TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE APIZACO

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE ENFRIAMIENTO DE CIRCUITO CERRADO PARA COMPRESOR DE TORNILLO.

TITULACIÓN INTEGRAL INFORME DE RESIDENCIA PROFESIONAL.

PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERÍA MECATRONICA.

Presenta:

Ramon Morales Sosa

Asesor:

Dr. Vicente Flores Lara

Apizaco, Tlax., octubre 2025

Educación
Secretaría de Educación Pública

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Apizaco
Metal-Mecánica

Tzompantepec, Tlaxcala, 07/octubre/2025

Oficio No. MM-599/2025

Asunto: Liberación de Proyecto para Titulación Integral.

CECILIA YARELLY ARREGUIN LARA
JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS PROFESIONALES
P R E S E N T E

Por este medio informo que ha sido liberado el siguiente proyecto para Titulación integral:

Alumno (a):	RAMÓN MORALES SOSA
Carrera:	INGENIERÍA MECATRÓNICA
No. De Control:	19370785
Nombre del Proyecto:	"DESARROLLO DE UN SISTEMA DE ENFRIAMIENTO DE CIRCUITO CERRADO PARA COMPRESOR DE TORNILLO".
Producto:	TITULACIÓN INTEGRAL INFORME DE RESIDENCIA PROFESIONAL.

Agradezco de antemano su valioso apoyo en esta importante actividad para la formación profesional de nuestros egresados.

A T E N T A M E N T E
Excelencia en Educación Tecnológica®
Pensar para Servir, Servir para Triunfar®

JORGE AGUILAR VÁZQUEZ
JEFE DEL DEPTO. DE METAL-MECÁNICA

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA
TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
TECNOLÓGICO DE APIZACO
DEPARTAMENTO DE METAL MECÁNICA

VICENTE FLORES LARA
ASESOR

c.p.- Archivo.

2025 Año de La Mujer Indígena

ESPACIO 100% LIBRE DE PLÁSTICO

Educación
Secretaría de Educación Pública

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Apizaco
División de Estudios Profesionales

Tzompantepec, Tlaxcala 08/octubre/2025

MORALES SOSA RAMON
EGRESADO(A) DE LA CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA
CON NÚMERO DE CONTROL 19370785.
P R E S E N T E.

Por este medio, me permito informar a usted que por aprobación de la comisión revisora asignada para valorar el trabajo que mediante la opción **TITULACIÓN INTEGRAL INFORME DE RESIDENCIA PROFESIONAL** y cuyo tema es: **DESARROLLO DE UN SISTEMA DE ENFRIAMIENTO DE CIRCUITO CERRADO PARA COMPRESOR DE TORNILLO,** conforme a lo establecido en el procedimiento para la obtención del Título Profesional en el Instituto Tecnológico, la División de Estudios Profesionales a mi cargo le otorga la:

AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

Debiendo entregar **2 USB** del mismo, apropiadamente empastados, a la brevedad, para presentar su Acto de Recepción Profesional.

Sin otro particular por el momento me despido.

A T E N T A M E N T E
Excelencia en Educación Tecnológica®
Pensar para Servir, Servir para Triunfar®

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA
TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE APIZACO
DIVISIÓN DE ESTUDIOS PROFESIONALES

CECILIA YARELLY ARREGUÍN LARA
JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS PROFESIONALES

ccp. Archivo

CYAL/rrc

Agradecimientos.

Quisiera expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que contribuyeron al éxito de este proyecto de residencias profesionales. En primer lugar, agradezco a mi asesor externo, el ing. Israel Delgado Sánchez, por su orientación experta, paciencia y apoyo constante a lo largo de este proceso. Su dedicación y conocimientos fueron fundamentales para el desarrollo de este trabajo.

También deseo agradecer a mi familia por su amor incondicional, comprensión y motivación durante los momentos de desafío. Además, quiero reconocer el invaluable aporte de mi asesor interno, el ing. Vicente Flores Lara, por sus ideas innovadoras y su colaboración.

Por último, pero no menos importante, agradezco a todas las personas que participaron y me apoyaron en el desarrollo del proyecto, cuya generosidad y disposición para compartir sus experiencias y conocimientos fueron esenciales para la realización de este proyecto. Estoy agradecido por el impacto positivo que he tenido trabajando en este proyecto y por las experiencias, aprendizajes y en general vivencias que afectaron de forma positiva en mi vida académica y profesional.

Índice.

Agradecimientos. 1

Índice. 2

Resumen. 5

Introducción. 6

Problemas para resolver. 7

Objetivos 9

Objetivo General 9

Objetivos Específicos. 9

Justificación. 10

Marco teórico (fundamentos teóricos). 11

Procedimiento y descripción de las actividades realizadas. 14

Resultados 16

- Requisitos de enfriamiento a cumplir con respecto al sistema. 16
- Métodos gráficos para el cálculo y determinación del caudal para suministrar agua al Compresor 17
- Capacidad de refrigeración. 21
- Comparación de posibles sistemas de enfriamiento a usar. 24
- Especificaciones del sistema de enfriamiento a cumplir. 27
- Compatibilidad con el compresor: 27

- Automatización del sistema. 30
- Pre a la instalación 32

Instalación del sistema eléctrico de potencia. 34

Instalación del sistema eléctrico de control. 37

- Diagrama del circuito de potencia de la alimentación del chiller. 40

Cálculo de amperaje máximo para la alimentación de chiller. 42

Calculo para el calibre del cable conductor. 43

Calculo para el amperaje de termomagnético. 45

Cálculo para el amperaje en el contactor. 46

Calculo para el amperaje del relé térmico. 46

- Diagrama esquemático del tablero de Potencia del chiller. 46
- Diagrama esquemático del tablero de control del chiller. 48
- Instalación de gabinetes. 50
- Listado de materiales. 51
- Relación costo beneficio 55

Costos del proyecto: 55

Beneficios del proyecto. 56

Conclusiones 58

Competencias desarrolladas y/o aplicadas. 59

Referencias bibliográficas 60

Resumen.

El proyecto consistió en el desarrollo de un sistema de enfriamiento de circuito cerrado para un compresor de tornillo. El objetivo principal era mejorar la eficiencia operativa del compresor, eliminar los minerales que provocan incrustación y a su vez reducir la carga térmica del enfriador de aire (chiller) puesto que al tener una carga térmica elevada el aire con mayor temperatura afecta directamente la fase de producción de pre-purificación.

Inicialmente, se realizó un análisis de las condiciones de operación del compresor y se identificaron las limitaciones y desafíos asociados con el sistema de enfriamiento existente. Se determinó que este enfoque presentaba problemas de eficiencia.

Con base en este análisis, se optó por desarrollar un sistema de enfriamiento de circuito cerrado que proporcionara un control más preciso de la temperatura, nula contaminación externa en el sistema y un bajo consumo de agua. Se seleccionaron cuidadosamente los componentes del sistema, incluidos el chiller enfriador de agua, válvulas de control de flujo, sensores de temperatura y sistemas de control.

Una vez diseñado el sistema, se procedió al análisis de costo beneficio el cual se concluye que si este proyecto se lleva a cabo el control de temperatura será más preciso, lo que mejorará el proceso de enfriamiento de aire que va del chiller enfriador de aire hacia las camas pre purificadoras (PPU's), además de disminuir la carga de trabajo de este y de prolongar su vida útil mediante un control preciso de la temperatura de funcionamiento del compresor.

En conclusión, el proyecto de desarrollo de un sistema de enfriamiento de circuito cerrado para un compresor de tornillo se plantea como un éxito, puesto que mejorará la eficiencia operativa y la fiabilidad de los equipos.

Introducción.

En el ámbito industrial, la eficiencia y el rendimiento óptimo de los equipos son aspectos cruciales para garantizar la productividad y la rentabilidad. En el contexto de la planta Gases Industriales de América S.A de C.V., el compresor de tornillo desempeña un papel fundamental en la producción final de líquido argón.

Uno de los principales desafíos que enfrenta es el control de la temperatura y dureza del agua durante su funcionamiento, ya que el sobrecalentamiento puede afectar negativamente su rendimiento y vida útil. Para abordar este desafío, surge la necesidad de elegir sistemas de enfriamiento eficientes y confiables que mantengan una temperatura óptima de funcionamiento y para ello se automatizará el sistema, puesto que es necesario estar cambiando los parámetros de enfriamiento respecto a la temperatura que se presenta en las distintas horas del día y las distintas épocas del año. Por lo tanto, a lo largo de este proyecto, se explorarán diferentes metodologías de enfriamiento, se diseñarán componentes clave del sistema y se llevarán a cabo pruebas para garantizar su eficacia y fiabilidad en diversas condiciones operativas.

La elección exitosa de un sistema de enfriamiento de circuito cerrado para el compresor de tornillo no solo mejorará su rendimiento y vida útil, sino que también contribuirá a la sostenibilidad ambiental al reducir el consumo de energía y minimizar los residuos de refrigerante. En última instancia, este proyecto busca ofrecer soluciones innovadoras que impulsen la eficiencia y la competitividad en el sector industrial.

Problemas para resolver.

La principal problemática por resolver en este proyecto es disminuir la carga de trabajo en el enfriador de aire principal (chiller), puesto que éste está conectado a un sistema de agua de enfriamiento de circuito cerrado (enfriado por el chiller), el cual es el que actualmente enfría el agua de refrigeración del compresor de tornillo, aumentando la carga de trabajo y disminuyendo su efectividad. Por lo tanto, deberá separarse el sistema de enfriamiento del compresor del enfriador principal. De este modo, aumentará su efectividad de enfriamiento de este último y disminuirá el consumo de energía, dando como resultado un mejor enfriamiento del aire de proceso antes de pasar a las unidades pre-purificadoras aumentando su eficiencia de modo que el tiempo de saturación será más largo. .

En segundo plano, las problemáticas a resolver del proyecto serán:
Requisitos de enfriamiento: Determinar los requisitos específicos de enfriamiento del compresor en términos de temperatura máxima de operación, carga de trabajo y cualquier requisito de temperatura ambiente.

Tipo de sistema de enfriamiento: Evaluar diferentes tipos de sistemas de enfriamiento, como enfriamiento de circuito cerrado, enfriamiento por circuito abierto o sistemas híbridos, para determinar cuál es más adecuado para las condiciones de operación y las necesidades del compresor.

Eficiencia energética: Analizar la eficiencia energética de los diferentes sistemas de enfriamiento y seleccionar aquel que ofrezca el mejor equilibrio entre rendimiento y consumo de energía.

Disponibilidad de recursos: Considerar la disponibilidad de recursos como agua, electricidad, espacio y acceso para la instalación del sistema de enfriamiento.

Costos: Evaluar los costos asociados con la compra, instalación, operación y mantenimiento de cada sistema de enfriamiento para determinar cuál ofrece la mejor relación costo-beneficio a largo plazo.

Requisitos de mantenimiento: Evaluar los requisitos de mantenimiento de cada sistema de enfriamiento y considerar la disponibilidad de mano de obra y repuestos necesarios para garantizar un mantenimiento adecuado.

Compatibilidad con el compresor: Asegurarse de que el sistema de enfriamiento seleccionado sea compatible con el diseño y las especificaciones del compresor de tornillo para garantizar un rendimiento óptimo y prolongar la vida útil del equipo.

Objetivos

Objetivo General

Diseñar un sistema de circuito cerrado destinado al compresor de tornillo, teniendo en cuenta las variables operativas y la relación costo-beneficio, con el objetivo de prevenir la formación de incrustaciones o bloqueos en el intercambiador de calor y mejorar la eficiencia operativa.

Objetivos Específicos.

- Analizar los requisitos técnicos y operacionales del sistema.
- Realizar un análisis de las condiciones operacionales.
- Realizar los cálculos correspondientes para la selección del sistema de enfriamiento más idóneo para el compresor (Kaeser).
- Diseñar el sistema de circuito cerrado.
- Automatización del sistema.
- Planificar la instalación del sistema.
- Elaboración de la relación costo-beneficio.

Justificación.

Actualmente, el sistema que enfría al compresor de tornillo (CP-41) es una extensión del chiller que refrigera el aire, diseñado originalmente para el flujo principal según lo demande el compresor CP-11, y comparte refrigeración con un sistema de circuito cerrado de agua de ósmosis secundario al chiller. Por lo tanto, al conectar el compresor de tornillo a este sistema, el intercambio de temperatura llevado a cabo en el proceso aumenta la pérdida de aprovechamiento de refrigeración, mermando entre 5°C y 7°C. Esto reduce la eficiencia del chiller y eleva la temperatura final de enfriamiento del aire, lo que ocasiona problemas en el proceso principal, específicamente durante el ciclo de enfriamiento de las camas pre-purificadoras (PPU's). Por ello, se planteó tener un sistema de enfriamiento exclusivo para el compresor CP-41, ayudando a recuperar la eficiencia de los equipos y obtener un control más preciso de la temperatura del agua refrigerante, reduciendo la carga térmica del chiller.

Marco teórico (fundamentos teóricos).

El desarrollo y selección de un sistema de enfriamiento de circuito cerrado para un compresor de tornillo implica una comprensión de los principios de funcionamiento del compresor y los fundamentos de la refrigeración. En este caso, el compresor de tornillo es una pieza vital en la producción de argón, por lo cual es un punto crítico y, en caso de un sobrecalentamiento, este puede reducir su fiabilidad y vida útil. Por ello, para garantizar un rendimiento óptimo y una larga vida útil, es crucial mantener una temperatura de funcionamiento adecuada, lo que subraya la necesidad de un sistema de enfriamiento eficiente y confiable. Además de mejorar el control de temperatura en el chiller de enfriamiento de aire y tener temperaturas de aire más bajas con una menor carga de trabajo.

En esta parte del marco teórico se mostrará la ecuación dominante del proyecto, la cual dicta la necesidad del intercambio de calor llevado a cabo en el intercambiador del compresor, además de las ecuaciones secundarias que son necesarias para obtener datos para poder resolver la ecuación principal. Todo esto con el fin de seleccionar el mejor sistema de refrigeración.

La ecuación que rige todo el proyecto es la del intercambio de calor, la cual se describe de la siguiente forma:

$$Q_c = \dot{m}(cp)(\Delta T)$$

Además, también necesitaremos calcular el flujo másico y el caudal, por lo cual necesitaremos las siguientes ecuaciones.

$$Flujo\ másico\ = V \times A \times \rho$$

$$Q = V.A$$

Además, también se mostrarán los conceptos principales con el fin de comprender los temas que se abordan con respecto al sistema y consideraciones de diseño, operación y mantenimiento, los cuales son los siguientes:

Compresores de tornillo: Los compresores de tornillo utilizan movimientos rotativos para comprimir el aire. Dentro del compresor, hay un conjunto de rotores macho y hembra. Están diseñados de forma diferente para que, al girar al unísono, el aire quede atrapado entre ellos.

Necesidad de enfriamiento: Los compresores de tornillo requieren sistemas de enfriamiento para enfriar el gas y el aceite que internamente les ayuda a hacer el sello y el proceso de lubricación, lo cual es indispensable para mantener su rendimiento y prolongar su vida útil.

Circuito cerrado vs. circuito abierto:

Sistema de circuito abierto: Un sistema refrigerante abierto puede ser un circuito refrigerante con torres refrigerantes abiertas para enfriamiento por evaporación. Como una parte del agua refrigerante se evapora, se debe reponer con regularidad. Durante la evaporación, el contenido material del agua refrigerante se concentra y el contacto con el aire ambiente puede contaminar dicha agua. Cuando reabastezca con agua refrigerante, usted debe asegurarse de que ésta cumpla con los mínimos requerimientos exigidos.

Sistema de refrigerante cerrado: En un sistema refrigerante donde el agua refrigerante no ha estado en contacto con la atmósfera. Por ello, no puede estar contaminada por la atmósfera o enriquecida con oxígeno u otros elementos contaminantes.

Transferencia de calor: Es un proceso de propagación del calor de un sitio a otro, produciéndose cuando hay un gradiente térmico de temperaturas.

Intercambiadores de calor: Es un equipo de proceso diseñado para transferir calor entre dos fluidos (líquido, vapor, gas) o entre la superficie de un sólido y un fluido en movimiento.

Bomba de circulación: La bomba de circulación de un sistema es la encargada de asegurar un flujo constante de fluido, en este caso refrigerante, a través del circuito cerrado.

Tanque de almacenamiento: La función del tanque de almacenamiento es la regulación del volumen de fluido refrigerante, la gestión de la presión en el sistema, así como el reservorio de fluido.

Fluidos refrigerantes: Un fluido refrigerante (o simplemente un refrigerante) puede ser un líquido o un gas, que ejerce una función de transmisión de calor de un sistema a otro.

Dimensionamiento del sistema: En este caso, es la metodología para determinar las capacidades de enfriamiento requeridas y el tamaño adecuado de los componentes del sistema de acuerdo con el espacio disponible.

Eficiencia energética: Es la capacidad para obtener los mejores resultados en cualquier actividad empleando la menor cantidad posible de recursos energéticos. Esto incluye estrategias para optimizar la eficiencia energética del sistema de enfriamiento, como la implementación de controles automatizados.

Procedimiento y descripción de las actividades realizadas.

Lo primero a realizar durante el período en que se realizará el proyecto es la obtención de la información de condiciones idóneas de enfriamiento para el compresor. Esto se realizará en base al manual de usuario y a tomas de datos en campo, puesto que se tienen que tomar en cuenta las diversas condiciones medioambientales del sitio, principalmente de temperatura, donde se pretende instalar.

Posteriormente, se tienen que investigar cuáles son las condiciones idóneas para el agua de refrigeración y qué características cuantitativas debe cumplir para ser introducida al sistema, tanto del compresor como del sistema refrigerante de agua.

También se tiene que seleccionar posibles sistemas de enfriamiento de circuito cerrado idóneos para el compresor. A partir de esa selección, elegir el que más se adapte al compresor para su posterior instalación, realizando un descarte de opciones mediante una comparativa de ventajas, desventajas y costos.

Una vez seleccionado el tipo de sistema refrigerante, se realizarán los cálculos pertinentes para seleccionar la capacidad de refrigeración de acuerdo con las condiciones de operación del equipo.

Después de seleccionar el tipo de refrigeración de líquidos, se procederá a realizar el diseño del sistema, tomando en cuenta las condiciones de campo, así como el presupuesto y las condiciones técnicas a cumplir, las cuales son las siguientes:

- Sistema refrigerante cerrado.
- Sistema refrigerante de flujo constante.
- Enfriamiento por agua (intercambiador de calor de placas).

- Calidad del agua refrigerante óptima para evitar incrustaciones.
- Condiciones ambientales óptimas.
- Se debe usar un intercambiador de calor especial para calentar agua potable.
- Automatización del sistema con PLC.

Por último, debemos asegurar el ajuste del sistema para asegurar una refrigeración adecuada para la temperatura cambiante del día. Además, realizar una estimación del costo general del proyecto y en qué va a beneficiar.

Resultados

- **Requisitos de enfriamiento a cumplir con respecto al sistema.**

El sistema de enfriamiento del compresor tiene ciertas características que se deben cumplir para su optimo funcionamiento, las cuales están dados por el fabricante, descritas en el manual de usuario por lo que a partir de esa información se elegirá la unidad o sistema más adecuado para las necesidades del compresor.

Las especificaciones para cumplir son las siguientes:

Para el modelo de compresor de tornillo rotativo CSD 100S de Kaeser contamos con dos opciones para el enfriamiento liquido las cuales son las siguientes:

- Opción K2: Enfriamiento por agua con intercambiador de calor de lámina.
- Opción K9: Enfriamiento por agua con intercambiador de calor tubular.

Al revisar el equipo instalado en planta, se puede comprobar que el intercambiador de calor es de tipo lamina (K2), por lo cual el equipo que se encargará de la refrigeración se deberá adaptar a los siguientes parámetros sacados del manual de usuario:

Tabla 1: Especificación de los componentes del intercambiador de calor.

Característica	**Valor**
Material (Intercambiador de calor)	1.4401
Bronce (intercambiador de calor)	Cobre (Cu)
Máxima presión de trabajo (kPa)	999.74
Mínima temperatura de admisión permitida [°C]	4.4
Máxima temperatura de admisión permitida [°C]	40.5

Tabla 2: Temperaturas y flujos máximas permitidos del sistema refrigerante.

Característica	Valor
Máxima temperatura final permitida [°C]	48.8
máxima temperatura final permitida [°C] (Valor límite del componente)	71.11
Máximo flujo nominal permitido $[M^3/S]$	0.00252
Medio refrigerante inadecuado	Agua de mar

Tabla 3: Datos del sistema refrigerante.

Característica	Valor
Máxima temperatura de admisión permitida [°C]	29.4
Flujo nominal $[M^3/S]$	0.00133
Caída de presión [kPa]	99.97

- ## Métodos gráficos para el cálculo y determinación del caudal para suministrar agua al Compresor

Teniendo en cuenta las especificaciones de trabajo, características, presiones máximas, presiones mínimas y caudales del intercambiador podremos calcular un caudal y presión adecuados para el equipó, así como un sistema adecuado para este.

Caudal.

El manual de usuario nos dice que el máximo flujo nominal permitido es de 0.00252 M^3/S como podemos observar la tabla 2 pero el flujo nominal es de 0.00133 M^3/S por lo que el cálculo del caudal se realizará con el flujo nominal teniendo como valor máximo 0.00252 M^3/S y un mínimo de 0.00114 M^3/S (flujo adecuado).

Presión.

La presión máxima de trabajo que puede soportar el sistema es de 999.74 kPa, pero en este caso es para operaciones especiales puesto que a tan alta presión el agua refrigerante pasa demasiado rápido por los conductos por lo que no le da el tiempo sufriente de hacer un intercambio de calor

apropiado por lo que en este caso consideraremos una presión de trabajo normal de 103.4 kPa. A 137.8 kPa.

Actualmente el equipo se encuentra trabajando de forma correcta por lo que revisando la presión de entrada al equipo podemos notar que se encuentra trabajando a ***20 psi o 137 .8 kPa como se muestra en la Figura 1, por lo cual tomaremos esa presión de trabajo como referencia.***



Figura 1: Presión de entrada de agua refrigerante.

Temperatura.

Según el manual de usuario la temperatura mínima de admisión del agua refrigerante debe de ser de 4.4 °C, la máxima temperatura de admisión permitida es de 40.5°C como se muestra en la tabla 1 (Especificaciones del intercambiador de calor enfriamiento por agua) y la máxima temperatura final permitida es de 49°C por lo que debemos respetar los parámetros anteriormente mencionados.

Con respecto al manual de usuario nos indica que como máximo debe tener un ΔT máximo 36°C según como se muestra en la tabla 1 puesto que si supera ese valor es indicio de que el valor mínimo de temperatura de admisión o el valor máximo de temperatura de salida está superando los límites del buen funcionamiento lo que significaría que el intercambiador de calor no funciona de forma correcta.

Actualmente el equipo se encuentra trabajando con normalidad y con temperaturas de admisión y temperaturas finales aceptables como se muestra en las siguientes imágenes:



Figura 2: Temperatura de admisión.



Figuera 3: Temperatura final.

El agua refrigerante trabaja en rangos de temperatura de admisión de 9°C a 13°C y salida de 19°C a 24° C (De las 13 a 14 horas del día) normalmente un ΔT de 10°C a 15°C en este equipo es indicativo de un buen funcionamiento según lo observado a través del tiempo de operación y con respecto al máximo ΔT.

Por lo una en todos los días observados el equipo mantuvo un buen comportamiento como se muestra a continuación en la tabla de temperatura:

Tabla 4: Tabla de temperaturas de admisión y salida.

Dia:	T in	T out	ΔT	Estado del compresor
Lunes	12.8	22.3	9.5	Bueno
Martes	13.5	24.3	10.8	Bueno
Miércoles	14.6	27.5	12.9	Bueno
Jueves	14.3	26	11.7	Bueno
Viernes	12.9	24.5	11.6	Bueno
Sábado	15.5	26.5	11	Bueno

Tabla 5: Promedio de ΔT.

ΔT	9.5	10.8	12.9	11.7	11.6	11	**Promedio: 11.2**

- **Capacidad de refrigeración.**

Para obtener la capacidad de refrigeración debemos calcular el calor que absorbe la corriente de agua fría la cual está dada por:

$$Q_c = \dot{m}(cp)(\Delta T) \dots\dots\dots\dots (E1)$$

Donde:

$Q_c =$ calor intercambiado.

$\dot{m} = flujo\ másico.$

$cp = el\ calor\ específico\ del\ fluido.$

$\Delta T =$ Diferencia de temperatura entre entrada y salida del sistema.

Para poder obtener el intercambio de calor primero es obtener el flujo masico, calor especifico del agua refrigerante u la diferencia de temperatura del sistema.

Cálculo del flujo masico.

$$Flujo\ másico\ = V \times A \times \rho \dots\dots\dots\dots (E2)$$

Donde:

$V = Velocidad\ del\ fluido.$

$A = Area\ de\ la\ seccion.$

$\rho = Densidad\ del\ fluido.$

No tenemos la velocidad del agua por ello la vamos a calcular con la formula del caudal la cual es la siguiente:

$$Q = V.A \dots\dots\dots\dots (E3)$$

Donde:

$Q = Caudal.$

$V = Velocidad\ de\ fluido.$

$A = Area\ de\ seccion\ de\ la\ tuveria.$

Datos:

$Q = 18.1\ GPM = 0.001141\ m^3/s$

$V =?$

$A = 0.000791\ m_2$

Despejando la formula:

$$V = \frac{Q}{A} \dots\dots\dots\dots (E4)$$

Sustituyendo valores con los datos:

$$V = \frac{0.001141\ m^3/s}{0.000791\ m_2}$$

$$\underline{V = 1.44\ m/s}$$

Densidad del agua.

La temperatura del líquido refrigerante durante el día se encuentra en un intervalo aproximado 10°C a 20°C como se demostró en la tabla 4 por lo que vamos a tomar la menor temperatura puesto que es el punto donde el agua se encuentra a mayor densidad.

Temperatura		Densidad		Temperatura		Densidad	
K°	C	g/cm³	kg/m³	K	°C	g/cm³	kg/m³
273.15	0	0.99987	999.87	323.15	50	0.98807	988.07
277.15	4	1.00000	1000.00	333.15	60	0.98324	983.24
283.15	10	0.99973	999.73	343.15	70	0.97781	977.81
293.15	20	0.99823	998.23	353.15	80	0.97183	971.83
298.15	25	0.99708	997.08	363.15	90	0.96534	965.34
303.15	30	0.99568	995.68	373.15	100	0.95838	958.38
313.15	40	0.99225	992.25				

Figura 4: Densidad de agua líquida (R. H. Perry y C. H. Chiton, 1973).

Teniendo en cuenta la temperatura del agua está en un intervalo de 10°C a 20°C su densidad sería de unos 999.7 kg/m3.

Una vez teniendo todos los datos para el cálculo del flujo masico sustituimos los valores en la fórmula E2:

$$Flujo\ másico\ = \left(1.44 \frac{m}{s}\right) \times (0.000791\ m_2)\ \times (999.7\ \text{kg/m3})$$

$$\underline{Flujo\ másico\ = 1.138\ Kg/s}$$

Cálculo del calor especifico del refrigerante.

El calor específico o capacidad térmica específica. Se trata de una propiedad de las sustancias relacionada con la cantidad de energía necesaria para aumentar su temperatura. El agua tiene una capacidad calorífica específica muy alta, por lo que para aumentar su temperatura necesita absorber mucho calor por unidad de masa.

"En condiciones normales 1 kilogramo de agua necesita 1 kilocaloría para que su temperatura aumente 1ºC, es decir, 1 kcal/°C·kg. Esta cifra equivale a *4186 julios/gramo en el sistema internacional***.**" (Fundación Aquae, 2021).

Diferencia de temperatura entre entrada y salida del sistema.

La temperatura de admisión es de 12.8 °C y de salida es de 22.3 por lo que nos da un $\Delta T\ de\ 9.5$

Una vez obtenidos todos los datos necesarios para calcular el intercambio de calor sustituimos en la formula E1:

$$Q_c = \dot{m}(cp)(\Delta T) \dots\dots\dots\dots (E1)$$

$$Q_c = 1.138\ Kg/s \left(4.186 \frac{Kj}{Kg} °C\right)(11.2\ °C)$$

$$Q_c = 53.353\ Kj/s$$

$$\boldsymbol{Q_c = 53.353\ KW}$$

Tenemos que para refrigerar el sistema del compresor debemos tener un mínimo de 53,353 W o lo que es igual a 181,933.73 BTU/H o 15 toneladas/h

- ## Comparación de posibles sistemas de enfriamiento a usar.

Antes que nada, la definición de un equipo de refrigeración es la siguiente: "Los equipos de refrigeración industrial son máquinas o dispositivos especialmente diseñados para disminuir la temperatura de un fluido, lo cual se logra mediante un intercambio calorífico que se alcanza gracias a la acción de un líquido refrigerante" (Neoattack, 2023).

Teniendo en cuenta la definición anterior podemos elegir los sistemas que más se adecuen al equipo y para ello se tomó en cuenta la capacidad de enfriamiento, costos, instalación, elementos complementarios y especificaciones técnicas a cumplir del equipo.

Las opciones más viables son las siguientes:

Torre de refrigeración cerrada.

Las torres de enfriamiento se utilizan en procesos industriales para disminuir la temperatura del agua en grandes volúmenes. La temperatura del agua al salir de la torre estará por encima de la del bulbo húmedo. Este tipo de sistema de enfriamiento es eficiente en el uso de energía eléctrica y no es nocivo para el medio ambiente. Las torres de enfriamiento pueden enfriar el agua de manera directa o indirecta; en el método directo el agua tan solo realiza su recorrido dentro de la torre y,

en el método indirecto, hay un intercambiador de calor en el exterior de la torre que es el que realiza la transferencia de calor entre el líquido del proceso industrial y el agua de la torre

Chiller.

Un sistema de agua helada consiste en utilizar agua como medio de transferencia de calor. El agua es distribuida por una red de tuberías, los cuales utilizan el agua helada para retirar calor y humedad del espacio a acondicionar. El agua es enfriada por un chiller (enfriador de agua) el cual se basa en el ciclo de refrigeración convencional, contando con un compresor, condensador y evaporador.

Ahora compararemos la ventajes y desventajas de los sistemas.

Tabla 6: Comparativa torre de refrigeración y chiller

Torre de refrigeración cerrada.		**Chiller**	
Ventajas	**Desventajas**	**Ventajas**	**Desventajas**
Puede enfriar agua en grandes cantidades	Las torres de enfriamiento cerradas suelen ser más caras.	Pueden reemplazar los sistemas de refrigerante variable.	Son sistemas costosos
El agua no necesita descargarse para enfriarse	El mantenimiento es más costoso.	Eficiencia energética: son conocidos por su eficiencia energética.	Tienen un sistema hidráulico complejo
Enfriamiento de circulación de agua blanda	En zonas gélidas el refrigerante puede causar grietas locales por congelación del enfriador.	Control preciso de la temperatura: ofrecen un control preciso de la temperatura del fluido	Precio del equipo más instalación ≤$200,000 pesos mexicanos

Pequeña huella, no es necesario cavar una piscina.	Precio del equipo más instalación > $200,000 pesos mexicanos	Versatilidad: son versátiles y pueden adaptarse a una amplia gama de aplicaciones.	
Puede enfriar directamente agua, aceite, alcohol, líquido de enfriamiento.		Fiabilidad: Los chiller's suelen estar diseñados para funcionar de manera confiable durante largos períodos de tiempo	
		Mantenimiento sencillo: A pesar de su sofisticada tecnología, los chillers suelen ser fáciles de mantener.	

En este caso el sistema de enfriamiento elegido será un sistema cerrado puesto que un sistema de circuito cerrado protege la calidad del fluido del proceso, reduce el mantenimiento del sistema y proporciona flexibilidad, mejor regulación precisa de la temperatura, consumo reducido de agua y

la disminución del impacto ambiental puesto que se ahorrarían en costes de tratamiento de aguas residuales.

Por lo anterior mencionado y presentado en la tabla comparativa el sistema más adecuado para el enfriamiento del compreso y más económico es el chiller

- **Especificaciones del sistema de enfriamiento a cumplir.**

Para la elección del chiller se tomaron 3 principales factores que son:

- Caudal
- Presión
- Temperatura
- Capacidad de refrigeración

El Caudal debe de ser de QT= 102.63 LPM

La Presión con la que se encuentra trabajando el equipo es de 137.8 psi por lo cual tomaremos esa presión de trabajo como referencia.

Temperatura Según los datos obtenidos la temperatura de entrada de agua debe de ser de 9 a 10°c con una diferencia de 10°C a la salida por lo cual buscaremos un equipo de agua helada que sea capaz de darnos esa salida y esa capacidad de refrigeración.

Tenemos que para refrigerar el sistema del compresor debemos tener un mínimo de 53,353 W o lo que es igual a 181,933.73 BTU/H o 15 toneladas/h.

- **Compatibilidad con el compresor:**

Según los factores anteriores elegimos la mejor opción para la refrigeración del compresor es el chiller CW-8000FNTY, CA 3P 460 V 60 Hz del cual tenemos la siguiente ficha técnica:

Tabla 7: FICHA TECNICA CHILLER CW

Característica	Valor
Modelo	CW-8000FNTY

Voltaje	CA 3P 460V
Frecuencia	60Hz
Actual	8,1~38,2 A
Máx. el consumo de energía	21,12kW
Potencia del compresor	11,2kW
	15.01HP
Capacidad de refrigeración nominal	143304Btu/h
	42kW
	36111Kcal/hora
Refrigerante	R-410ª
Precisión	±1℃
Reductor	Capilar
Potencia de la bomba	3kW
Capacidad del tanque	210L
Entrada y salida	Rp1-1/2"
Máx. presión de la bomba	5,8 bar
Máx. flujo de la bomba	200L/minuto
G.W.	513 kilos
Dimensión	190X108X140cm (largo x ancho x alto)
Dimensión del paquete	202X123X162cm (largo x ancho x alto)

Características adiciónales del producto.

- Capacidad de enfriamiento: 42000W o 143,304 BTU/h
- Enfriamiento activo.
- Estabilidad de temperatura: ±1°C.
- Rango de control de temperatura: 5°C ~35°C.
- Refrigerante: R-410a.
- Control inteligente de temperatura.
- Funciones múltiples de alarma.
- Alta fiabilidad, eficiencia energética y durabilidad.
- Fácil mantenimiento y movilidad.
- Disponible en 460V

Según lo presentado anteriormente el chiller CW-8000FNTY se adapta bien a las necesidades del compresor por lo cual es un producto que puede instalarse en planta.

- **Lógica del sistema**

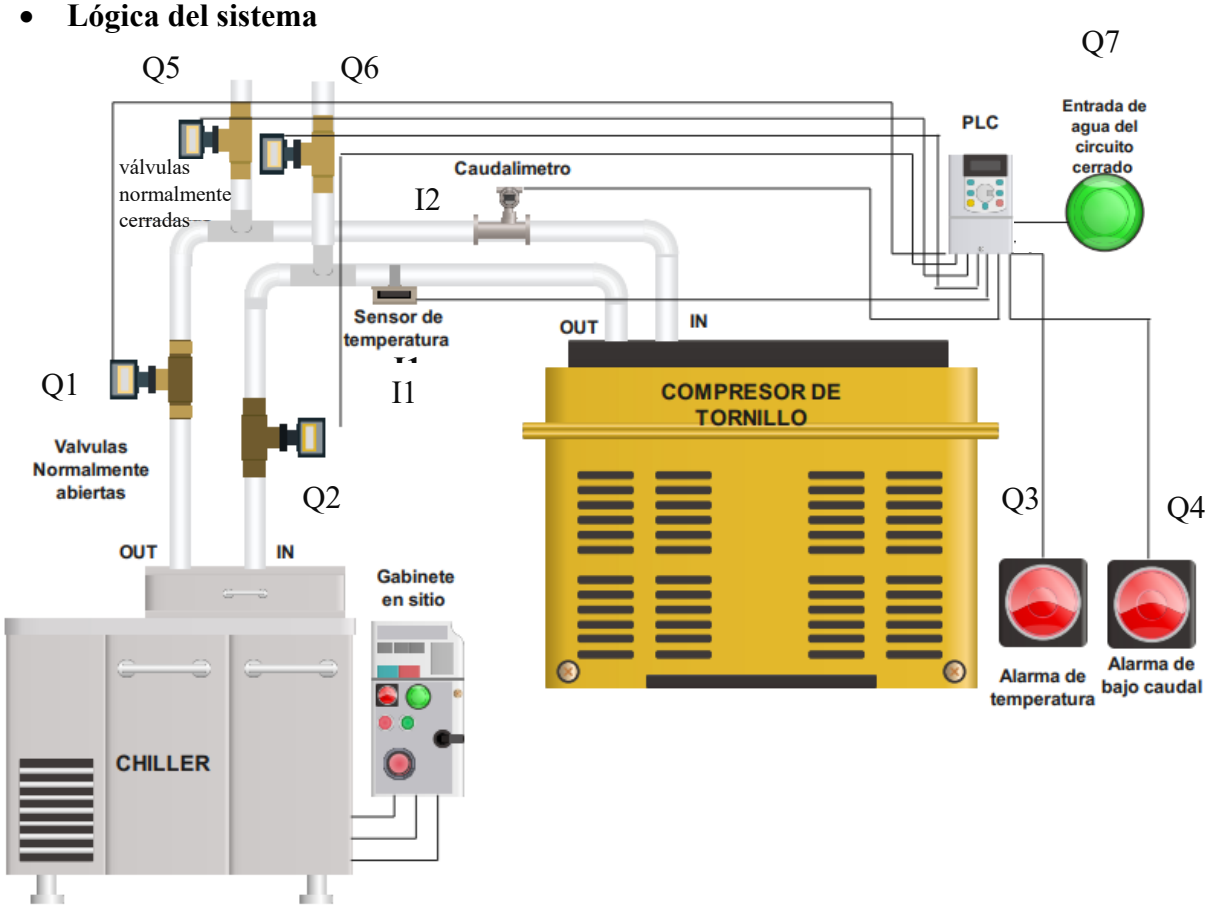


Figura 5: Funcionamiento del sistema de enfriamiento del5 compresor de tornillo.

- **Lógica de PLC**

Tabla 8: Tabla de verdad caudal.

No.	I2	Q1	Q2	Q5	Q6	Q4	Q7
0	0	1	1	1	1	1	1
1	1	0	0	0	0	0	0
2	0	1	1	1	1	1	1
3	1	0	0	0	0	0	0

Tabla 9: Tabla de verdad de temperatura.

No.	I1	Q1	Q2	Q5	Q6	Q3	Q7
0	0	1	1	1	1	1	1
1	1	0	0	0	0	0	0
2	0	1	1	1	1	1	1
3	1	0	0	0	0	0	0

- **Automatización del sistema.**

A continuación, se muestra la programación para el PLC que controlara las alarmas de flujo y temperatura, este se encuentra escrito lenguaje de bloques. Además de que también se muestra el paro y arranque del equipo.

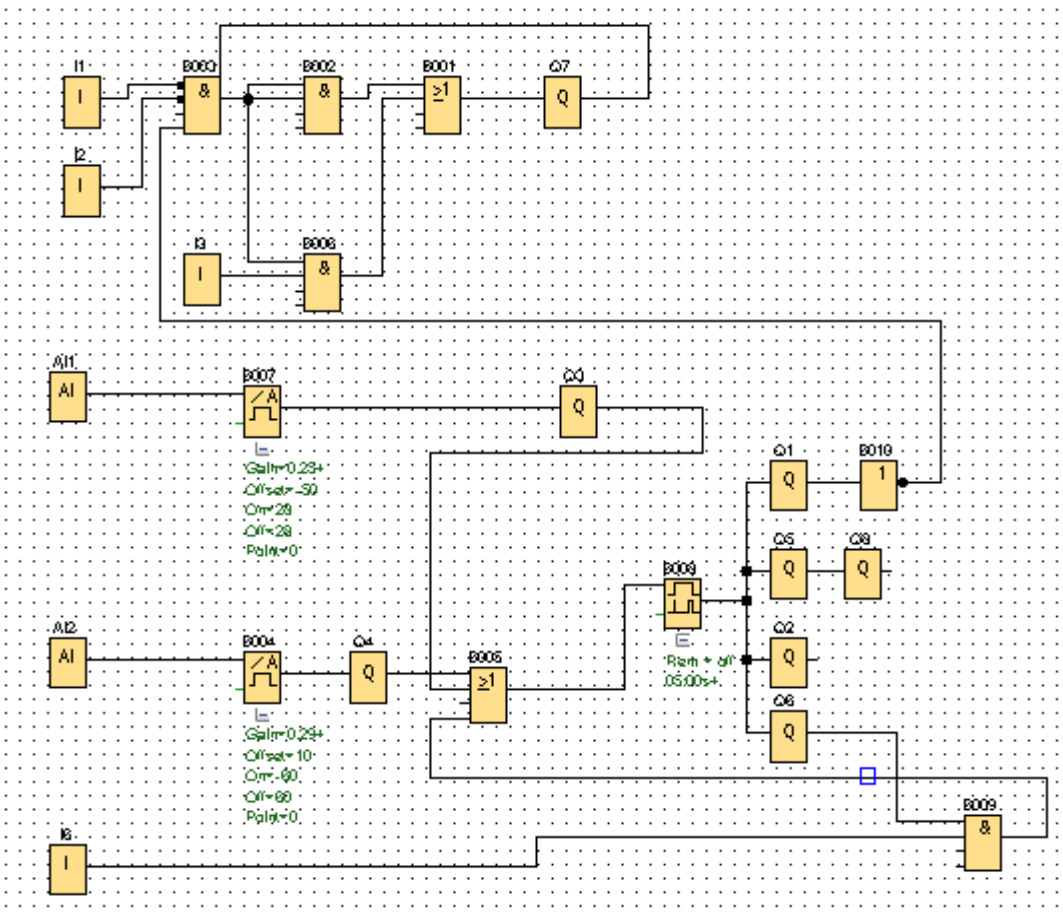


Figura 6: Programación en leguaje de bloques.

A continuación, se muestra la misma programación, pero en lenguaje Ladder.

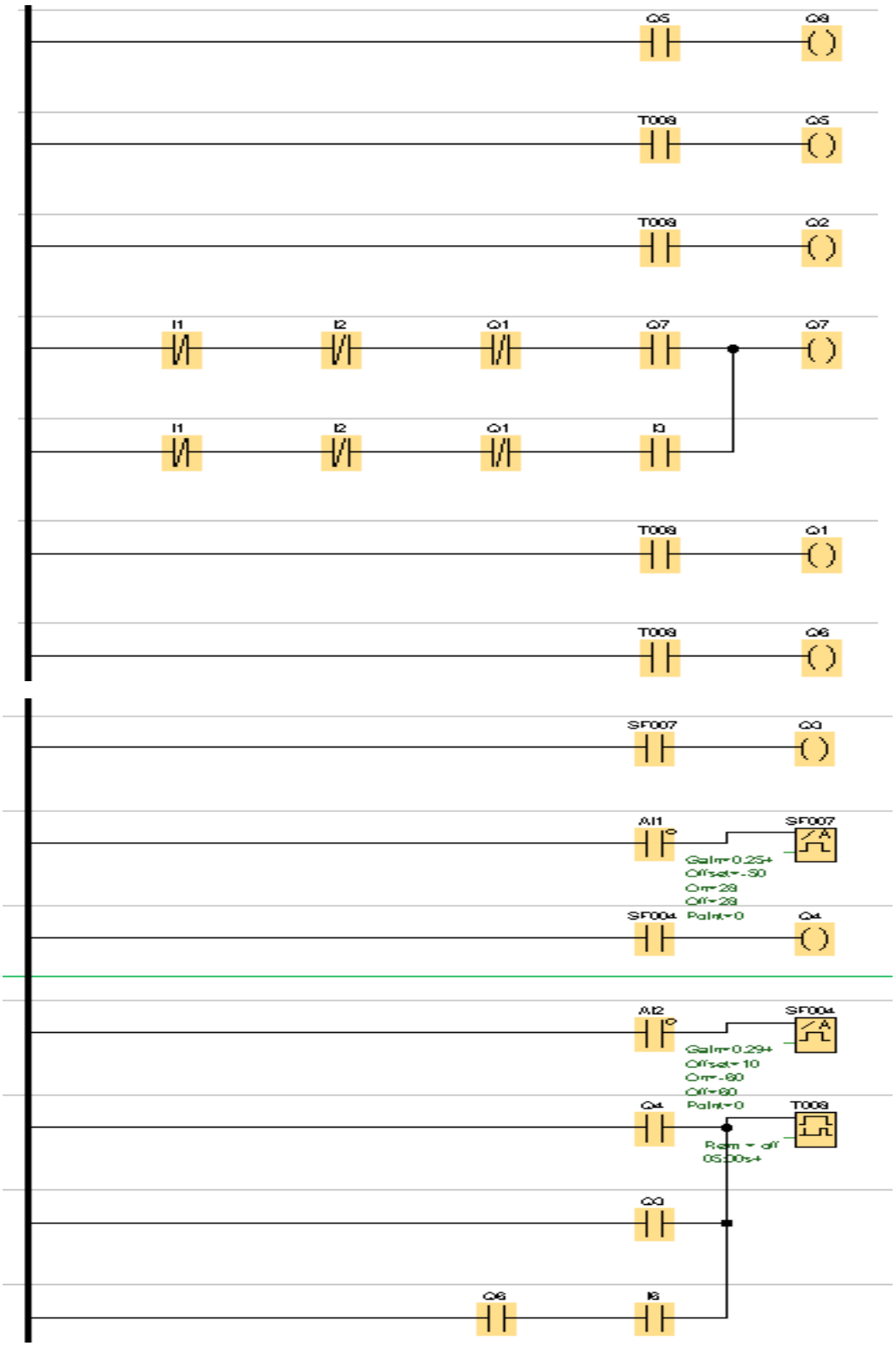


Figura 7: Programación en leguaje Ladder.

- **Pre a la instalación**

Para poder instalar los diversos sistemas que requiere el proyecto debemos saber el sitio en el que se colocara para poder tener la cantidad de material que se utilizara para cada sistema por lo cual se tomaron fotos y medidas por donde pasaran cables y tubos de agua de enfriamiento demás de la ubicación de válvulas y sensores.

Instalación del sistema hidráulico

Para la instalación del sistema hidráulico se tomaron fotografías del sitio por donde pasara la tubería como se muestra a continuación con las líneas Azules y rojas.

Línea Azul: Conducto de agua fría, entrada.

Línea Roja: Conducto de agua caliente, salida.



Figura 8: Salidas y entradas del agua refrigerante.



Figura 9: líneas de agua refrigerante.

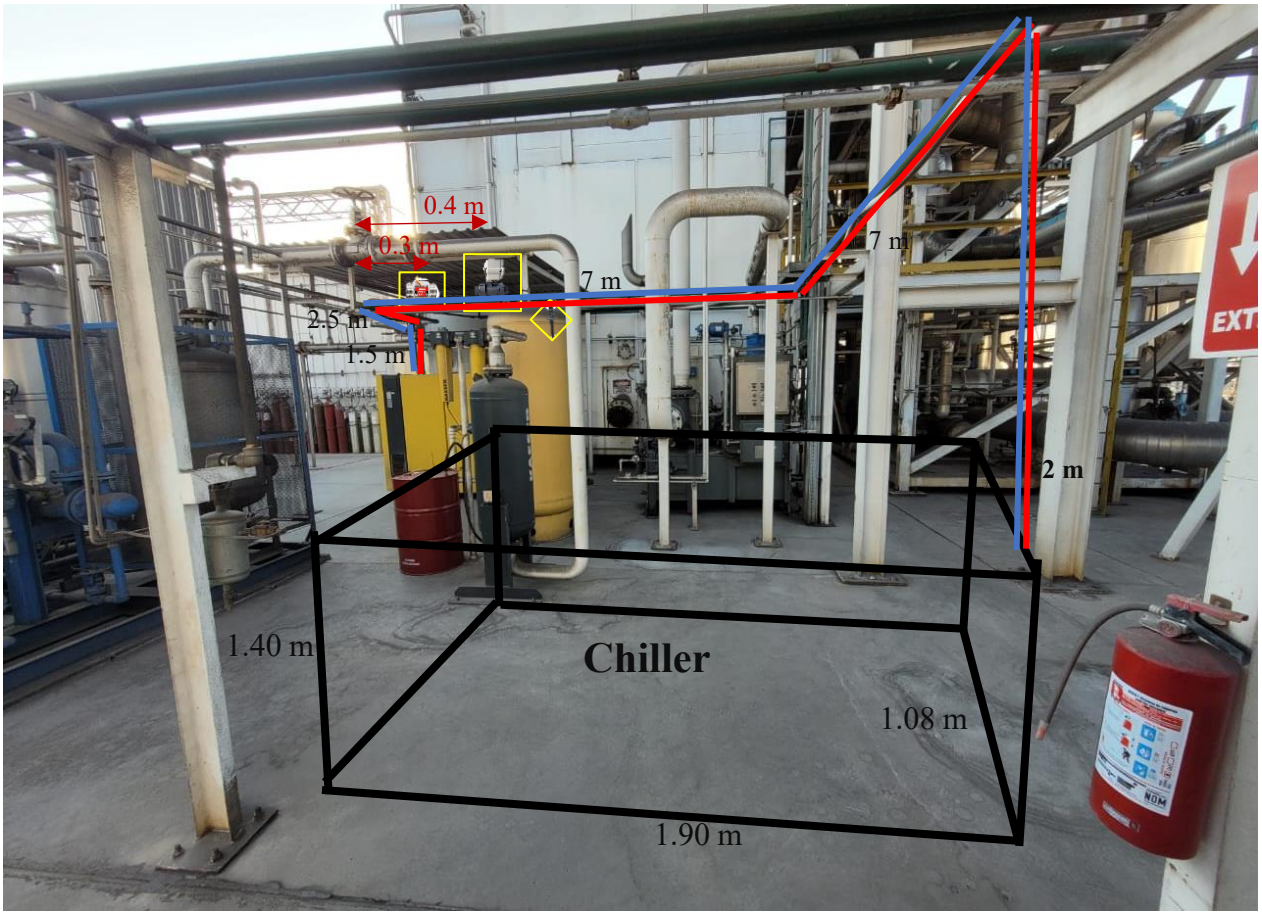


Figura 10: líneas de agua refrigerante a chiller.

En la figura número 10 se muestra la cantidad de metro de tubería para la instalación, además, así como la ubicación del chiller. sensor de temperatura, caudalímetro y válvula de control de flujo además de las dimensiones de cada elemento y así como la posición en la que va a ir colocados.

Instalación del sistema eléctrico de potencia.

La instalación de potencia debe realizarse el cableado desde el equipo en sitio hasta el CCM (Motor Control Center) por lo que se tomaron fotos y medidas para poder determinar la trayectoria y cantidad de cable en metros que se ocupara para el proyecto.

A continuación, se muestra el recorrido del cable y las medidas aproximadas:



Figura 11: trayectoria de líneas de alimentación eléctrica de CCM a chiller.

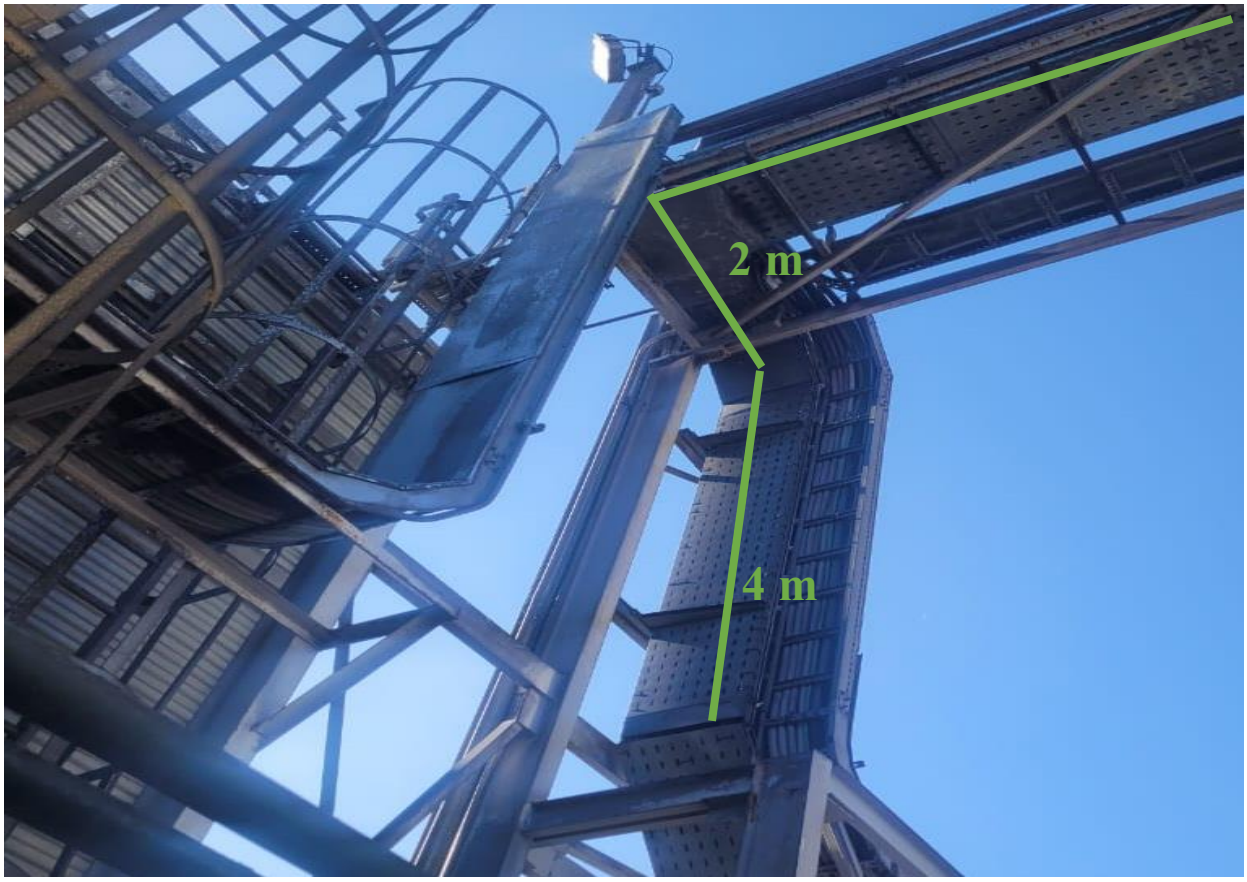


Figura 12: trayectoria de líneas de alimentación eléctrica de CCM a chiller.



Figura 13: trayectoria de líneas de alimentación eléctrica de CCM a chiller.

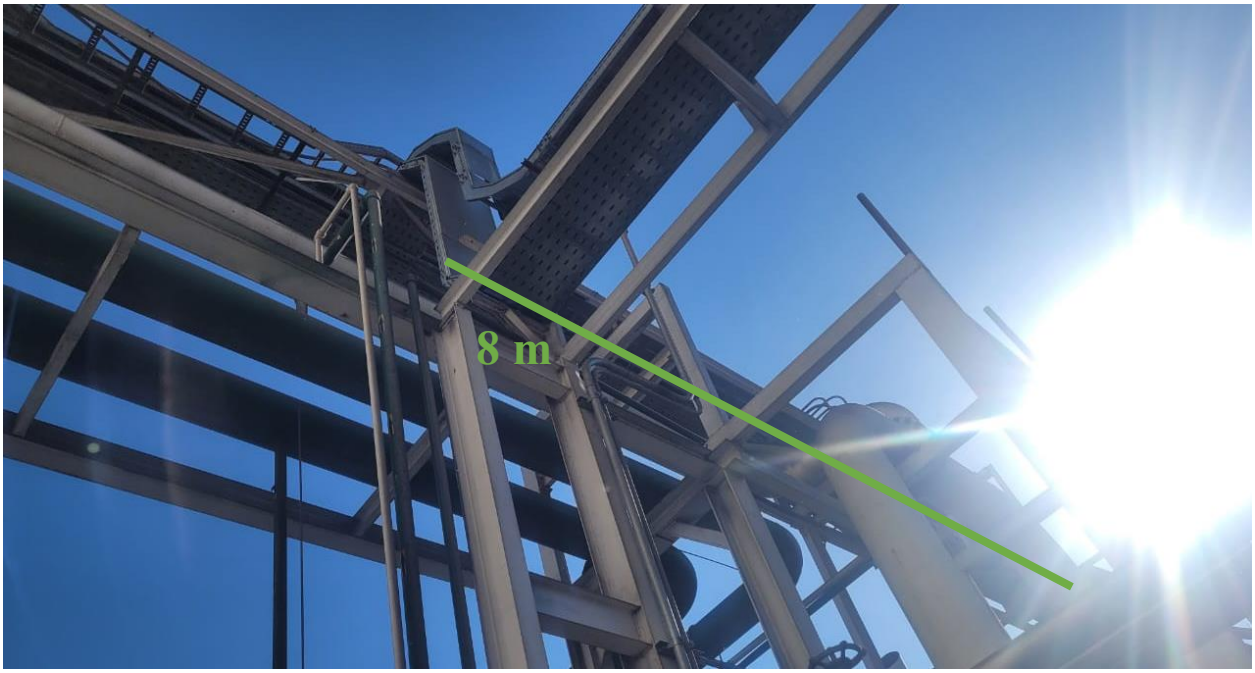


Figura 14: trayectoria de líneas de alimentación eléctrica de CCM a chiller.



Figura 15: trayectoria de líneas de alimentación eléctrica de CCM a chiller

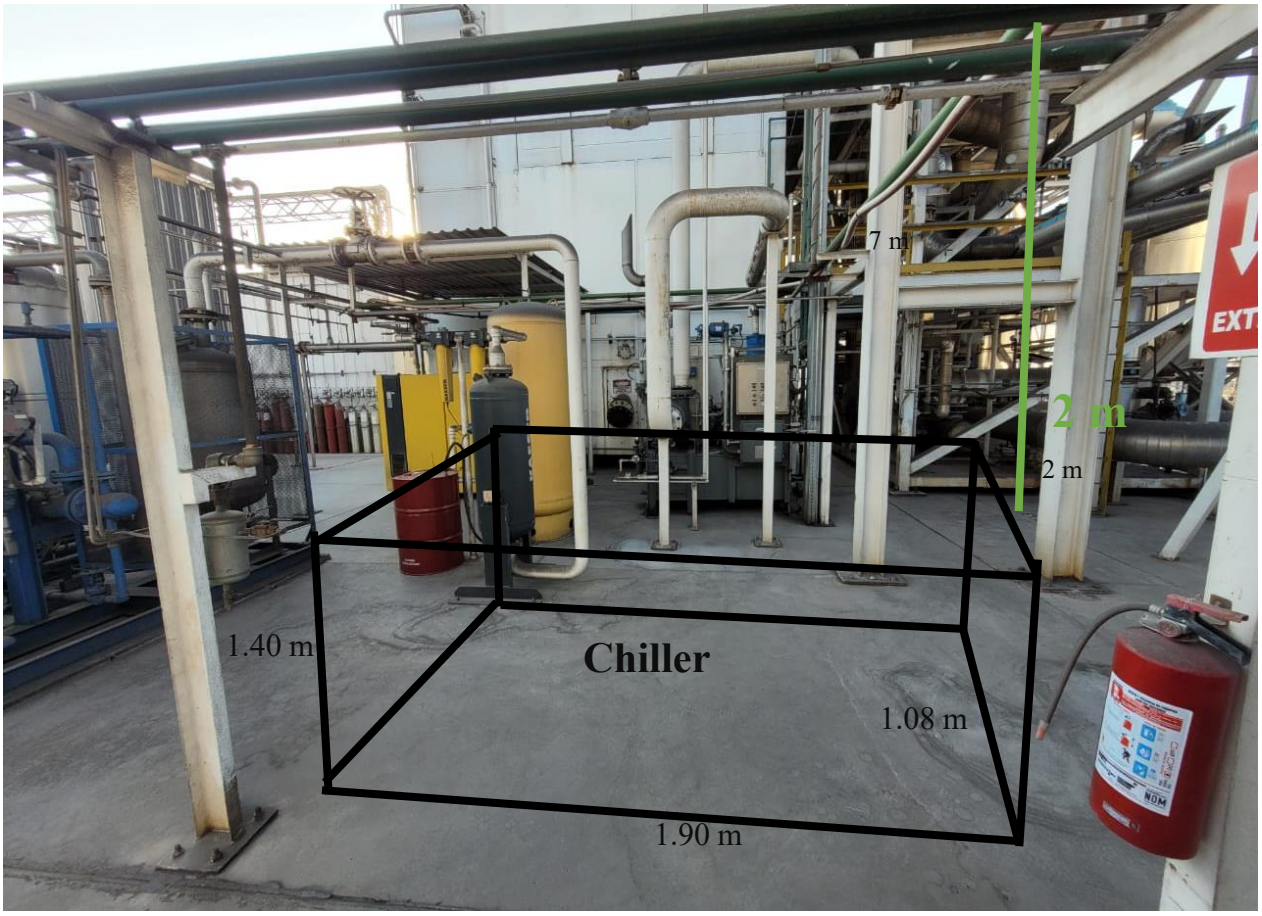


Figura 16: trayectoria de líneas de alimentación eléctrica de CCM a chiller.

Instalación del sistema eléctrico de control.

El control se dará a partir de un PLC ubicado en el cuarto de control por lo que se tomó medidas y fotos para calcular la cantidad de cable necesario además de trazar la trayectoria que se seguirá hasta la llegada al cuarto de control como se puede observar en las siguientes imágenes:



Figura 17: trayectoria de líneas de control de operaciones a chiller.



Figura 18: trayectoria de líneas de control de operaciones a chiller.



Figura 19: trayectoria de líneas de control de operaciones a chiller.



Figura 20: trayectoria de líneas de control de operaciones a chiller.

- **Diagrama del circuito de potencia de la alimentación del chiller.**

Aplicando la norma Nom-001-Sede-2012, articulo 430 motores, circuitos de motores y controladores, nuestras instalaciones eléctricas de nuestro circuito de potencia deben de tener un relé térmico, relé termomagnético de acuerdo con la capacidad de carga del motor como un mínimo de seguridad en caso de sobrecarga, calentamiento o corto circuito como lo muestra la siguiente imagen contenida en el artículo 430.

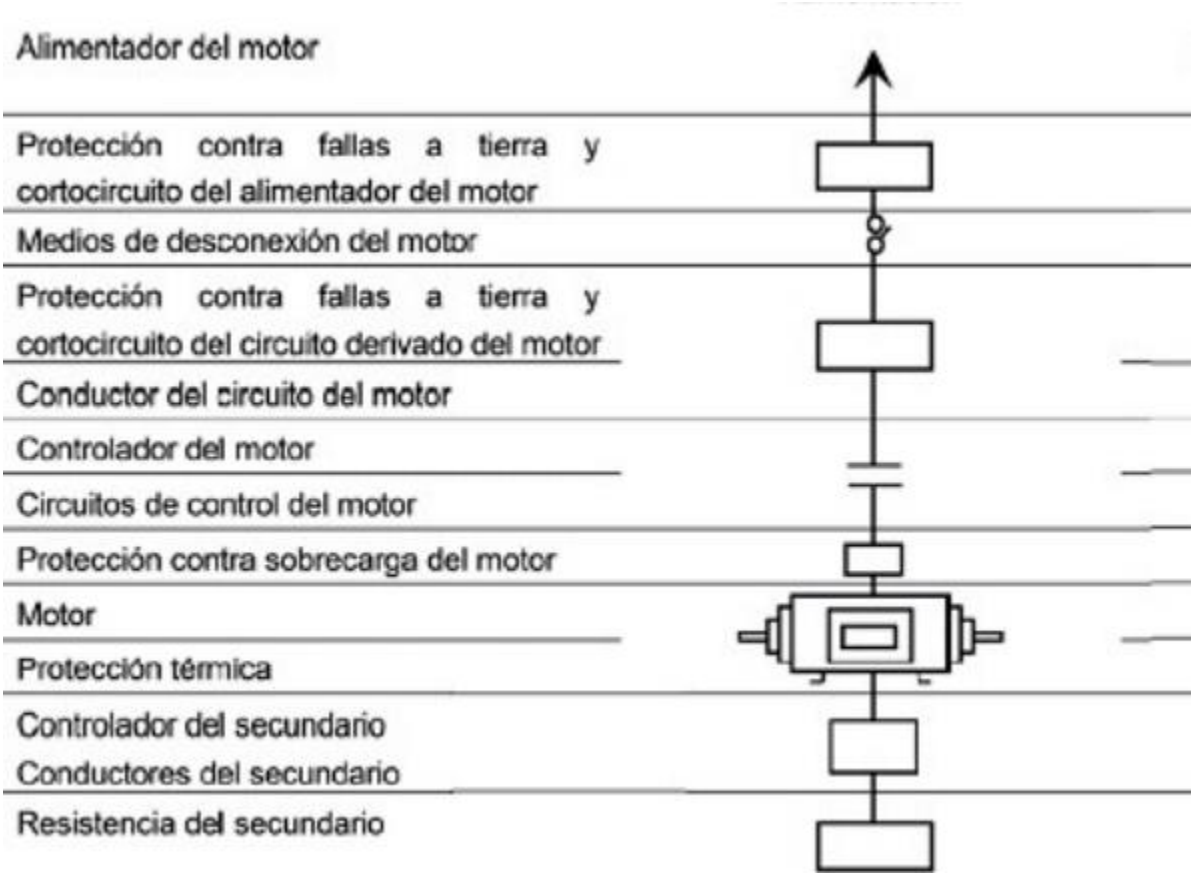


Figura 21: Contenido del Artículo 430 de la Nom-001-Sede-2012.

Con respecto a la norma anteriormente mencionada nuestro circuito de potencia debe tener protección contra sobre carga (termomagnético) y protección térmica (relé térmico) además de un conductor con el calibre adecuado a la demanda del motor del chiller y los colores según la norma oficial para 460 Volts trifásico (negro, rojo, Azul y verde) por lo cual nuestro circuito de potencia es de la siguiente forma:

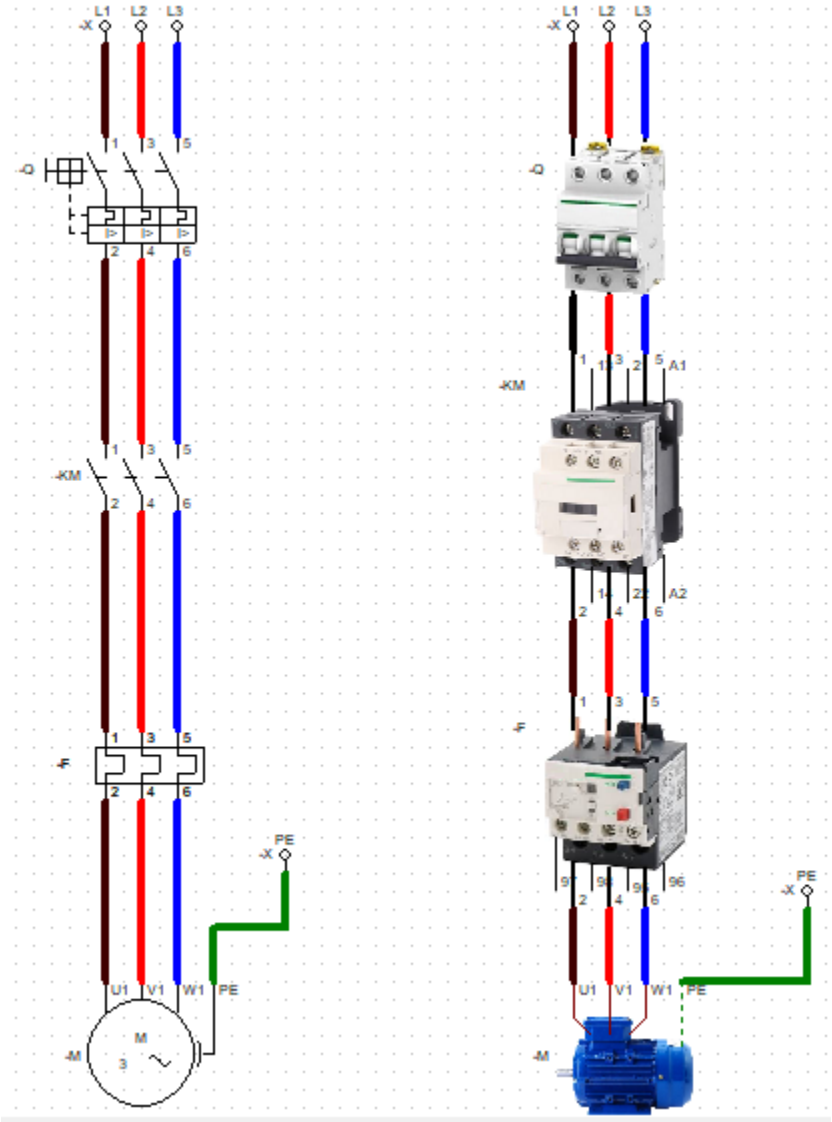


Figura 22: Esquemático de diagrama de potencia eléctrico.

Cálculo de amperaje máximo para la alimentación de chiller.

La corriente máxima que consume el chiller se puede calcular a partir del máximo consumo de energía del chiller, dado en la ficha técnica tabla 7.

Formula de la potencia eléctrica:

$$P = V(I) \dots \dots \dots \dots E(5)$$

Donde:

$P = Potencia.$

$I = Corriente.$

Despejando la corriente queda la siguiente formula:

$$I = \frac{P}{V}$$

Datos:

$P_{Max} = 22{,}000W$

$Voltage = 460\ V$

Sustituyendo valores en la formula:

$$I = \frac{22{,}000W}{460\ V}$$

$$I = 47.826\ A$$

$$I_{MAX} \approx 50\ A$$

La corriente la dejamos en 50 amperes puesto que no existe un termomagnético comercial de 47.826 amperes y no podemos colocar uno de mayor capacidad puesto que en caso de sobrecarga primero se quemará el cable antes de que el termomagnético se bote así que elegimos uno de menor capacidad para poder proteger al conductor y el equipo.

Calculo para el calibre del cable conductor.

Según la norma NOM-001-SEDE-20212 Capitulo 3 métodos de alambrado y materiales, el calibre del cable dependerá del amperaje que se maneja más un factor de seguridad (que se calculó en el apartado anterior "Cálculo de amperaje máximo para el motor"), así como de la temperatura de trabajo, material del conductor y condiciones ambientales de trabajo a partir de ello seleccionamos el calibre del cable.

El material principal con el que están fabricados los conductores es el cobre (por su grado de conductividad) pero también se utilizan aleaciones de aluminio que, aunque su grado de conductividad es menor también resulta más económico que el cobre, pero en este caso usaremos conductores de cobre con aislamiento termoplástico resistente a la humedad y para ello nos basaremos en la norma NOM-ANCE más específico en la norma NMX-J-451-ANCE-2011, que nos dice lo siguiente:

- T (Thermoplastic): Aislamiento termoplástico (este lo tienen todos los cables.)
- H (Heat resistant): Resistente al calor hasta 75° centígrados (167° F).
- HH (Heat resistant): Resistente al calor hasta 90° centígrados (194° F).
- W (Water resistant): Resistente al agua y a la humedad.
- LS (Low smoke): Este cable tiene baja emisión de humos y bajo contenido de gases contaminantes.

- SPT (Service paralell thermoplastic): Esta nomenclatura se usa para identificar un cordón que se compone de dos cables flexibles y paralelos con aislamiento de plástico y que están unidos entre sí. También se denomina cordón dúplex.

El conductor debe de contar con aislamiento termoplástico, resistente hasta 90°C puesto que va a estar expuesto a la intemperie y a un sistema intercambiador de calor por lo que puede llegar a calentarse, resistente al agua y humedad por la exposición a la intemperie y por último una baja emisión de humos y gases.

Por lo que el cable conductor debe de tener la siguiente nomenclatura de aislante como mínimo: **THHW-LS.**

Para calcular el calibre se consultó la página de un fabricante lo cual nos recomienda lo siguiente:

Amperaje que soportan los cables de cobre					
Nivel de temperatura:	60°C	75°C	90°C	60°C	
Tipo de aislante:	TW	RHW, THW, THWN	THHN, XHHW-2, THWN-2	SPT	
Medida / calibre del cable	Amperaje soportado			Medida / calibre del cable	Amperaje soportado
14 AWG	15 A	15 A	15 A	20 AWG	2 A
12 AWG	20 A	20 A	20 A		
10 AWG	30 A	30 A	30 A	18 AWG	10 A
8 AWG	40 A	50 A	55 A		
6 AWG	55 A	65 A	75 A	16 AWG	13 A
4 AWG	70 A	85 A	95 A		
3 AWG	85 A	100 A	115 A	14 AWG	18 A
2 AWG	95 A	115 A	130 A		
1 AWG	110 A	130 A	145 A	12 AWG	25 A
1/0 AWG	125 A	150 A	170 A		
2/0 AWG	145 A	175 A	195 A		
3/0 AWG	165 A	200 A	225 A		
4/0 AWG	195 A	230 A	260 A		

Figura 23: Amperaje en los conductores (Masvoltaje 2016, 27 abril).

Tenemos que la nomenclatura del cable debe de ser THHW-LS (Resistente a 90°C) y el amperaje que debe de resistir será de 50ª por lo que la tabla nos dice que el calibre a usar es el **8 AWG.**

Calculo para el amperaje de termomagnético.

Basándonos en el artículo 240 2proteccion contra sobre corrientes de la norma NOM-001-SEDE-2012 Articulo 210-20. Que nos dice lo siguiente:

> La Protección contra sobre corriente. Los conductores de circuitos derivados y los equipos deben estar protegidos mediante dispositivos de protección contra sobre corriente con valor nominal o ajuste que cumpla lo establecido en (a) hasta (d) siguientes.
>
> > a) Cargas continuas y no continuas. Cuando un circuito derivado alimenta cargas continuas o cualquier combinación de cargas continuas y no-continuas, la capacidad nominal del dispositivo de sobre corriente no debe ser menor a la carga no-continua más el 125 por ciento de la carga continua.
> >
> > b) Protección del conductor. Los conductores se deben proteger de acuerdo con 240-4. Los alambres y cordones flexibles de las lámparas deben estar protegidos según 240-5.
> >
> > c) Equipo. La capacidad nominal o ajuste del dispositivo de protección contra sobre corriente no debe exceder la especificada en los Artículos aplicables para el equipo, que se indican en la Tabla 240-3.
> >
> > d) Dispositivos de salida. El valor nominal o ajuste no debe exceder lo especificado en 210-21 para dispositivos de salida. (NOM-001-SEDE-2012, Articulo 210-20,2012).

Teniendo en cuenta que nuestro cable soportara 50 Amperes nuestro elemento de **protección contra sobre corrientes (termomagnético) también debe de ser de 50 Amperes.**

Cálculo para el amperaje en el contactor.

En el capítulo cuarto, articulo 430 de motores, circuitos de motores y accionamiento de la NOM-001-SEDE-2012, podemos deducir que el contactor debe de soportar los 50 amperes o más de la corriente máxima de la bomba por lo que necesitaremos un **contactor de igual o mayor capacidad de 50 amperes.**

Calculo para el amperaje del relé térmico.

El relé térmico es el elemento que protegerá el conductor por lo cual el rango que debemos trabajar es de acuerdo con la corriente que soportará el conductor por lo cual el relé térmico a escoger será de un **rango de 37 a 50 Aperes.**

- ## Diagrama esquemático del tablero de Potencia del chiller.

El diagrama esquemático de un tablero de potencia nos proporciona una representación visual clara de cómo están conectados los componentes eléctricos, lo que facilita el mantenimiento, la resolución de problemas y la seguridad en la manipulación del equipo. Este diagrama sirve como guía para instalaciones adecuadas, diagnóstico de fallos y cumplimiento de regulaciones eléctricas, asegurando un funcionamiento eficiente y seguro del sistema. En resumen, el diagrama es una herramienta fundamental para la gestión efectiva de los componentes y una manipulación segura del equipo.

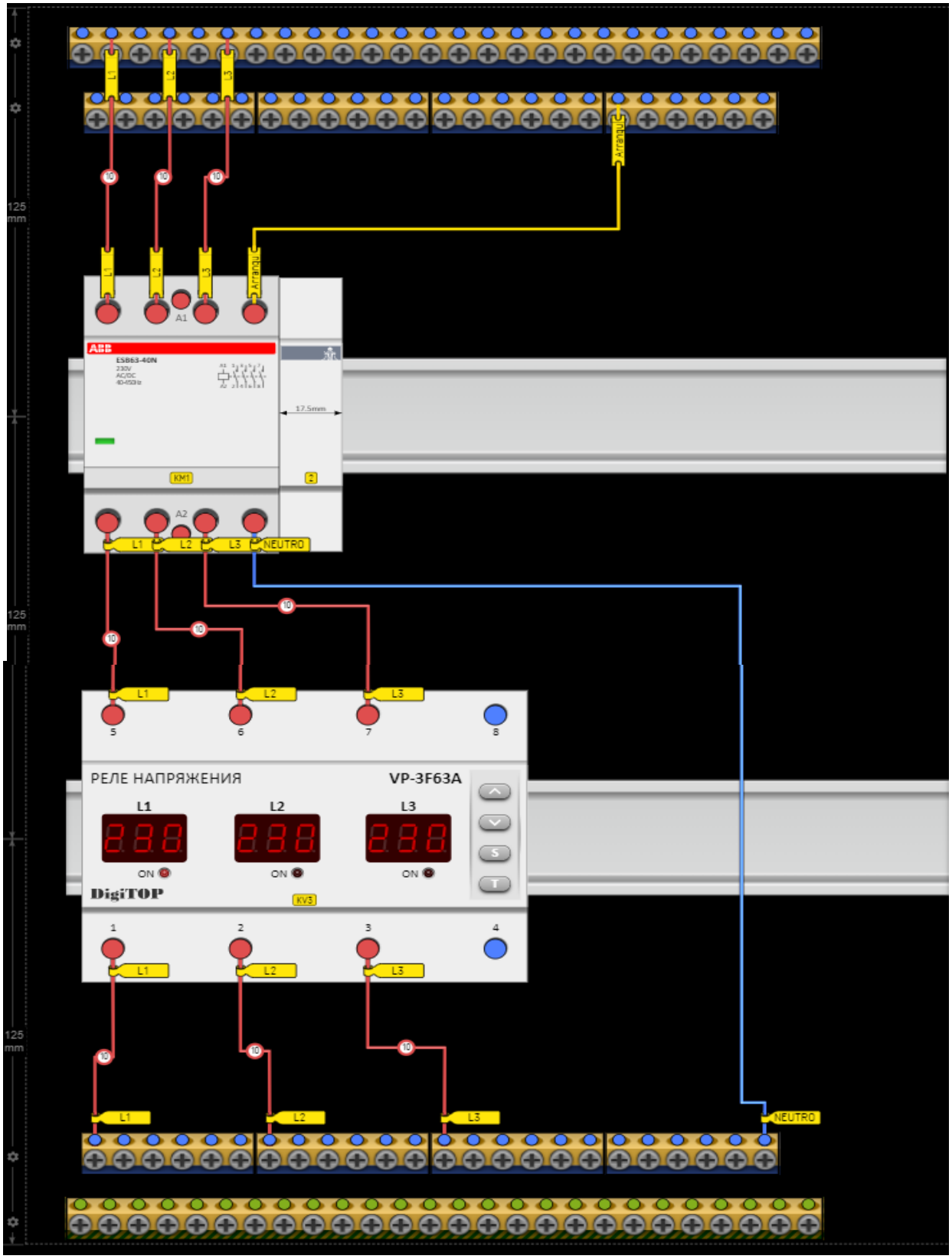


Figura 24: Diagrama esquemático del tablero de potencia.

- **Diagrama esquemático del tablero de control del chiller.**

El diagrama esquemático de un tablero de control es crucial para entender la organización eléctrica del sistema y gestionar el espacio de una forma segura y eficiente. Proporciona una representación visual de cómo se interconectan y controlan los componentes, lo que facilita la solución de

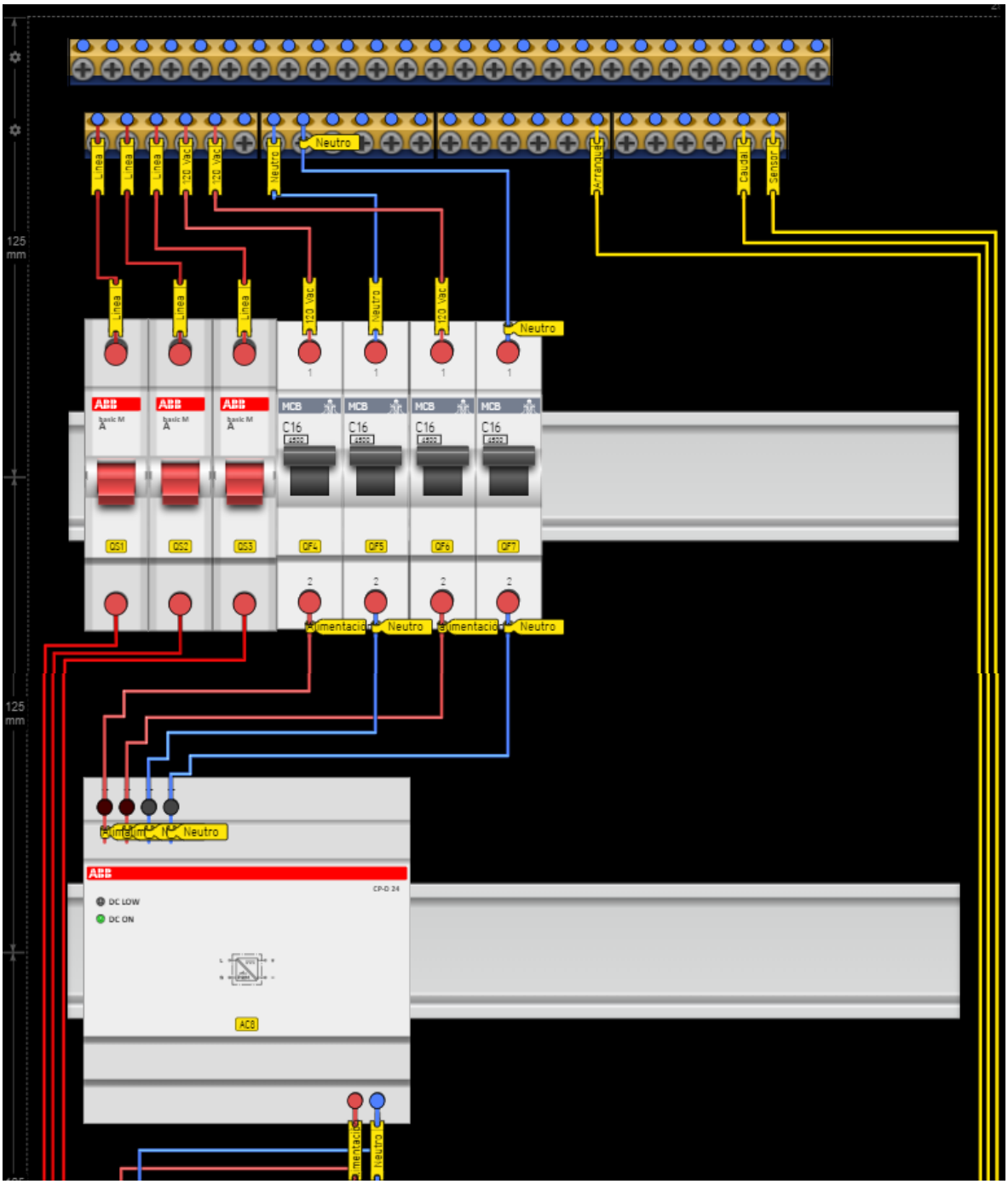


Figura 25: Diagrama esquemático del tablero de control

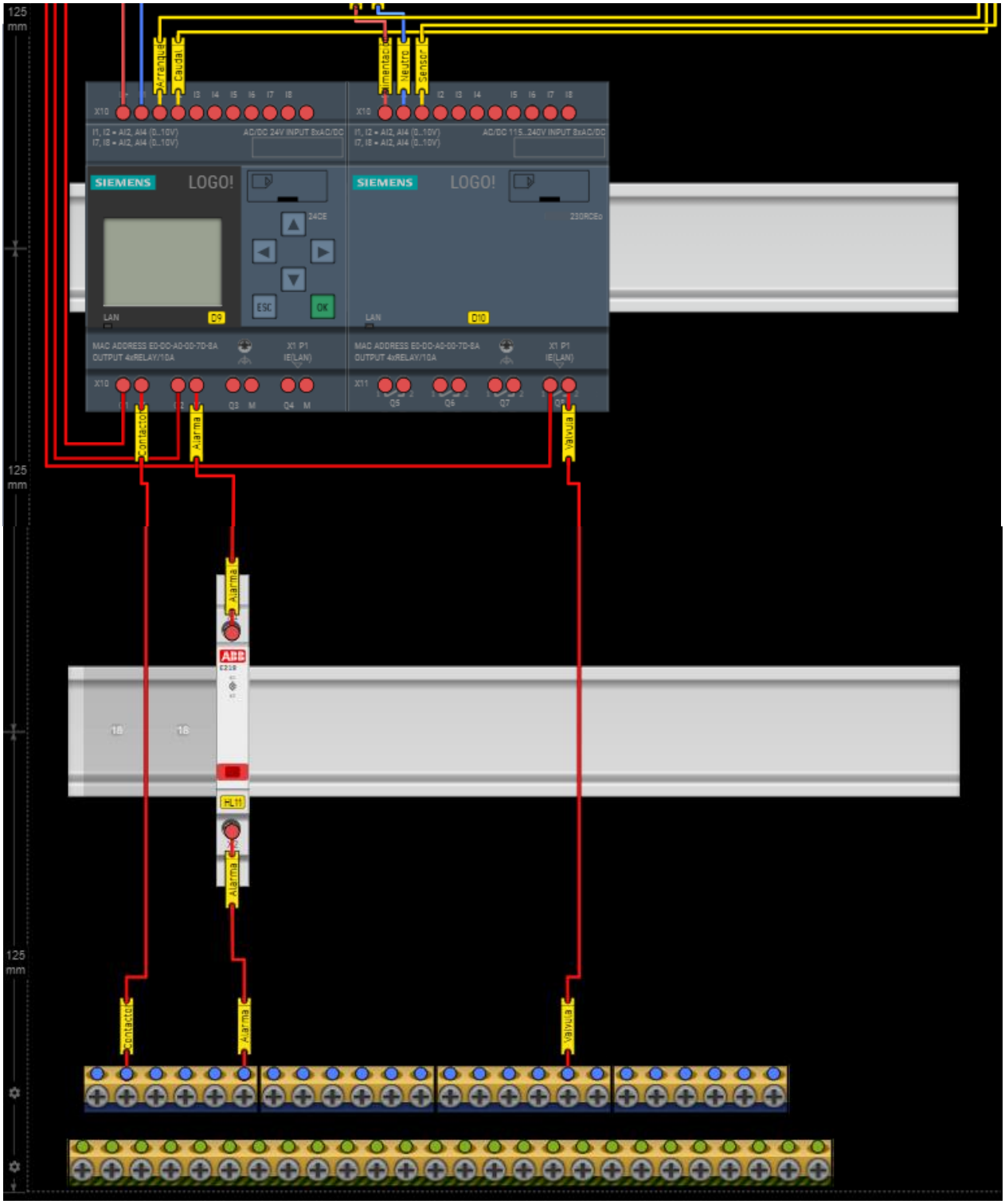


Figura 26: Diagrama esquemático del tablero de control.

- **Instalación de gabinetes.**

La instalación de los gabinetes tanto del gabinete de control como el de potencia se realizará en sitio puesto que su arranque y paro se hará en sitio y por comodidad se realizará en sitio, aunque tomando en cuenta que contará con dos paros de emergencia uno en el cuarto de control y otro en sitio en el Gabinete de control dicho esto la siguiente figura muestra la ubicación para la instalación de los gabinetes.

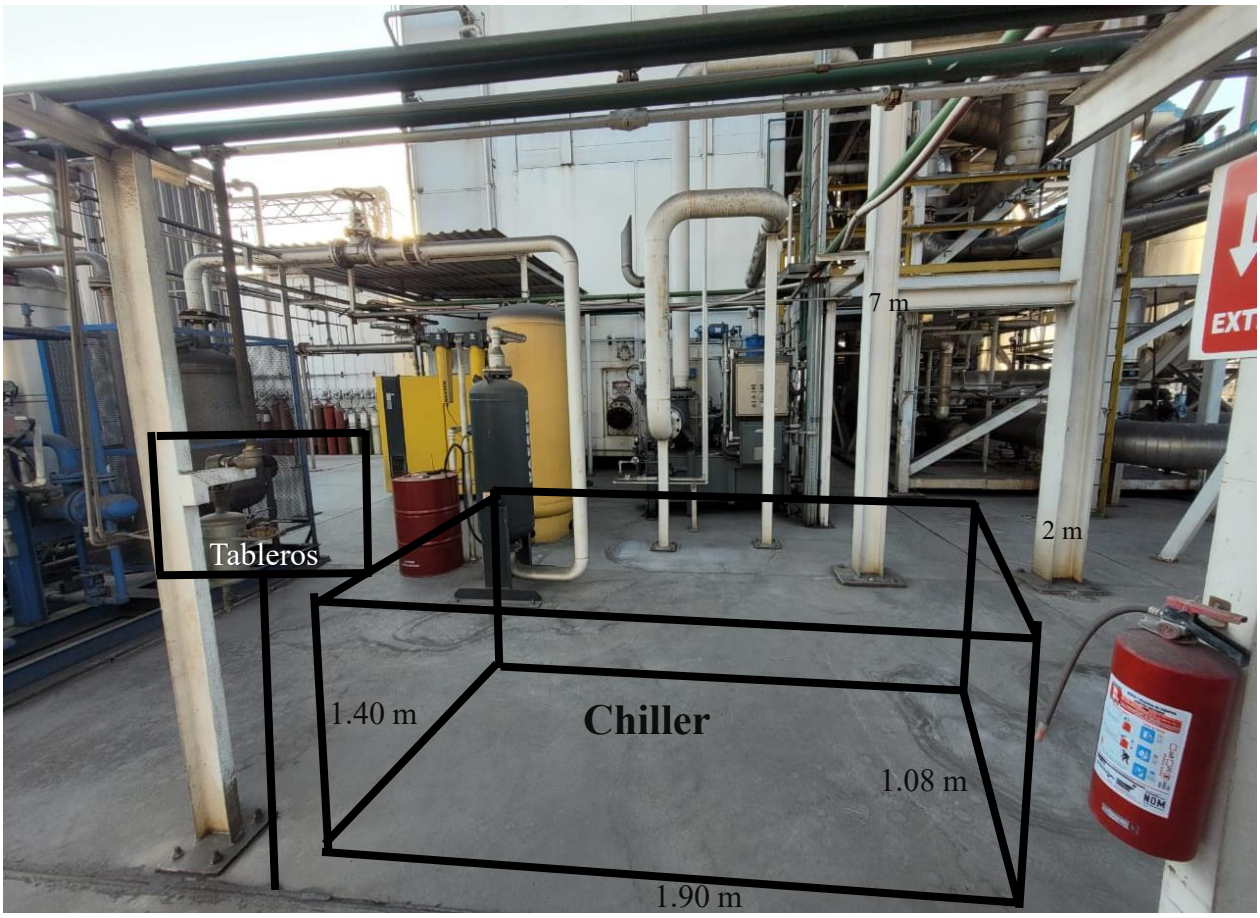


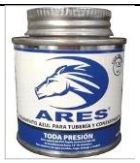
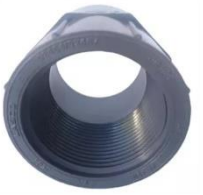
Figura 27: Instalación de gabinetes.

- **Listado de materiales.**

A continuación, se muestra una tabla con todos los materiales necesarios para la instalación y puesta en marcha del proyecto además de las especificaciones que debe cumplir cada uno y el costo de compra.

Tabla 10: Lista de materiales, especificaciones y costos.

Marca/ Modelo de pieza	NOMBRE DE LA PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	IMAGEN DE LA PIEZA	COSTO UNITARIO APROX	MONTO
TEYU/CW-8000FNTY	chiller	ca 3p 460 v 60 Hz	1			$ 300,000
Futura "o" EMSSA	tubos de PVC 1-1/2" cedula 80	42 metros de tubo	7		$ 279.00	$ 1,953.00
Futura "o" EMSSA	reducción de PVC 1-1/2 " a 1-1/4 cedula 80	bushing PVC c-80 1 1/2" x 1 1/4"	4		$ 67.00	$ 268.00
Futura "o" EMSSA	adaptador macho roscado a hembra liso 1-1/4" PVC c-80	adaptador macho PVC c-80 1-1/4"	3		$ 93.00	$ 279.00
Futura "o" EMSSA	tubo de PVC 1-1/4" cedula 80	tubo PVC c-80 de 1 1/4" x 6.0mts	2		$ 232.00	$ 464.00
EMSSA	cople de PVC 1-1/2" cedula 80	cople PVC c-80 cementar 1 1/2" 829-015	8		$ 79.00	$ 632.00
Futura "o" EMSSA	codos de PVC 1-1/2" cedula 80	codo PVC c-80 cementar 90° 1 1/2" 806-015	16		$ 57.00	$ 912.00
MADCO	válvula manual de 1-1/2" cedula 80	válvula de bola de PVC cedula 80 1 1/2 doble unión	2		$ 385.00	$ 770.00

ARES	limpiador para PVC 500 ml	limpiador ares silver 500 ml, mxshe-001, limpiador para PVC, cpvc,	1		$ 179.00	$ 179.00
ARES	pegamento para PVC 500 ml	adhesivo para PVC ares, mxbhe-003, viscosidad extra gruesa 500 ml	1		$ 198.00	$ 198.00
GENÉRICO	unión de cople roscado macho a cople liso hembra de 1-1/2 cedula 80.	adaptador macho PVC c-80 1 1/2"	2		$ 130.00	$ 260.00
YF-DN40	caudalímetro	sensor de flujo de agua de acero inoxidable, caudalímetro líquido de dc5-24v, NPN, hall, 1-1/2 ".	1		$ 871.00	$ 871.00
LADSCO AMERICA	uniendo cople roscado hembra a cople liso 1-1/2" cedula 80	adaptador hembra 1-1/2" cédula 80 industrial calidad	2		$ 258.00	$ 516.00
GENERICO	cople de 1/2 a 1/4 PVC cedula 80 macho	reducción bushing 1/2" x 1/4" cedula 80 cementar PVC, roscados	1		$ 150.00	$ 150.00
GENERICA	abrazadera roscada	abrazadera roscada de 1 1/2 x 1/2 de PVC cedula 80	1		$ 198.00	$ 198.00
TERMOPAR A TIERRA TIPO J	sensor de temperatura	sonda de sensor de temperatura para controlador de temperatura pid rosca de tubería de acero inoxidable 0-750 °C con rosca de montaje de 1/4" NTP	1		$ 125.00	$ 125.00

	controlador de sensor de temperatura.	kit pirómetro digital, termopar j, control temperatura	1		$ 750.00	$ 750.00
FULGORE	gabinete	40x50x 20 (largo x alto x ancho)	2		$ 1,067.00	$ 2,134.00
SCHNEIDER ELECTRIC	contactor	contactor Schneider electric 50 amp, 3 polos bobina de control de 110 v ac.3, línea sntqty2	1		$ 2,896.11	$ 2,896.11
SCHNEIDER ELECTRIC	contactos auxiliares	contacto auxiliar instantáneo NA + NC, línea sntqty2	1		$ 231.00	$ 231.00
SCHNEIDER ELECTRIC	pastilla termomagnética para potencia	interruptor termomagnético 3polos 50a 480vca te fal34050	1		$ 5,193.00	$ 5,193.00
SCHNEIDER ELECTRIC	pastilla termomagnética para control	interruptor termomagnético din 2 polos, 10 a, protege tu instalación eléctrica, uso doméstico, comercial e industrial, contra sobrecargas y cortocircuitos, curva de disparo c, tamaño estándar.	1		$ 187.00	$ 187.00
	palanca mecánica para interruptor.	Palanca mecánica para tablero de 25 cm x 15 cm para tablero de potencia	1			$ 2,000
	base para indicadores luminosos.	Base de pilotos de 25cm x 15 cm para tablero de potencia	1			$ 1,500

SCHNEIDER ELECTRIC	relé térmico	lrd350 relevador de sobrecarga 37-50a Schneider	1		$ 3,451.00	$ 3,451.00
WESTON TOOLS	cable de potencia uso rudo	cable thhw-ls, 8 awg 4 hilos, 100 metros uso rudo.	1		$ 25,405.00	$ 25,405.00
ILUSA	cable de control	cable thhw calibre awg 14, 12 hilos, rollo 100 metros color azul o verde	2		$ 724.00	$ 1,448.00
SCHNEIDER ELECTRIC	paro de emergencia completo	interruptor: de emergencia; 22mm: 2; NC + NC; rojo; ip66	1		$ 800.00	$ 800.00
AM ELECTRIC	cubiertas de seguridad para pulsadores	cubierta protectora para botón pulsador 22mm	5		$ 42.00	$ 210.00
		CANTIDAD TOTAL DE PIEZAS	73		**TOTAL**	$ 353,980.11

- **Relación costo beneficio**

Costos del proyecto:

Realizando el presupuesto del costo del equipo más implementos necesarios, además de los costes de instalación por mano de obra (el cual es cero puesto que será instalado por los ingenieros de la planta) obtenemos el costo total del proyecto como se muestra a continuación:

$$Costo\ final = (Costo\ del\ chiller + Costo\ de\ implementos) + Costo\ de\ instalacion. (E6)$$

$$Costo\ final = (\$300{,}000 + 59{,}080.11) + (0)$$

$$Costo\ final\ = \$359{,}080.11 \text{ pesos mexicanos.}$$

Para obtener costes más certeros también se incluirá el coste aproximado por consumo eléctrico durante el periodo de un año del equipo seleccionado. Conforme al régimen en que se encuentra la empresa nos dice CFE que la energía les cuesta a las empresas 1.0576 pesos por kilowatt/hora (kWh).

Teniendo en cuenta que el equipo propuesto tendrá un consumo energético de 18 KW se realizó lo siguiente para poder calcular su consumo en el periodo de 1 año teniendo en cuenta que es su consumo máximo.

Para poder obtener el consumo por hora debemos realizar lo siguiente de acuerdo con la formula:

$$KWh = (KWh)(Numero\ de\ horas\ ) \dots\dots\dots\dots (E7)$$

A continuación, se muestra la sustitución de valores en la formula dada anteriormente que nos dará el consumo diario del equipo.

$$KWh = (18\ KW\ )(1\ hrs) \dots\dots\dots\dots (E8)$$

$$KWh = 18\ KWh$$

Para el cálculo anual se realiza el cálculo del consumo de energía en un año teniendo en cuenta que la disponibilidad de la planta es del 97 % durante el año por lo cual tenemos que la planta por paros programados puede parar hasta 10.95 días.

Tabla 23: Consumo y coste de energía por tiempo

Por hora	Por 1 día	Por 1 mes	Por 1 año
18 KWh	432 KWh	12,960 KWh	152,928 KWh
$ 19.03	$ 456.88	$13,706.49	$161,736.65

En términos monetarios el consumo de energía en un año del equipo propuesto será de **$161,736.65 pesos mexicanos.**

Beneficios del proyecto.

El proyecto esta principalmente pensado para tener un control de temperatura de agua de enfriamiento más eficiente puesto que en los meses de abril y mayo del año 2024 la temperatura ambiente ha ido en aumento además de las olas de calor que se han presentado en toda la república mexicana, lo que afecta directamente al proceso de enfriamiento del aire en el chiller de enfriamiento de aire lo que disminuye su eficiencia y a su vez aumenta el gasto energético y el desgaste general del equipo.

La reducción de la carga de trabajo de tendrá efecto directamente en:

- Reducción de perdidas térmicas: Al ser un sistema de circuito cerrado, se minimizan las pérdidas de energía.
- Menor desgaste en el sistema de enfriamiento de aire (chiller de aire): las temperaturas más estables reducirán el estrés térmico y el desgaste de los componentes.

- Protección contra la contaminación: Al ser un sistema cerrado este no estará expuesto a contaminantes como polvo, o partículas en general que pueden afectar negativamente a los equipos.
- Facilidad de control de temperatura: El equipo actual tiene su propio control de temperatura lo que lo hace ideal para bajar o elevar la temperatura del agua refrigerante según su sea el caso.
- Consumo de agua reducido: en un sistema de circuito cerrado el agua refrigerante solo se recircula no existe perdida de agua refrigerante significativa.
- Sostenibilidad ambiental: Un menor consumo de agua implica un menor impacto ambiental.
- Menor variabilidad operativa: Al mantener temperaturas constantes, el compresor opera de manera más estable.
- Menor inversión de agua y tratamiento: Al reutilizar el agua y reducir la necesidad de sistemas de tratamiento de agua se disminuyen los costos.

Conclusiones

En conclusión, el desarrollo del sistema de enfriamiento de circuito cerrado para el compresor de tornillo se presenta como una solución efectiva para mejorar tanto la eficiencia operativa del compresor como la fase de producción de pre-purificación. Mediante un análisis de las condiciones de operación y las limitaciones del sistema de enfriamiento existente, se identificaron oportunidades para optimizar el proceso. La implementación de un sistema de enfriamiento de circuito cerrado permitirá un control más preciso de la temperatura, reduciendo así el consumo de agua y mejorando la vida útil del equipo. El análisis de costo-beneficio respalda esta decisión al demostrar que los beneficios superan los costos asociados con el proyecto. En resumen, se espera que este proyecto resulte en una mejora significativa en la eficiencia operativa y la fiabilidad de los equipos, lo que lo posiciona como un éxito potencial.

Además, que el desarrollo de este proyecto también puede impulsar el crecimiento profesional, ya que participar en la investigación, diseño e implementación de soluciones innovadoras en sistemas de refrigeración puede ampliar su experiencia y conocimientos en el campo de la ingeniería mecatrónica. Esto podría abrir nuevas oportunidades laborales o de desarrollo de carrera en industrias relacionadas con la refrigeración, la ingeniería de sistemas o la eficiencia energética.

En resumen, el desarrollo del sistema de enfriamiento de circuito cerrado para compresor de tornillo no solo ofrece beneficios tangibles como las mejoras del sistema, sino que también puede impulsar el crecimiento profesional y la especialización del individuo que esto es de gran relevancia en la actualidad.

Competencias desarrolladas y/o aplicadas.

Las competencias que se aplicaron durante el desarrollo del proyecto fueron variadas puesto que la índole del proyecto lo ameritaba, algunas de las competencias aplicadas durante este tiempo fueron con relación a termodinámica, Instrumentación, PLC, Metrología, Maquinas eléctricas y análisis de fluidos.

Por lo cual se aplicaron las siguientes competencias:

- Se conocen los conceptos y las leyes termodinámicas para identificar los procesos en los que se presentan los fenómenos de transformación de energía y transferencia de calor en sistemas mecatrónicos, que permitan optimizar las operaciones.
- Selecciona, aplica, calibra y opera los instrumentos de medición y control para automatizar los procesos, mediante la configuración y programación adecuada de los mismos.
- Conoce, analiza y aplica lenguajes de programación de controladores lógicos programables para automatizar, mantener y administrar equipos y sistemas.
- Selecciona y utiliza adecuadamente los diferentes instrumentos y/o equipos de medición para la lectura de los diferentes parámetros mecánicos y eléctricos que permitan tener un mejor control en el diseño, instalación y operación de sistemas y dispositivos electromecánicos, de acuerdo con la normativa nacional e internacional.
- Analiza el funcionamiento de las diferentes máquinas eléctricas y realiza una adecuada selección para su aplicación, según el tipo de carga.
- Aplica las leyes y/o principios de la mecánica de fluidos en el análisis de sistemas Mecatrónicos que involucren flujo de fluidos.

Referencias bibliográficas.

Explicación de la tecnología de los compresores de tornillo rotativos. (s. f.). Compair. https://www.compair.com/es-es/technologies/screw-compressor#:~:text=Como%20su%20nombre%20indica%2C%20los,aire%20quede%20atrapado%20entre%20ellos.

El clima en Xaloztoc, el tiempo por mes, temperatura promedio (México) - Weather Spark. (s. f.). Weather Spark. https://es.weatherspark.com/y/6586/Clima-promedio-en-Xaloztoc-M%C3%A9xico-durante-todo-el-a%C3%B1o#:~:text=En%20Xaloztoc%2C%20la%20temporada%20de,m%C3%A1s%20de%207%20%C2%B0C.

Neoattack. (2023, 23 abril). Sistemas de refrigeración industrial: todo lo que necesitas saber. Inditer S.A. https://inditer.es/blog/sistemas-de-refrigeracion-industrial/

R. H. Perry y C. H. Chiton, Chemicai Ergineers ' Handbaok, Sa. ed, Nteva Y ork: McGraw-Hil Book Company, 1973.

Fundación Aquae. (2021, 10 agosto). CP del agua: significado y valores - Fundación Aquae. https://www.fundacionaquae.org/wiki/cp-del-agua/#:~:text=En%20condiciones%20normales%201%20kilogramo,%C2%BAC%20en%20el%20sistema%20internacional.

Masvoltaje.com. (2016, 27 abril). ¿Qué tipos de cables eléctricos existen? Masvoltaje.com. https://masvoltaje.com/blog/analisis-de-productos/tipos-de-cables-electricos-que-existen