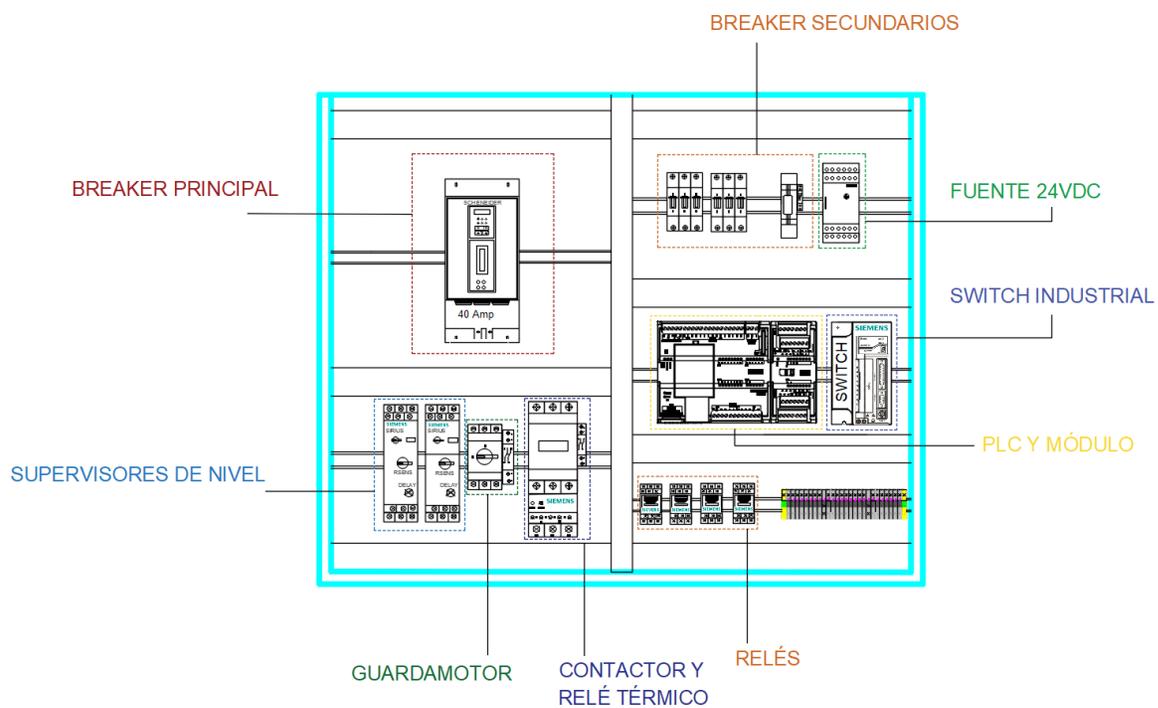
Implementación del tablero eléctrico, vista frontal



En la **Figura 94** se muestra la disposición de los elementos en el interior del tablero eléctrico, disposición del breaker principal, breaker secundario, PLC y módulos, switch industrial, relés, contactores, relé térmico y guardamotor.

Figura 94

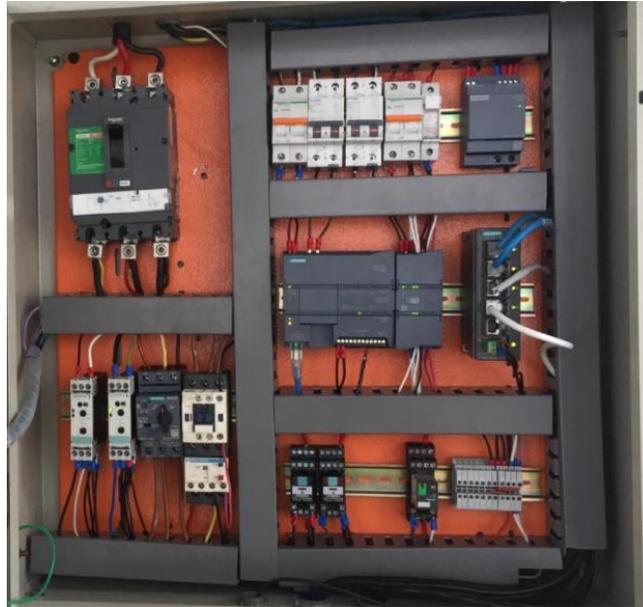
Disposición de los elementos en el tablero eléctrico, vista interior



En la **Figura 95** se muestra la vista interna de los elementos después de la implementación.

Figura 95

Disposición de los elementos del tablero eléctrico, vista interna



Equipos de protección

Para la protección de los equipos se utilizó breakers para la protección del controlador, módulos de expansión, pantalla táctil y fuente de poder.

La protección de la bomba de agua se efectuó por medio de un breaker principal, guardamotor y relé térmico.

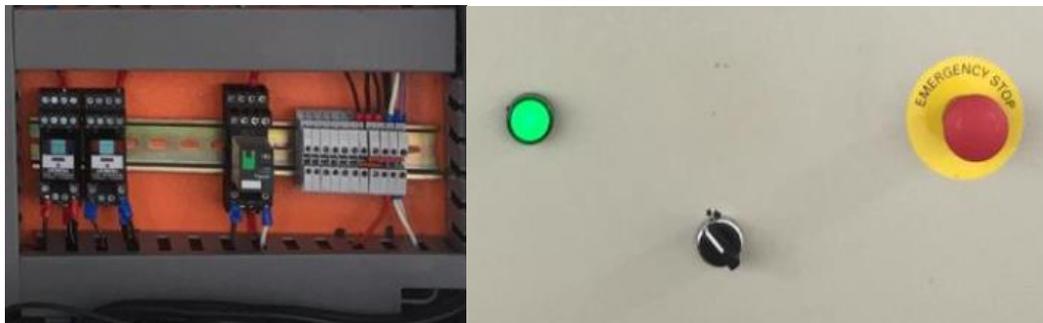
Equipos de maniobra

Los equipos de maniobra del proceso de deshumificación relés y contactores se las situó en la parte inferior del tablero de forma ordenada, de forma que los relés se ubican al lado derecho y en el lado izquierdo se encuentra el contactor para el accionamiento del motor de la bomba de agua.

El paro de emergencia se colocó al lado derecho de la parte externa del tablero eléctrico como se muestra en la **Figura 96**.

Figura 96

Instalación de dispositivos de maniobra en el tablero eléctrico



Equipo de alimentación

Debido a la limitación de espacio dentro del tablero eléctrico se ubicó la fuente de voltaje de 24 VDC en la parte superior derecha junto a los breakers secundarios del tablero eléctrico, como se muestra en la **Figura 97**.

Figura 97

Fuente de voltaje de 24 VDC



Switch Industrial

El switch industrial se colocó al lado derecho junto al controlador S7 1200, de forma que permitirá la conexión sencilla entre la HMI y el controlador.

Figura 98

Switch industrial de 5 puertos



Equipos de control y módulos

El controlador y módulos de expansión se situó en la parte central derecha junto al switch industrial como se muestra en la **Figura 99**.

Figura 99

Controlador y módulos de expansión



Pantalla Táctil HMI

La instalación de la pantalla táctil se la realizó en la parte frontal del tablero eléctrico.

Figura 100

Pantalla táctil de 7 pulgadas instalada en el tablero eléctrico



Instalación de los sensores de temperatura en los deshumificadores

Para la instalación de los sensores de temperatura en la salida y entrada de CO₂ en los deshumificadores se realizó un orificio de ½ pulgada en la tubería de CO₂ para la implementación de los sensores como se muestra en la **Figura 101** y **Figura 102**, este procedimiento se realizó cuando la planta de producción se encontraba parada por mantenimiento preventivo.

Figura 101

Sensor de temperatura a la entrada del deshumificador

**Figura 102**

Sensor de temperatura a la salida del deshumificador



Instalación del intercambiador de calor CO2-agua

El procedimiento para la instalación del intercambiador de calor CO₂ -agua se efectuó con la asistencia de los técnicos operadores y personal contratista de la planta de CO₂.

Inicialmente se instaló la tubería de agua para posteriormente posicionar la tubería de CO₂ y concluir con la instalación de intercambiador de calor en conjunto con sensores y actuadores.

En la **Figura 103** se muestra en el lado izquierdo el intercambiador antes de la automatización y al lado derecho el intercambiador después de la automatización.

Figura 103

Intercambiador de calor CO₂-agua, antes y después de la automatización



Instalación de tubería de agua

Se realizó la instalación de tubería de agua de entrada y salida del intercambiador de calor CO₂-agua, esta actividad se realizó con la ayuda de los técnicos operadores; la longitud de tubería instalada es de 100 m de longitud.

La tubería instalada es de plástico con diámetro de 2 pulgadas y espesor de 5 mm.

Figura 104

Instalación de la tubería de agua



Figura 105

Instalación de tubería de agua, entrada y salida en los deshumificadores



Instalación de tubería de CO2

La implementación de la tubería de CO2 se efectuó empleando todas las normas de seguridad, para lo cual inicialmente se cerraron las válvulas de ingreso y salida de CO2 de los tanques de almacenamiento, la instalación de tubería se realizó con personal contratista como se muestra en la **Figura 106** y **Figura 107** debido a la soldadura y prueba de fugas posterior en la tubería.

Figura 106

Instalación de la tubería de CO2 proveniente del Cardox B



Figura 107

Unión de tubería de CO2 provenientes de tanques de almacenamiento



Instalación del intercambiador de calor CO2-agua

Para la instalación del intercambiador de calor CO2-agua previamente se pintó y se alineó la base como se muestra en la **Figura 108** para posteriormente anclarlo al piso y realizar la conexión de la tubería con el intercambiador.

Figura 108

Instalación del intercambiador de calor CO2-agua



Integración y conexión de dispositivos y equipos

Finalizada la instalación del tablero eléctrico, intercambiador de calor CO2-agua, tubería de agua y tubería de CO2 se prosiguió a la integración y conexión de los sensores, actuadores y elementos de maniobra para el control y supervisión del proceso de deshumificación.

Cálculo de conductores

Es de gran importancia en el diseño del tablero eléctrico el dimensionamiento de conductores ya que el incorrecto dimensionamiento del conductor podría ocasionar calentamientos en el conductor, pérdida de voltaje en los equipos y cortocircuitos.

En la **Tabla 29** se muestra la corriente y voltaje consumidos por los elementos del tablero eléctrico, las especificaciones fueron tomadas de las hojas técnicas de los elementos que se describen en el Anexo II.

Tabla 29*Consumo de corriente de elementos del tablero eléctrico*

Elemento	Voltaje	Corriente
Fuente de alimentación Siemens POWER 24 VDC	110 VAC	1.3 A
Controlador Siemens S7 1200	110 VAC	1.2 A
Módulo de entradas análogas para RTD Marca Siemens	24 VDC	45 mA
Switch industrial Marca Siemens	24 VDC	265 mA
Bobina relé 24 VDC Marca Siemens	24 VDC	100 mA
Supervisor de Nivel	220 VAC	100 mA
Pantalla KTP 700 Marca Siemens	110 VAC	230 mA
Luz piloto Marca Siemens	110 VAC	100 mA
Electroválvula	24 VDC	450 mA

Para el cálculo de conductores se realizará la suma de corrientes de los elementos del tablero eléctrico para posteriormente aumentar el 25% de corriente que indica la Norma NEC-SB-IE.

$$I_T = \sum I_{\text{elementos de control}}$$

$$I_T = 1.3 A + 1.2 A + 45 mA + 265 mA + (100 * 3) mA + (100 * 2) mA + 230 mA + 100 mA + 450 mA$$

$$I_T = 4.09 A$$

Aplicando la Norma NEC-SB-IE

$$I_T = (4.09 * 1.25) A$$

$$I_T = 5.11 A$$

En la **Tabla 30** se muestra las características técnicas del motor de la bomba de agua del proceso de deshumificación.

Tabla 30

Datos técnicos del motor de la bomba de agua

Parámetro	Valor
Voltaje	220 VAC
Potencia	2.23 kW
Factor de potencia	0.89
Frecuencia	60 Hz

Se calcula la corriente consumida por el motor de la bomba de agua mediante la siguiente ecuación:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} * V * fp}$$

Donde:

P: Potencia en kW

V: Voltaje de alimentación

fp: Factor de potencia

$$I = \frac{2.23 \text{ kW}}{\sqrt{3} * 220 * 0.89}$$

$$I = 6.6 \text{ A}$$

Aplicando la Norma NEC-SB-IE

$$I_T = (6.6 * 1.25) \text{ A}$$

$$I_T = 8.25 \text{ A}$$

En la **Figura 109** se muestra la corriente eléctrica referente al número de cable.

Figura 109

Selección del conductor

Número AWG	Diámetro (mm)	Sección (mm ²)	Número espiras por cm.	Kg. por Km.	Resistencia (O/Km.)	Capacidad (A)
0000	11,86	107,2			0,158	319
000	10,40	85,3			0,197	240
00	9,226	67,43			0,252	190
0	8,252	53,48			0,317	150
1	7,348	42,41		375	1,40	120
2	6,544	33,63		295	1,50	96
3	5,827	26,67		237	1,63	78
4	5,189	21,15		188	0,80	60
5	4,621	16,77		149	1,01	48
6	4,115	13,30		118	1,27	38
7	3,665	10,55		94	1,70	30
8	3,264	8,36		74	2,03	24
9	2,906	6,63		58,9	2,56	19
10	2,588	5,26		46,8	3,23	15
11	2,305	4,17		32,1	4,07	12
12	2,053	3,31		29,4	5,13	9,5
13	1,828	2,63		23,3	6,49	7,5
14	1,628	2,08	5,6	18,5	8,17	6,0
15	1,450	1,65	6,4	14,7	10,3	4,8
16	1,291	1,31	7,2	11,6	12,9	3,7
17	1,150	1,04	8,4	9,26	16,34	3,2
18	1,024	0,82	9,2	7,3	20,73	2,5
19	0,9116	0,65	10,2	5,79	26,15	2,0
20	0,8118	0,52	11,6	4,61	32,69	1,6

Nota: Tomado de (Standard, 2021)

Tomando en consideración la **Figura 103** se seleccionará un conductor 14 AWG para los elementos que se encuentran en el tablero eléctrico y un conductor 12 AWG para el motor de la bomba de agua del proceso de deshumificación.

Cálculo de protecciones

Para realizar el cálculo de protecciones es necesario conocer el consumo de corriente de los elementos del tablero eléctrico y motor de la bomba de agua los mismos que se obtuvieron en el apartado anterior y se muestran en la **Tabla 31**.

Tabla 31

Corriente de los dispositivos de control, maniobra y potencia

Elementos del tablero eléctrico	Motor de la bomba de agua
5.11 A	8.25 A

Durante el arranque de un motor, se consume una corriente muy elevada que puede hacer caer la tensión de la red principal lo suficiente como para afectar al funcionamiento normal de los receptores conectados en ella. (Schneider Electric, 2010)

Debido que la conexión del motor de la bomba de agua es en conexión directa existe un pico de corriente donde $I_{arranque} = 5 a 8 I_n$.

$$I_{arranque} = (5 * 8.25) A$$

$$I_{arranque} = (5 * 8.25) A$$

$$I_{arranque} = 41.25 A$$

Para el desarrollo del presente proyecto se emplearán breakers de marca Siemens y Scheneider cuyos valores se presentan en la **Tabla 32**.

Tabla 32

Valor de breakers del tablero eléctrico

	Valor
Elementos del tablero eléctrico	Breaker de marca Siemens 6 A / 2 polos
Motor de la bomba de agua	Breaker de marca Scheneider 40 A / 3 polos

Integración de sensores

La conexión de los elementos de campo se instaló con cable apantallado de 3 y 4 hilos para evitar interferencias y ruido, esto debido que los sensores serán instalados en la intemperie.

Integración de sensores de temperatura

La conexión de los sensores de temperatura con el módulo de expansión para RTD es a 3 hilos como se muestra en la **Figura 110**, la instalación se efectuó tanto en los deshumificadores como en el intercambiador de calor CO2-agua.

Figura 110

Sensores de temperatura



Integración del sensor de presión

Debido que el sensor envía una señal de 4 a 20 mA se empleó una resistencia para la adquisición en voltaje en una entrada análoga del controlador PLC_TANQUES.

Figura 111

Instalación del sensor de presión en el intercambiador de calor



Integración de actuadores

La conexión de los actuadores del proceso de deshumificación se efectuó utilizando cable apantallado y cable #12 flexible para el motor de la bomba de agua.

Válvula de control

La conexión de la válvula de control con el módulo de salida analógica del controlador PLC_TANQUES se efectuó con cable apantallado de 4 hilos, en la instalación se empleó dos cables para alimentación y dos cables para la señal análoga enviada por el módulo como se muestra en la **Figura 112**.

Figura 112

Vista interna de la conexión de la válvula de control



Motor de la Bomba de agua

Para la instalación del control del motor de la bomba de agua se realizó la protección para sobrecorrientes como se muestra en la **Tabla 32** y sobrecargas , instalando un guardamotor y un relé térmico. La protección del motor es necesario para la protección del motor ya que, si no hay el intercambio térmico con el CO₂ en los deshumificadores, el CO₂ ingresará a los compresores con temperatura alta produciendo baja licuefacción y afectando al proceso de producción de LIC.

Electroválvula del compresor Larking

El actuador a controlar para el encendido y apagado del compresor Larking es la electroválvula del compresor de manera que se realizó la conexión con cable #14 en la instalación de control.

En la **Figura 1113** se observa el tablero eléctrico del compresor de marca Larking.

Figura 113

Vista externa e interna del tablero del compresor Larking



Puesta en marcha

La puesta en marcha del presente proyecto consiste en el proceso de verificación, arranque, configuración y regulación de los equipos del proceso de deshumificación, de manera que, cuando entre a funcionar la automatización al proceso de producción LIC cumpla con todos los requerimientos planteados inicialmente para funcionar correctamente.

En la puesta en marcha es indispensable disponer de las medidas de seguridad para poseer completo control si hubiese un evento anormal dentro del proceso, es por esto que en conjunto con los técnicos operadores se realizó el procedimiento.

Parámetros de seguridad

Los parámetros de seguridad iniciales previo a la puesta en marcha del sistema son:

- Verificación de operación de válvulas manuales instaladas en el sistema
- Verificación de presión en tanques de almacenamiento.
- Verificación de agua en el reservorio de agua.
- Verificación de cables sueltos o flojos en el tablero eléctrico.
- Energización total de los dispositivos del proceso de deshumificación.
- Verificación del funcionamiento del paro de emergencia
- Verificación de restricción según los rangos de funcionamiento de los set point de presión y temperatura.

Es importante cumplir todos los parámetros de seguridad previo a la puesta de marcha del sistema.

Parámetros de operación

Los parámetros de operación que se deben verificar previo a la puesta en marcha del sistema son:

- Verificación de aire de instrumentación para la válvula de control del intercambiador de calor CO2-agua.
- Verificación del estado de los controladores empleados en el proceso de deshumificación.
- Calibración de sensores comparando con manómetros y termómetros.
- Control de la bomba de agua.
- Comunicación entre el controlador PLC_DESHUMIFICADORES y el controlador PLC_TANQUES.
- Sintonización del regulador PID del intercambiador de calor CO2-agua.

Pasos de funcionamiento del sistema

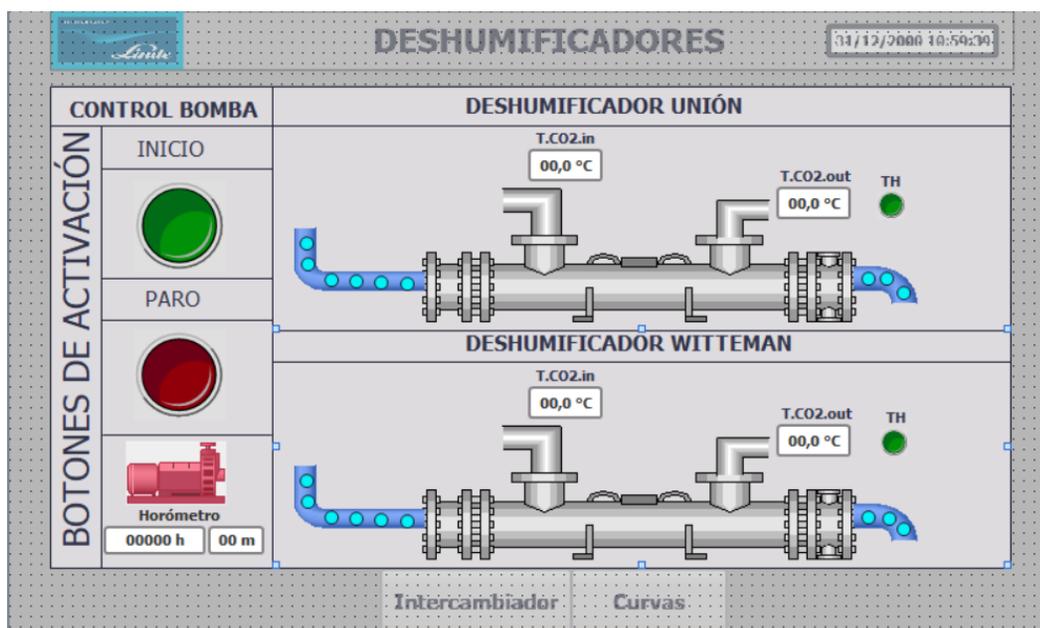
Posteriormente que los parámetros de seguridad y operación han sido verificados, calibrados y regulados los pasos para la operación y arranque del sistema son los siguientes.

Funcionamiento de la bomba de agua e instrumentación de los deshumificadores

A continuación, se muestran los pasos para la puesta en marcha de la bomba de agua y visualización de temperatura de entrada y salida de los deshumificadores.

Figura 114

Control de la bomba e instrumentación de los deshumificadores



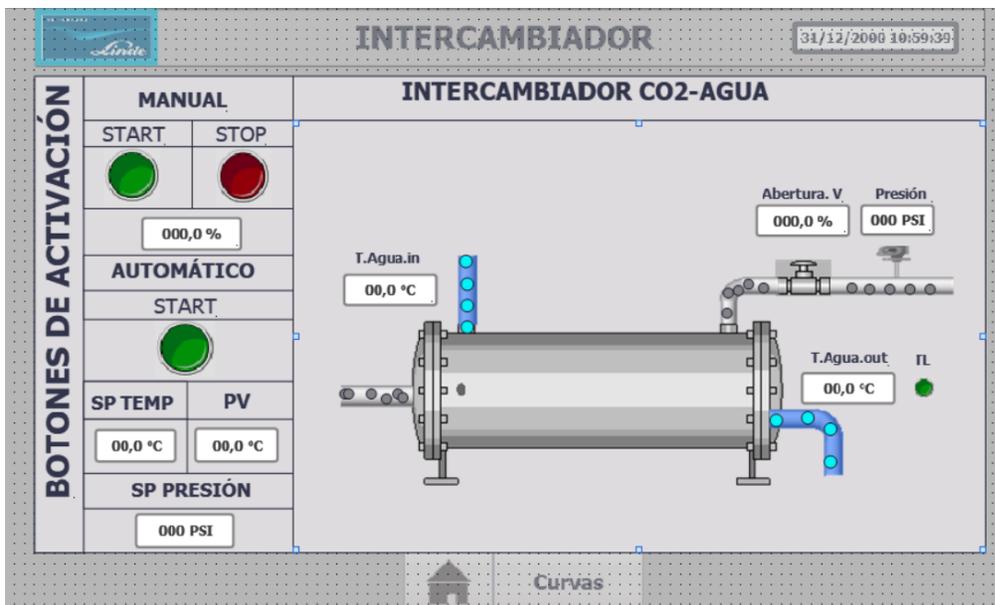
- Pulsar el botón de inicio en la pantalla DESHUMIFICADORES.
- Verificación de salida y retorno de agua del reservorio de agua.
- Verificación de temperaturas de entrada y salida de los deshumificadores.
- Pulsar el Botón PARO para detener el funcionamiento de la bomba de agua.

Funcionamiento del intercambiador de calor

A continuación, se muestran los pasos para la puesta en marcha de la automatización del intercambiador de calor CO2-agua.

Figura 115

Funcionamiento del intercambiador de calor CO2-agua

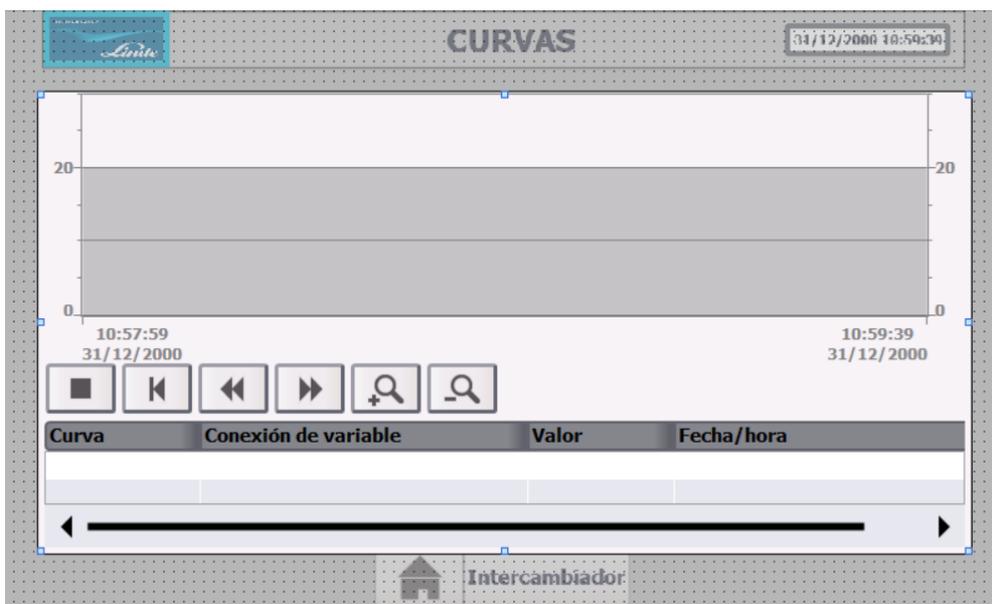


- Ingreso de set point de temperatura (SP TEMP).
- Ingreso de set point de presión (SP PRESIÓN)
- Selección de Modo (Manual o Automático)
- Modo Manual
- Ingreso de porcentaje de abertura de la válvula de control.
- Pulsar el Botón START.
- Visualización del cambio de temperatura en la salida del intercambiador de calor CO2-agua
- Visualización de la variable de proceso (PV).
- Pulsar el Botón STOP (Para pasar de Modo manual a automático).
- Modo Automático.
- Pulsar el Botón START.

- Visualización del cambio de temperatura en la salida del intercambiador de calor CO2-agua.
- Visualización de la variable de proceso (PV).
- Pulsar el Botón STOP (Para pasar de Modo automático a manual).
- Visualización de las gráficas del comportamiento de temperatura de agua en el intercambiador de calor.

Figura 116

Gráficas de set point de temperatura y variable de proceso



Capítulo VI

Pruebas y resultados

En este capítulo se presentan las pruebas efectuadas para el correcto funcionamiento de los elementos de instrumentación, control y supervisión antes y después de la implementación para garantizar la operación e integración de la automatización de calor CO₂-agua al proceso de deshumificación.

Además, se presentarán los resultados obtenidos con la automatización de calor CO₂-agua de manera que se expondrá los resultados de eficiencia energética, producción de LIC y mejora del proceso de deshumificación.

Pruebas

En el presente proyecto previo a la implementación de la automatización de calor CO₂-agua se efectuó pruebas de consumo de flujo másico de CO₂ para llegar a la temperatura de salida de agua seteada, además se efectuó pruebas de control de temperatura de forma manual (actuando sobre válvulas manuales a la entrada de CO₂ en el intercambiador).

Posteriormente a la implementación en campo del intercambiador de calor CO₂-agua e instrumentación de los deshumificadores se efectuó pruebas al sistema de instrumentación, control y supervisión.

Pruebas previo a la implementación del intercambiador de calor CO₂-agua

Se efectuó la instrumentación del intercambiador CO₂-agua, mediante sensores de temperatura PT100 en la entrada y salida del agua como se muestra en la **Figura 117**, además se instaló un medidor de flujo a la entrada de CO₂ para verificar el flujo de masa utilizado para el control de temperatura a la salida del intercambiador de calor CO₂-agua.

Los valores de temperatura fueron guardados en el PLC S7-1200 para luego ser descargadas en un archivo Excel para su posterior análisis.

Figura 117

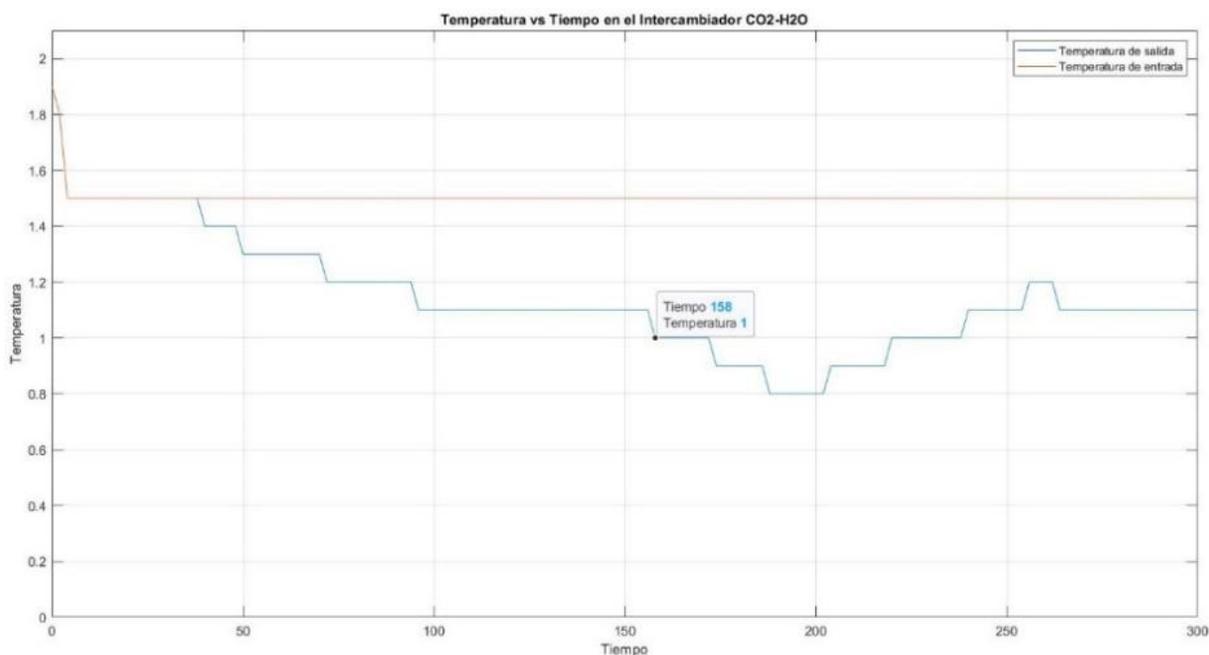
Pruebas de instrumentación



Se realizó la simulación de control manual de temperatura donde se observa en la **Figura 118** un descenso de temperatura a la salida de agua al ingresar CO₂ por el intercambiador de calor CO₂-agua.

Figura 118

Pruebas realizadas de control de temperatura



En la **Tabla 33** se muestra los datos tomados al iniciar el presente proyecto donde se observa el flujo másico de CO₂ consumido en el intercambiador de calor CO₂-agua para la reducción de temperatura de agua de 1.5 °C a 1°C.

Tabla 33

Pruebas de flujo másico y temperaturas

Temperatura entrada[°C]	Temperatura salida[°C]	Flujómetro [kg]	Tiempo [s]
1,5	1,5	6615879	0
1,5	1	6615899	1,58
1,5	1	6615909	3,24
1,5	1	6615916	4,9
1,5	1	6615923	6.56

Temperatura entrada[°C]	Temperatura salida[°C]	Flujómetro [kg]	Tiempo [s]
1,5	1	6615928	8,22

Pruebas del sistema de instrumentación

Las pruebas del sistema de instrumentación se ejecutaron calibrando los sensores de temperatura y presión con referencia a manómetros y termómetros instalados en campo respectivamente, además se efectuó pruebas en diferentes puntos por medio del pirómetro para comparar con la temperatura de los sensores instalados en el intercambiador de calor y los equipos de deshumificación.

En esta actividad los sensores de temperatura tuvieron un rango de precisión aceptable comparado con el pirómetro (± 0.2 °C); el sensor de presión tuvo que ser calibrado, de manera que se cambió el valor inferior de escalamiento en el controlador para tener una precisión aceptable comparado con los manómetros (± 1 psig).

Pruebas de comunicación entre PLC's

Las pruebas de comunicación entre el controlador PLC_DESHUMIFICADORES y controlador PLC_TANQUES se efectuó abriendo la ventana de comando en Windows y realizando el comando ping desde la PC hacia los controladores, de forma que para ambos controladores se verifico la comunicación.

Además, en la prueba de envío y recepción de datos entre los controladores se utilizó el modo online de Tia Portal donde se verificó que los datos se envían bidireccionalmente entre los controlares.

Pruebas del sistema de control

Las pruebas de la acciones de control en los actuadores se efectuó independiente para verificar su funcionalidad en el sistema implementado.

Control ON-OFF con histéresis de la electroválvula del compresor Larking

El ajuste de la acción de control de la electroválvula del compresor Larking se realizó de forma experimental de manera que la frecuencia de apagado y encendido del compresor Larking sea baja.

Debido que el compresor Larking se apaga por alta presión en la descarga de freón, al actuar en la electroválvula que se activa cuando la temperatura de salida de agua del intercambiador de calor CO2-agua sea mayor a 1 °C que la temperatura seteada, este valor de histéresis de temperatura permitirá que el sistema funcione correctamente.

Se ejecutó varias pruebas del control implementado y sus pruebas fueron satisfactorias con el sistema.

Control ON-OFF de encendido y apagado de la bomba de agua

Se realizaron varias pruebas en el encendido y apagado del motor de la bomba de agua, el resultado fue satisfactorio con el control implementado.

Control PID de la válvula de control del intercambiador de calor CO2-agua

En las pruebas del lazo de control de la válvula del intercambiador de calor CO2-agua se realizaron varias pruebas cambiando el set point de temperatura de agua y verificando el tiempo de establecimiento y estabilidad de la variable de proceso o temperatura de salida de agua.

Pruebas del sistema de supervisión

Las pruebas del sistema de supervisión se ejecutaron mediante el programa de Tia Portal que permite simular las pantallas diseñadas del HMI.

Las pruebas mediante el programa de Tia Portal fueron satisfactorios para la visualización de los parámetros de instrumentación donde se verifica el envío de parámetros hacia y desde el controlador PLC_DESHUMIFICADORES.

Resultados

Los resultados del presente proyecto fueron de acuerdo a los objetivos planteados inicialmente, donde se planteó como objetivo principal disminuir el consumo energético del compresor Larking y mejorar la producción de CO2 líquido.

Los dispositivos del proceso de deshumificación de forma general tendrán una mejor monitorización por medio de la instrumentación implementada en el proyecto permitiendo al operador supervisar la eficiencia de deshumificación.

Los lazos de control implementados cumplen con el diseño de hardware y software de manera que el proceso tendrá un mejor desempeño, además de la implementación de seguridad que anteriormente carecía el proceso.

Consumo energético del compresor Larking

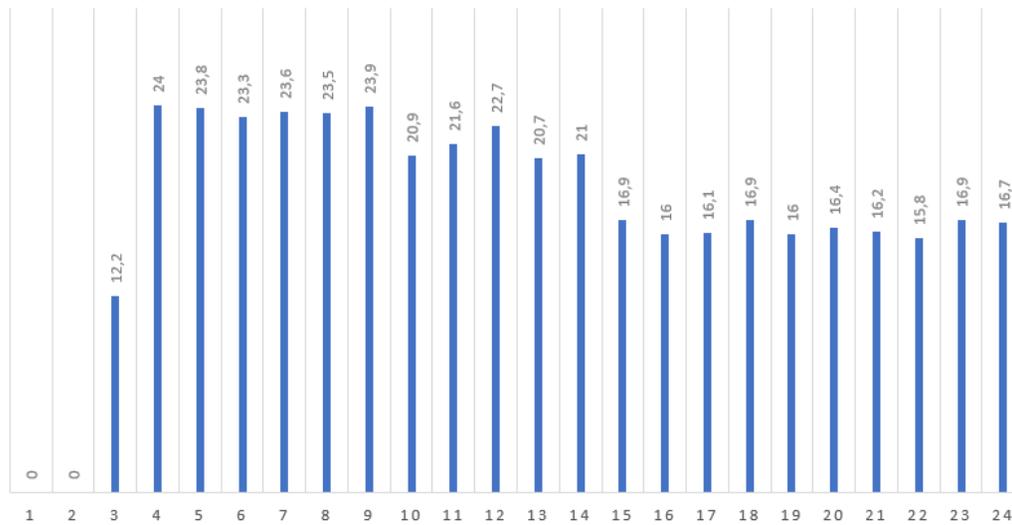
El objetivo principal del presente proyecto es la automatización del intercambiador de calor CO2-agua para funcionar en paralelo junto al sistema de compresión de freón para disminuir el consumo energético del proceso de deshumificación, es por esto que una gran oportunidad que se ha visto en el ámbito de eficiencia energética es disminuir el tiempo de funcionamiento del compresor Larking y disminuir el consumo de energía del proceso.

Para verificar la disminución del tiempo de funcionamiento del compresor Larking se obtuvieron datos del tiempo de funcionamiento diario del compresor Larking del mes de diciembre como se muestra en la **Figura 119**, a partir del día 9 empiezan las pruebas de funcionamiento y se observa la disminución de tiempo de funcionamiento del compresor. Los datos fueron tomados de los reportes de media noche de los técnicos operadores.

Figura 119

Número de horas diarias de funcionamiento del compresor Larking

HORÓMETRO COMPRESOR LARKING / DICIEMBRE



En la **Tabla 34** se observa el consumo energético del compresor Larking antes y después de la automatización del intercambiador de calor CO₂-agua, los datos de consumo energético fueron tomadas de los reportes mensuales de la planta de producción de LIC.

Tabla 34

Consumo energético mensual del compresor Larking

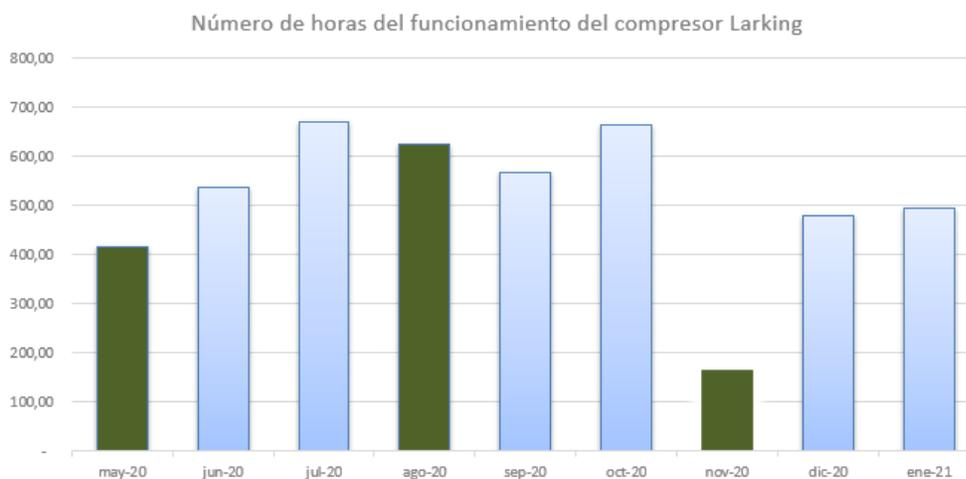
Fecha	Número de horas	Consumo de energía kWh	Observación
may-20	417,30	3.175,65	Parada de planta por mantenimiento
jun-20	538,36	4.096,92	-
jul-20	669,65	5.096,04	-
ago-20	625,84	4.762,64	Parada de planta por mantenimiento
sep-20	567,30	4.317,15	-

Fecha	Número de horas	Consumo de energía kWh	Observación
oct-20	664,80	5.059,13	-
nov-20	165,60	1.260,22	Parada de planta por mantenimiento
dic-20	480,00	3.652,80	Funcionamiento de la automatización del intercambiador de calor
ene-21	495,00	3.766,95	-

En la Figura **120** se observa el número de horas de funcionamiento mensual del compresor Larking, donde se observa una disminución del tiempo de funcionamiento del compresor Larking en condiciones normales de la planta de producción de LIC.

Figura 120

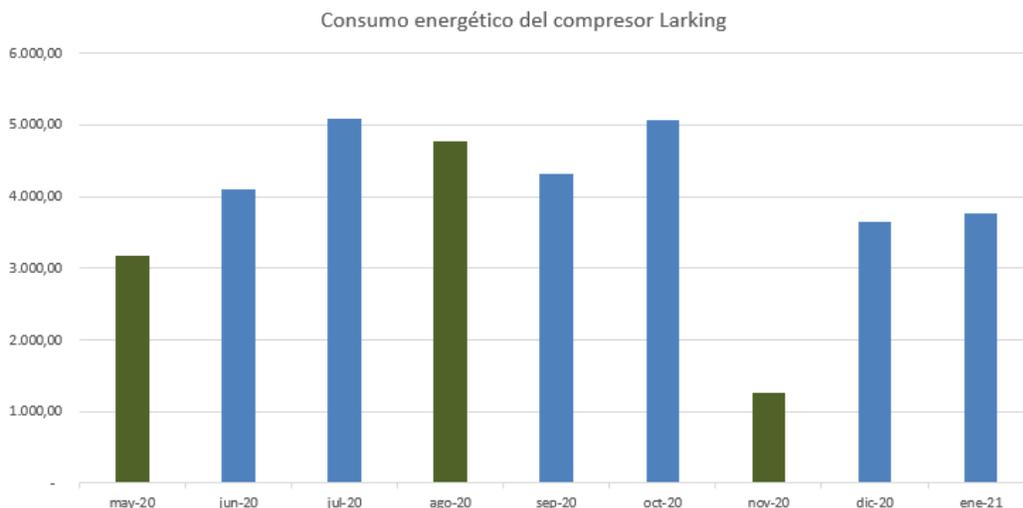
Número de horas mensuales de funcionamiento del compresor Larking



En la **Figura 121** se observa el consumo energético mensual del compresor Larking, donde se observa una disminución de consumo energético en condiciones normales de la planta de producción de LIC.

Figura 121

Consumo energético del compresor Larking



Se verifica que la implementación del intercambiador de calor CO₂-agua en el proceso de deshumificación ayudó a disminuir el tiempo de funcionamiento diario del compresor Larking en aproximadamente de 6 a 8 horas de manera que se disminuirá el consumo energético del proceso de deshumificación.

Análisis de producción de LIC

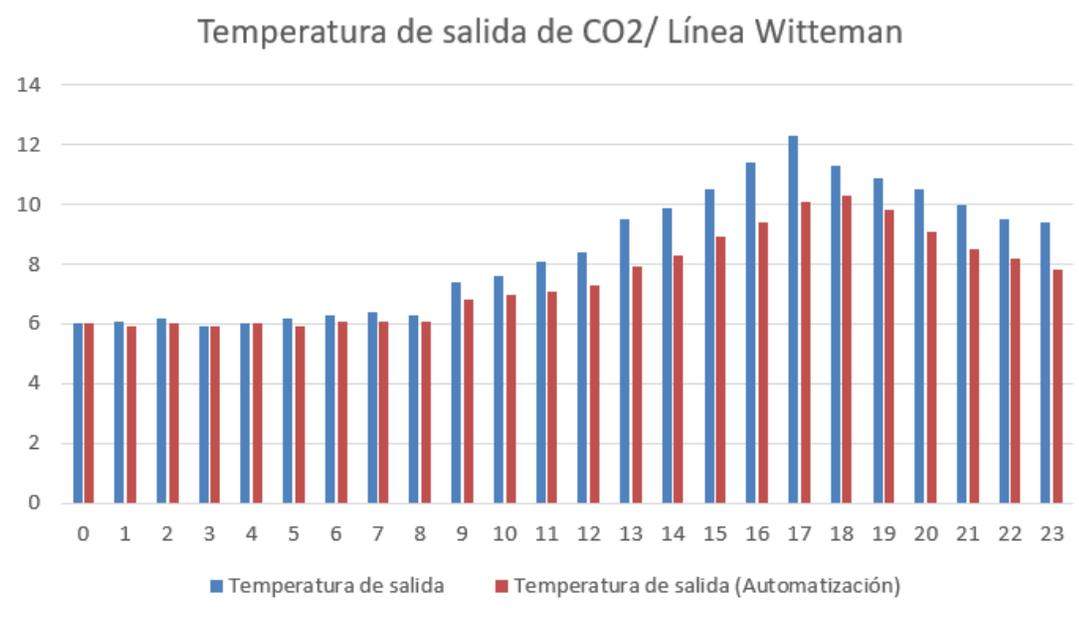
El control de temperatura de agua a la salida del intercambiador de calor CO₂-agua permitirá a los deshumificadores operar eficientemente, de manera que la temperatura de entrada del agua a los deshumificadores será controlada y disminuirá la temperatura de salida de CO₂ en los deshumificadores, esto a su vez mejorará el tiempo de licuefacción de CO₂ y aliviará las presiones de los tanques de almacenamiento de LIC.

Comparación de temperatura de salida de CO2 en los deshumificadores

En la **Figura 122** se muestra la comparación de la temperatura de salida de CO2 antes y después de la implementación del proyecto. La comparación de las temperaturas de salida se realizó con las mismas condiciones climáticas y disposición de los equipos de planta LIC. Los datos de temperaturas fueron tomadas de los reportes diarios de los técnicos operadores.

Figura 122

Comparación de temperatura de salida de CO2 en los deshumificadores



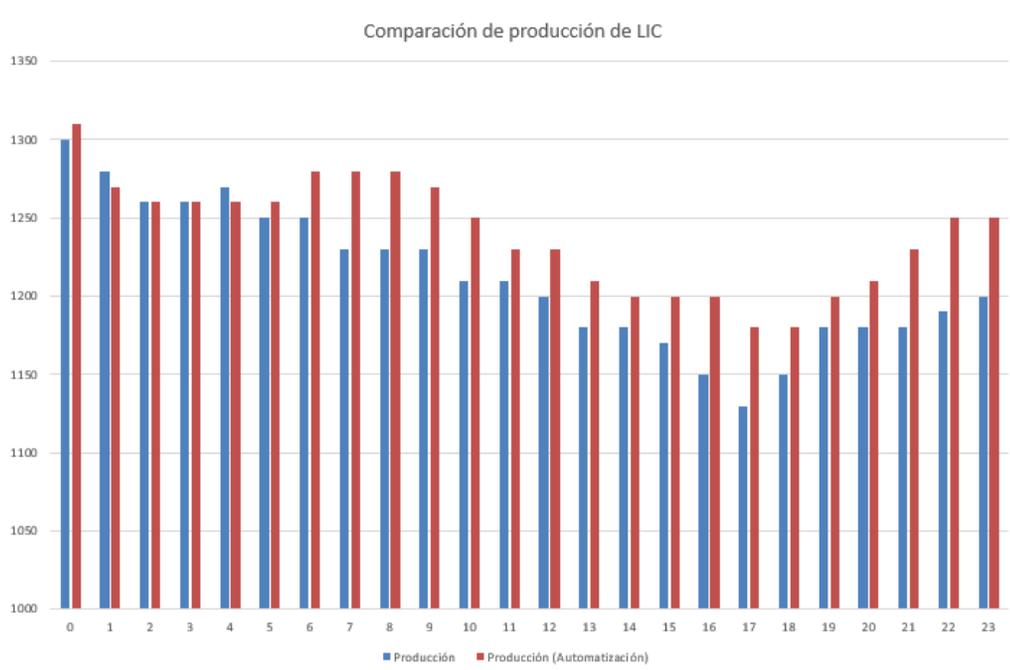
Se verifica que la implementación del intercambiador de calor CO2-agua en el proceso de deshumificación contribuyó a la disminución de temperatura de salida de CO2 en los deshumificadores de manera que es la condición necesaria para aumentar la producción de LIC disminuyendo el tiempo de licuefacción.

En la **Figura 123** se muestra la comparación de producción de LIC antes y después de la implementación del intercambiador de calor CO2-agua, los datos son tomados con las mismas condiciones climáticas y disposición de los equipos de producción de LIC.

Los datos fueron tomados de los reportes diarios de los técnicos operadores.

Figura 123

Producción cada hora de LIC



Se verifica que existe un aumento en la producción de LIC con la disminución de temperatura en la salida de CO₂ en los deshumificadores, el aumento en la producción es de aproximadamente $400 \frac{kg}{día}$, cabe recalcar que la producción variará dependiendo de las condiciones climáticas y de los equipos de producción LIC, en la actualidad la planta de producción LIC produce de 29 a 30.5 toneladas de CO₂ líquido.

Análisis Financiero

Se utilizará las herramientas del TIR y VAN para analizar el impacto económico del proyecto de la automatización del intercambiador de calor CO₂-agua.

En la **Tabla 35** se muestran los egresos e ingresos futuros con la implementación del presente proyecto. El análisis financiero del presente proyecto se realizó para un TIR del 18% y un tiempo de retorno de capital a 3 años.

Tabla 35

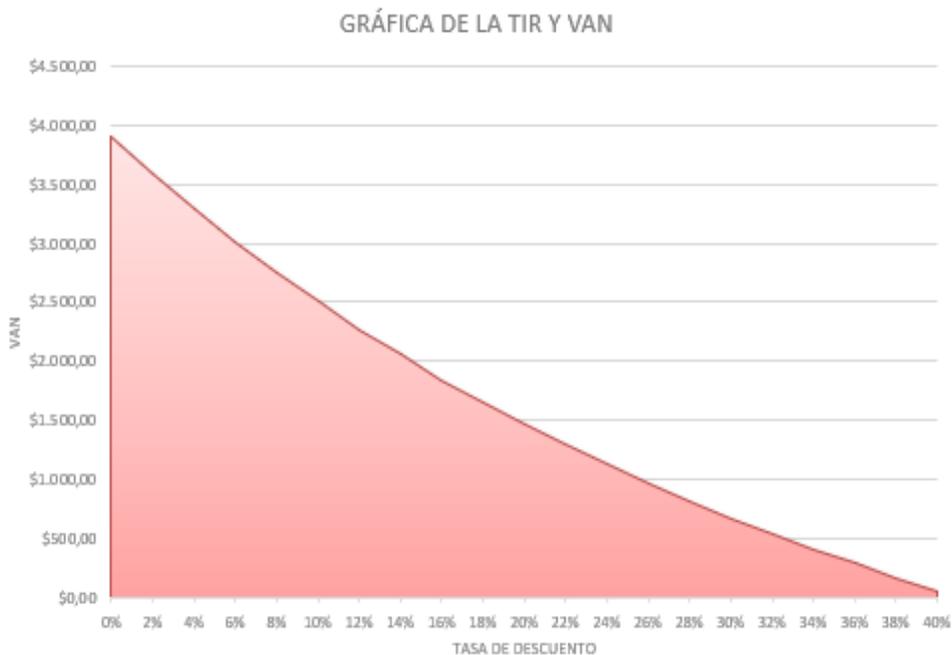
Análisis Financiero

Períodos	Inversión inicial	Ahorro estimado kWh	Ahorro económico USD	Flujo Neto	Período	$(1+i)^j$	$FN/(1+i)^j$
Año 0	7000	26.718,33	2.725,27	-4.274,73	-	-	-4.274,73
Año 1	0	26.718,33	2.725,27	2.725,27	1,00	1,18	2.309,55
Año 2	0	26.718,33	2.725,27	2.725,27	2,00	1,39	1.957,25
Año 3	0	26.718,33	2.725,27	2.725,27	3,00	1,64	1.658,68
						VAN	1.650,75

En la **Figura 124** se muestra la gráfica del TIR y VAN donde se comprueba que el proyecto es sustentable a un TIR de 18% y un tiempo de retorno de capital de 3 años.

Figura 124

Gráfica del VAN vs TIR



Capítulo VII

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

La implementación y diseño de la automatización del intercambiador de calor CO₂-agua en el proceso de deshumificación permitirá disminuir el consumo energético del compresor Larking en un promedio de 60 kWh/día.

Se empleó las mermas de CO₂ que anteriormente se enviaban al ambiente para enfriar el agua que ingresa a los deshumificadores por medio de un intercambiador de calor CO₂-agua.

La instrumentación y supervisión del proceso de deshumificación permitirá a los técnicos operadores de planta CO₂ conocer condiciones anormales dentro del proceso de deshumificación.

La implementación de la interfaz hombre máquina en el proceso de deshumificación se diseñó de forma que las ventanas sean amigables con el operador para su fácil control y monitoreo de las variables que intervienen en el proceso.

El control automático de temperatura en la salida de agua del intercambiador de calor CO₂-agua fue satisfactorio debido que las características de control (estabilidad y tiempo de estabilización) fueron apropiadas para el control de temperatura del agua en el proceso de deshumificación.

Se usó el protocolo de comunicación PROFINET para visualizar las señales de instrumentación en la HMI y enviar los parámetros de sets point de temperatura y presión desde la HMI al intercambiador de calor CO₂-agua para el control de temperatura del agua.

Se implementa protección eléctrica en la bomba de agua del proceso de deshumificación esto debido a que anteriormente el equipo carecía de protecciones contra sobrecorrientes y sobrecargas.

Recomendaciones

Se recomienda la instalación de una nueva bomba de agua como sistema redundante en el proceso de deshumificación por la importancia de este equipo en el proceso productivo.

Se recomienda desarrollar un plan de mantenimiento preventivo eléctrico y mecánico tanto para el tablero eléctrico instalado y los dispositivos del proceso de deshumificación.

Se recomienda la instalación de un sensor de nivel en el reservorio de agua del proceso de deshumificación para protección de la bomba de agua.

Se recomienda instalar aislante térmico en la tubería de agua para no ganar capacidad térmica por contacto indirecto del agua con el ambiente.

Se recomienda a los técnicos operadores examinar el manual de usuario para el correcto uso de la HMI del proceso de deshumificación.

Referencias

Aguilera, P. (2002). *Division de estudios de post-grado por: ing. patricia aguilera martinez san nicolas de los garza, n. l, junio de 2002.*

Aire, R. T. (2003). *Gama Industrial Gama Industrial.* 602–604.

Anzo, C. D. E., & Ingenier, T. E. D. E. (2001). *Instrumentación industrial.*

Arian control e instrumentación. (2011). Conexión de la Pt100. *ARIAN Control & Instrumentación, 4*, 1–6. <http://www.arian.cl>

Automation. (2021). *LZX:PT270615 SIEMENS Relé enchufable, 2 conmutados AC 115 ..*
<https://www.electricalautomationnetwork.com/es/siemens/lzx-pt270615-lzxpt270615-siemens-rele-de-clavijas-2-conmutadores-ac-115v>

Automation24. (2021a). *Automation24 – ¡Su distribuidor online para la automatización de procesos!* <https://www.automation24.es/>

Automation24. (2021b). *Siemens SM 1231 RTD - 6ES7231-5PD32-0XB0 | Automation24.*

<https://www.automation24.es/siemens-sm-1231-rtd-6es7231-5pd32-0xb0>

Automatización Industrial, Robótica e Industria 4.0, I. (2016). *Nuevo actuador giratorio de FESTO - infoPLC*. Nuevo Actuador Giratorio de FESTO.

<https://www.infopl.net/noticias/item/103361-nuevo-actuador-giratorio-de-festo>

AUTYCOM. (2021). *TIA Portal Vs SIMATIC Manager: ¿cuál es mejor? | AUTYCOM*.

<https://www.autycom.com/tia-portal-vs-simatic-manager/>

Configuración, P. L. C., Sm, M., & Comunicaci, M. T. C. P. (2014). *SIMATIC S7 Controlador programable S7-1200 Manual de sistema*.

Cooperates, S. A., Portal, T. I. A., & Basic, W. (2018). *Documentación didáctica / para cursos de formación*. 1–133.

Creus, A. (2010). *Instrumentación industrial*.

Cubre, F. (2019). *Posicionadores CMSX*.

Distribution, E. C. (2011). *SITRANS P200 (7MF1565). 200*.

Dosinda González-Mendizabal. (2002). *GUIA DE INTERCAMBIADORES DE CALOR : TIPOS*

GENERALES Y APLICACIONES Profesora Dosinda González-Mendizabal. *Universidad Simón Bolívar*, 67.

GR. (2021). *Caja de Mando SIEMENS SIRIUS ACT con un Pulsador tipo Hongo 40 mm 1 NC | Gonzaga & Rodriguez Cia. Ltda*. <https://electricoindustrial.com.ec/producto/caja-de-mando-siemens-sirius-act-con-un-pulsador-tipo-hongo-40-mm-1-nc/>

Industry Online Support Argentina, S. (2016). *¿Cómo se puede conectar un sensor PT100 al módulo analógico de ampliación AM2 PT10...* - ID: 23671451 - *Industry Support Siemens*.

<https://support.industry.siemens.com/cs/document/23671451/¿cómo-se-puede-conectar-un-sensor-pt100-al-módulo-analógico-de-ampliación-am2-pt10-o-am2-rtd-del-logo!-?dti=0&lc=es-AR>

- Industry online support international, S. (2013). *¿Cómo se pueden medir corrientes de 0-20mA en las entradas analógicas de una CPU d... - ID: 67396370 - Industry Support Siemens.*
- ¿Cómo Se Pueden Medir Corrientes de 0-20mA En Las Entradas Analógicas de Una CPU Del SIMATIC S7-1200 ? <https://support.industry.siemens.com/cs/document/67396370/¿cómo-se-pueden-medir-corrientes-de-0-20ma-en-las-entradas-analógicas-de-una-cpu-del-simatic-s7-1200-?dti=0&lc=es-WW>
- Industry online support international, S. (2018). *SITRANS TS500 - New process connection M20x1,5 - ID: 109755429 - Industry Support Siemens.*
- <https://support.industry.siemens.com/cs/document/109755429/sitrans-ts500-new-process-connection-m20x1-5?dti=0&lc=en-WW>
- Jaramillo, O. (2015). Intercambiadores De Calor. *Turbulence in Porous Media, 2007*, 7–11.
- Linde. (2015). *Un valioso producto con posibilidades únicas . 1*, 2–3.
- Llinares, J. B. A. C. G. G. B. Z. Z. A. G. M. D. M. C. A. G. (2015). Sensores De Temperatura: Sensores De Temperatura. *April 27, 2015*, 4–5.
- <http://snoresdetemperatura.blogspot.com/2009/05/sensores-de-temperatura.html>
- Nt, A. S. (2011). *Hoja de Datos Economizador . 7*.
- Ogata, K. (2010). Análisis y diseño de sistemas de control por el método del lugar de las raíces. In *Ingeniería de control moderna*. www.pearsoneducacion.com
- Panels, B., Paneles, S. H. M. I., & Panels, B. (2019). *Basic Panels 2nd Generation Paneles de operador Basic Panels 2nd Generation*. 1–136.
- PLCdesign. (2021). *PLC o DCS ¿Cuál es la mejor solución?* <http://plcdesign.xyz/plc-o-dcs/>
- Profinet, D. (2012). *PROFINET Descripción del sistema*. 1–314.
- Queralt, R. (2004). Instrumentación y control. *Tecnología Del Agua, 24(253)*, 5–8.
- Schneider Electric. (2010). 4 - Arranque y proteccion motores de CA. In *Guia de soluciones de*

automatizacion (p. 32).

Si, C. (2006). Product Data Sheet Product Data Sheet DEPMPO. *Radiation Curing*, 9(800), 1–2.

Siemens. (2019). *Configuración y aplicación de la función PROFINET I-Device - ID: 109478798 -*

Industry Support Siemens.

<https://support.industry.siemens.com/cs/document/109478798/configuración-y-aplicación-de-la-función-profinet-i-device?dti=0&lc=es-DO>

SIEMENS. (2019). Regulación PID. *S7-1200, S7-1500 Regulación PID.*

Standard, A. W. G. (2021). *Valores normalizados cables A.W.G.*

<https://www.electronica/tutoriales/Valores-normalizados-cables-AWG.html>

Th, S. (2006). *Sitrans Th200/Th300 Sitrans Th200/Th300 7Ng3211-1*N00/7Ng3212-0*N00.*

www.siemens.de/sitranst

Unamuno, A. D. S. (2018). Norma Ecuatoriana de la Construcción. *Opt.Med S.A.*, 25.

<https://www.habitatyvivienda.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2019/03/NEC-SB-IE-Final.pdf>

WATLOW. (2021). *Guía de comparación de sensores de temperatura | Watlow.*

<https://es.watlow.com/en/resources-and-support/engineering-tools/knowledge-base/temperature-sensors-comparison-guide>

Anexos

Anexo A: Manual de usuario

Anexo B: Características técnicas de los equipos utilizados