



TRABAJO DE DIPLOMA

En opción al Título de Ingeniero en Automática

Autor

Juan Carlos Diaz Almeida

Tutor

MSc. Michel Sanz Pérez

Noviembre, 2023



**UNIVERSIDAD
DE ORIENTE**

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Automática

TRABAJO DE DIPLOMA

Título

Automatización de los compresores del *water chiller* en el sistema de clima de la Planta de Sueros Parenterales de Santiago de Cuba.

Autor

Juan Carlos Diaz Almeida

Tutor (es)

MSc. Michel Sanz Pérez

Noviembre, 2023

Hago constar que el presente Trabajo de Diploma fue realizado en la Universidad de Oriente como parte de la culminación de estudios de la especialidad de Ingeniería en Automática, autorizando a que el mismo sea utilizado por la Institución para los fines que estime convenientes, tanto de forma parcial como total, y que además no podrá ser presentado en eventos, ni publicados sin autorización de la Universidad.

Nombre y firma del autor

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referido a la temática señalada.

Nombre y firma del autor

Nombre y firma del Tutor

Fecha

Nombre y firma del Jefe de Carrera

Fecha

Nombre y firma del Jefe de Departamento

Fecha

Dedicatoria

Dedico este trabajo a todos mis familiares y seres queridos, a aquellos que, en cada etapa de este camino, creyeron en mí incluso cuando yo dudaba de alcanzar esta meta. Cada uno de ustedes, con su apoyo incondicional y amor inquebrantable, han sido una pieza fundamental en este proyecto. Esta dedicatoria es un tributo profundo a su influencia en mi vida. Gracias por estar siempre presentes, este logro es también suyo.

Agradecimientos

Este trabajo da por finalizado todo un ciclo que ha sido un arduo camino lleno de retos, pero que ha valido la pena gracias al apoyo incondicional de tantas personas que han brindado su ayuda. Le doy gracias a Dios, por haberme permitido llegar hasta el final. Quiero expresar mi gratitud primeramente a mi esposa y demás familiares, quienes han sido mi mayor inspiración y fuente de constante apoyo. Su amor incondicional y sus palabras de aliento me han fortalecido en los momentos más difíciles. También quiero agradecer a todos los profesores, cuya dedicación y conocimientos han sido fundamentales en mi formación. Gracias por su paciencia y por guiarme en el camino hacia el aprendizaje y el crecimiento personal. A mis amigos y compañeros de clase, gracias por todos los momentos vividos, por compartir risas, consejos y experiencias. Han sido testigos de mi esfuerzo y han sido un gran apoyo en cada paso de este largo camino. Este trabajo no solo representa el fruto de mi esfuerzo, sino también el reflejo del respaldo de todas las personas que me apoyaron. A todos ustedes, les agradezco sinceramente por ser parte de este capítulo de mi vida y por su constante apoyo.

Listado de imágenes

Figura 1. <i>Water Chiller</i> enfriado por agua.	p.8
Figura 2. Componentes de un <i>water chiller</i> enfriado por aire.	p.9
Figura 3. Flujo tecnológico de un <i>water chiller</i> .	p.13
Figura 4. Empresas pertenecientes a BioCubaFarma.	p.16
Figura 5. Componentes del sistema de clima centralizado de la planta SPGV. a) <i>water chiller</i> enfriado por agua, b) UMA.	p.20
Figura 6. Compresor Hanbell Modelo RB-230B.	p.21
Figura 7. Electroválvula Hirschmann, modelo GDM B12.	p.22
Figura 8. Sensor de temperatura PT100 clase A.	p.23
Figura 9. Bomba de agua refrigerada.	p.23
Figura 10. Bomba de agua enfriamiento.	p.24
Figura 11. Sistema de Control.	p. 24
Figura 12. Torre de Enfriamiento	p. 25
Figura 13. HMI, pantalla principal	p. 31
Figura 14. Mensaje de error del HMI si no se inicia sesión.	p. 32
Figura 15. Ventana de inicio de sesión.	p. 33
Figura 16. Ventana del registro de actividad.	p. 33
Figura 17. Ventana de configuración.	p. 34
Figura 18. Ventana principal en alerta por falla del sistema.	p. 34
Figura 19. Ventana de protecciones del sistema.	p. 35
Figura 20. Ventana de ajuste de temperatura.	p. 35
Figura 21. Ventana de selección del modo de trabajo de los compresores.	p. 36
Figura 22. Ventana de ajustes de seguridad.	p. 36
Figura 23. Comunicación entre el HMI y el PLC.	p. 37
Figura 24. Secuencia de arranque del <i>water chiller</i> .	p. 40
Figura 25. Secuencia de encendido de los sistemas auxiliares.	p. 41
Figura 26. Secuencia de arranque del compresor principal.	p. 42
Figura 27. Secuencia del compresor principal al 25% de capacidad y en espera.	p. 42
Figura 28. Secuencia del compresor principal al 50% de capacidad y en espera.	p. 43

Figura 29. Secuencia del compresor principal al 100% de capacidad y en espera.	p. 44
Figura 30. Secuencia de apagado por temperatura.	p. 45
Figura 31. Secuencia de apagado por falla o detención del proceso.	p. 46
Figura 32. Diagrama GRAFCET del proceso.	p. 47
Figura 33. Algoritmo de control con subrutinas.	p. 48

Resumen

La industria del frío resulta fundamental en la producción y conservación de diversos procesos como los de la industria alimentaria, médica, química, entre otras. En el caso de la industria biofarmacéutica, los indicadores de eficiencia y la reducción de los impactos ambientales, exigen que las soluciones tecnológicas sean sostenibles y garanticen la calidad y la estabilidad de los productos elaborados. Las limitaciones detectadas en el sistema de control de clima de la Planta de Sueros Parenterales de la Empresa Laboratorio Farmacéutico Oriente de Santiago de Cuba justifican la siguiente propuesta de automatización para el control eficiente de los compresores que componen el *water chiller* de este sistema. La solución comprende la programación de un algoritmo eficiente empleando como herramienta el modelado en GRAFCET, así como el diseño de una interfaz que permita la interacción del operador con el proceso. Lo anterior tributa al uso eficiente de los compresores, los cuales garantizan un entorno adecuado e influyen directamente en la productividad, la calidad y la seguridad en los procesos de fabricación. Los beneficios esperados incluyen una mejor planificación de los ciclos de mantenimiento, la prolongación de la vida útil de los equipos empleados en el proceso fabril, el cumplimiento de buenas prácticas de fabricación para asegurar la calidad y la seguridad de los productos farmacéuticos, así como un mejor desempeño en la operación y control de los elementos asociados a esta unidad de clima.

Palabras claves: automatización, compresor, sistema de clima, *water chiller*.

Abstract

The cold industry is essential in the production and conservation of various processes such as those in the food, medical, chemical industries, among others. In the case of the biopharmaceutical industry, efficiency indicators and the reduction of environmental impacts require that technological solutions be sustainable and guarantee the quality and stability of the products produced. The limitations detected in the climate control system of the Parenteral Serum Plant of the Empresa Laboratorio Farmacéutico Oriente in Santiago de Cuba justify the following automation proposal for the efficient control of the compressors that make up the water chiller of this system. The solution includes the programming of an efficient algorithm using GRAFCET modeling as a tool, as well as the design of an interface that allows the operator to interact with the process. The above contributes to the efficient use of compressors, which guarantee an adequate environment and directly influence productivity, quality and safety in manufacturing processes. The expected benefits include better planning of maintenance cycles, extension of the useful life of the equipment used in the manufacturing process, compliance with good manufacturing practices to ensure the quality and safety of pharmaceutical products, as well as a better performance in the operation and control of the elements associated with this climate unit.

Key-words: *automation, compressor, climate system, water chiller.*

ÍNDICE

Listado de imágenes	I
Resumen	III
<i>Abstract</i>	IV
INTRODUCCION	1
CAPITULO 1. Fundamentación teórica para la automatización de los compresores de un <i>water chiller</i>	5
1.1 <i>Water Chillers</i>	5
1.1.1 Principios físicos de funcionamiento	6
1.1.2 Clasificación	7
1.1.3 Componentes	9
1.1.4 Compresores y su clasificación	10
1.1.5 Flujo tecnológico de un <i>water chiller</i>	11
1.2 Aplicaciones en el sector industrial	12
1.2.1 Aplicaciones en la industria farmacéutica	12
1.2.2 Normas del CECMED para sistemas de clima en Cuba	13
1.3 Industria farmacéutica y biotecnológica en Cuba	14
1.3.1 Empresa Laboratorios Farmacéuticos Oriente	15
1.3.2 Flujo Tecnológico de la planta de Soluciones Parenterales de Gran Volumen	16
1.3.3 Sistema de clima de la Planta de Sueros Parenterales	17
1.3.4 Instrumentación	19
1.3.5 Limitaciones tecnológicas en la planta SPGV de la Empresa LBF	24
Conclusiones Parciales	25
CAPITULO 2. Propuesta de automatización para los compresores del <i>Water Chiller</i>	26
2.1 Requisitos de la empresa LBF para la solución	26
2.2 Interfaz Hombre Máquina	27

2.2.1	Criterios de selección de una pantalla HMI	27
2.2.2	Propuesta de pantalla HMI	28
2.2.3	Diseño de pantalla HMI	30
2.2.4	Protocolo de comunicación	35
2.3	Requisitos de los compresores para el algoritmo.....	36
2.4	Diagrama GRAFCET.....	37
2.5	Código LD	47
	Conclusiones Parciales.....	47
	CONCLUSIONES.....	48
	RECOMENDACIONES	49
	BIBLIOGRAFIA	50
	ANEXOS	55

INTRODUCCION

La industria del frío constituye un sector sumamente importante debido a su participación en la producción y conservación de diversos procesos industriales. La cadena de refrigeración es hoy en día un elemento esencial para diferentes sectores como por ejemplo la industria alimenticia, farmacéutica y química. A través de sistemas frigoríficos, de climatización, de enfriamiento, entre otros, es posible operar y configurar diferentes parámetros del proceso industrial en el que se aplica [1].

Los sistemas de climatización son un conjunto de equipos diseñados para controlar las condiciones térmicas (temperatura, humedad y ventilación) y proporcionar confort en espacios interiores, ya sea en entornos residenciales, comerciales, industriales o institucionales. Estos sistemas tienen como objetivo principal garantizar una temperatura adecuada, optimizando el confort térmico y la calidad del aire.

Cada sistema de climatización tiene sus ventajas y consideraciones específicas, como su eficiencia energética, capacidad de enfriamiento o calentamiento, mantenimiento y costos de instalación. La elección del sistema adecuado dependerá de las necesidades y características del entorno a climatizar, así como de factores como el clima local, el tamaño del área y las regulaciones aplicables.

En el sector industrial, los sistemas de climatización desempeñan un papel importante en la creación de un entorno adecuado para garantizar la productividad, la calidad, la seguridad en los procesos de fabricación y la vida útil del equipamiento empleado. Existen tres tipos de aire acondicionado industrial, estos son: unidades tipo paquete, enfriadores de agua y Sistemas de Volumen Refrigerante Variable (VRF, por sus siglas en idioma inglés) [2], [3].

Un enfriador de agua, en lo adelante *water chiller* por su tan conocido término en idioma inglés, es un sistema de refrigeración que utiliza el agua como refrigerante para enfriar diferentes procesos industriales, equipos o sistemas. Ofrece numerosas ventajas, como la capacidad de enfriar grandes volúmenes de agua de manera eficiente y controlada, proporcionando una temperatura constante según las necesidades del proceso industrial. Además, permite una mayor precisión en el control de la temperatura, lo que es esencial para aplicaciones sensibles en la industria farmacéutica, alimentaria, química y de fabricación en general. Su historia

está marcada por una evolución constante desde su introducción en el siglo XIX. Estos equipos de refrigeración han demostrado ser indispensables en una amplia gama de industrias, permitiendo mantener temperaturas estables y proteger equipos y procesos sensibles al calor [4], [5].

Hoy en día, estos sistemas son una parte fundamental de muchos procesos industriales y comerciales. Sus aplicaciones son diversas, desde la refrigeración de grandes instalaciones hasta la climatización de espacios pequeños. Además, su importancia en términos de sostenibilidad y conservación de energía ha llevado a una mayor investigación y desarrollo en este campo, con el objetivo de mejorar aún más su eficiencia y reducir su impacto ambiental.

El sector farmacéutico, es una de las áreas que más se beneficia del empleo de los sistemas *water chiller*. Se utilizan para controlar procesos claves como, por ejemplo: producción de medicamentos líquidos y sólidos, fabricación de vacunas, conservación de muestras biológicas o productos sensibles a la temperatura, y control de la temperatura en sistemas de climatización de laboratorios y salas limpias. La principal ventaja de ello radica en la capacidad de mantener una temperatura constante y precisa, lo que garantiza la calidad y la estabilidad de los productos farmacéuticos. Igualmente, al regular la temperatura del agua, se evitan fluctuaciones que inciden en la eficiencia de los procesos y en la integridad de los productos y pueden ser más ecológicos y eficientes energéticamente que otros sistemas de climatización. Es importante destacar que los *water chiller* utilizados en el sector farmacéutico deben cumplir con estándares y regulaciones específicas, como las buenas prácticas de fabricación, para asegurar la calidad y la seguridad de los productos farmacéuticos [6], [7], [8].

En la Empresa Laboratorios Farmacéuticos Oriente de Santiago de Cuba, perteneciente al Grupo Empresarial BioCubaFarma, se cuenta con cuatro unidades productivas, que a su vez, albergan cinco líneas de producción farmacéuticas, avaladas con Licencia Sanitaria de Operaciones Farmacéuticas que otorga el Centro para el Control Estatal de Medicamentos, Equipos y Dispositivos Médicos (CECMED) [9], [10]. Dichas unidades son:

1. Comprimidos Orales (genéricos y naturales)
2. Soluciones Concentradas para Hemodiálisis
3. Equipos Médicos (Vendas Enyesadas)
4. Polvos Orales (Sales de Rehidratación Oral)

5. Soluciones Parenterales de Gran Volumen (Sueros)

Esta última, asume mediante la más moderna planta de su tipo en el país, el 60 % de la demanda nacional de sueros de cloruro de sodio (0,9 %) y dextrosa (5, 10 y 30 %) envasados en bolsas plásticas. Al mismo tiempo, tributa al cuadro básico de medicamentos del país, el 100% de las Vendas Enyesadas y de las Sales de Rehidratación Oral (SRO), y garantiza al servicio nefrológico, las soluciones concentradas para hemodiálisis de los tipos acetato (A) y ácida (bicarbonato de sodio), en una red hospitalaria comprendida desde Ciego de Ávila hasta Guantánamo.

Esta empresa utiliza un régimen de trabajo continuo, por lo cual es de primordial importancia mantener los sistemas en óptimo funcionamiento y para esta tarea el sistema *Water Chiller* resulta esencial en la línea de producción de Soluciones Parenterales de Gran Volumen. Un diagnóstico efectuado por especialistas del área de mantenimiento de esta entidad, arrojó que el mismo no trabaja de manera eficiente, por lo que genera un impacto negativo en la fabricación de medicamentos, pudiendo llegar incluso a paralizarse la producción. Como resultado de una avería, el sistema quedó inoperativo y los especialistas lograron una solución temporal que permitiera continuar con algunos procesos claves de la planta de producción. Esta solución temporal se considera altamente ineficiente.

Problema científico:

Limitaciones en el sistema de control de clima actual para el manejo eficiente de los compresores en la empresa Laboratorio Farmacéutico Oriente de Santiago de Cuba.

Objeto de investigación:

Sistema de control de clima centralizado por medio de un *water chiller*.

Objetivo general:

Diseñar y programar un algoritmo eficiente para el control de los compresores de refrigerante en la unidad de clima de la Planta de Sueros Parenterales de la Empresa Laboratorio Farmacéutico Oriente de Santiago de Cuba, así como la interfaz que permita la interacción del operador con el proceso.

Campo de acción:

El algoritmo de control e interfaz hombre máquina de los compresores de refrigerante de un *water chiller*.

Tareas de investigación:

1. Caracterizar desde el punto de vista histórico-gnoseológico los sistemas de clima y su control en general, enfatizando en el sistema actual de la planta de sueros parenterales de Santiago de Cuba.
2. Recopilar y establecer los requisitos funcionales de la instalación de clima en la planta de sueros parenterales de Santiago de Cuba y específicamente en la operación y control de los compresores asociados.
3. Diseñar y verificar a través de la simulación el algoritmo de control empleando diferentes herramientas, así como programar el micro PLC S7 200/CPU224 AC/DC/RELAY.
4. Diseñar y programar la interfaz hombre/máquina para interactuar con el proceso en la pantalla táctil Weintek MT8070iE.
5. Desarrollar un informe donde se explique el trabajo realizado y los resultados obtenidos.

Idea a defender:

El diseño y validación por simulación del algoritmo para el control de los compresores de refrigerante utilizando una interfaz que permita la interacción del operador con el proceso permitirá un uso eficiente de estos.

Métodos:

Los principales métodos empleados durante esta investigación se mencionan a continuación:

- Histórico - lógico en la revisión del estado del arte.
- Hipotético - deductivo en el diseño del algoritmo.
- Simulación en la validación de los resultados.

Estructura de la tesis:

Esta investigación se ha estructurado en Introducción, dos capítulos, conclusiones y recomendaciones. En el capítulo 1 se caracterizan los sistemas de clima y su control en general, enfatizando en el sistema actual de la planta de sueros parenterales de Santiago de Cuba. En el capítulo 2 se exponen los elementos del diseño y verificación a través de modelado y/o simulación del algoritmo de control, así como el diseño y la programación de la interfaz hombre/máquina que se propone para interactuar con el proceso. Finalmente se exponen las conclusiones y recomendaciones derivadas del estudio, así como un conjunto de anexos y la bibliografía empleada que fundamentan la obtención de los resultados.

CAPITULO 1. Fundamentación teórica para la automatización de los compresores de un *water chiller*.

En este capítulo se realiza una caracterización general de los sistemas de climatización centralizada que están compuestos por *water chillers*. Se explicará el principio de funcionamiento de estos sistemas, así como las diferentes clasificaciones en función de los elementos que los componen, haciendo énfasis en el compresor. De igual manera, se mencionarán los diferentes tipos de aplicaciones en el sector industrial, particularmente en la industria farmacéutica. Por último, se describirá el sistema de climatización de la planta de sueros parenterales de la Empresa Laboratorio Farmacéutico Oriente.

1.1 *Water Chillers*

Uno de los componentes más empleados en la industria del frío son los *water chiller*; dispositivos que constituyen un sistema de refrigeración que emplea el agua como refrigerante secundario y son comúnmente empleados en la climatización de grandes entornos, en su mayoría industriales. Su funcionamiento está basado en la eliminación del calor generado en un proceso específico, empleando agua a una temperatura menor con respecto a la que opera dicho proceso. En el ciclo de refrigeración, un *water chiller* emplea procesos físicos de compresión de vapor y de condensación, expansión y evaporación del refrigerante [1], [4].

En dependencia de su aplicación, los *water chillers* pueden presentar diversas características. Para algunos autores [11]–[14], la selección de estos dispositivos por lo general depende de los siguientes parámetros:

- Capacidad de enfriamiento: referida a la cantidad de calor que es capaz de eliminar del agua o del proceso que se está enfriando. Se mide en toneladas de refrigeración.
- Eficiencia energética: es la cantidad de energía que consume para producir una unidad de enfriamiento.
- Temperatura de salida del agua: es la temperatura que sale del *water chiller* después de ser enfriada el agua y puede variar dependiendo del uso específico del dispositivo.
- Presión del agua: fuerza con la que el agua fluye a través del equipo y esta puede ser variable en dependencia de su aplicación.

- Controles y funcionalidades: los *water chiller* modernos suelen contar con sistemas de control avanzados que permiten una configuración precisa de la temperatura, monitoreo en tiempo real y funciones de programación.

1.1.1 Principios físicos de funcionamiento

En el funcionamiento de un *water chiller*, intervienen diversos principios y leyes de la Física que son fundamentales para su correcto funcionamiento. Entre las más importantes se encuentran las siguientes:

1. Primera ley de la termodinámica: El principio de la primera ley de la termodinámica, específicamente la conservación de la energía, se aplica para comprender y controlar la transferencia de energía térmica durante el proceso de enfriamiento. El *water chiller* utiliza el ciclo de refrigeración por compresión de vapor, que se basa en intercambios de energía en forma de calor y trabajo. El calor se extrae del agua o del líquido a enfriar mediante el evaporador, y luego se disipa al entorno a través del condensador. El trabajo se realiza a través del compresor para comprimir el gas refrigerante y mantener el ciclo en funcionamiento. Gracias a la conservación de la energía, estos dispositivos pueden eliminar el calor del agua y mantenerla a una temperatura deseada [15].
2. Ley de los gases ideales: en estos dispositivos, se utiliza un refrigerante gaseoso para extraer el calor del agua. La ley de los gases ideales como la ley de Boyle, la ley de Charles y la ley de Gay-Lussac, establece la relación entre la presión, el volumen y la temperatura de los gases [16]. Son aplicadas para comprender el comportamiento del refrigerante y optimizar el diseño y rendimiento del sistema. Esto es fundamental para controlar y regular el ciclo de refrigeración.
3. Principio de refrigeración por compresión: Se deriva de las leyes de los gases ideales y es fundamental en el proceso de refrigeración. Básicamente establece que cuando un gas se comprime, su temperatura aumenta y cuando se expande, su temperatura disminuye [17]. En estos equipos, el refrigerante se comprime para aumentar su temperatura y luego se expande bruscamente en un evaporador, lo cual provoca una rápida absorción de calor del agua a enfriar.
4. Ley de convección: La convección es el proceso mediante el cual el calor se transfiere entre un fluido y una superficie sólida [18]. Un *water chiller*, utiliza la convección para disipar el calor del condensador, en cuyo interior el refrigerante

gaseoso se enfría y se convierte en líquido gracias al intercambio de calor con el medio ambiente.

1.1.2 Clasificación

Los *water chillers* pueden ser clasificados en dependencia de las características y estructura que presenten en su diseño. De acuerdo a su tipo de condensador estos pueden ser:

- Refrigerados por agua

Suelen operar con una torre de agua externa para enfriar el refrigerante y emplean el agua como medio condensador. Este tipo de sistema de enfriamiento es especialmente útil en aplicaciones industriales donde se requieren capacidades de enfriamiento más altas y mayores eficiencias, ya que pueden producir un rendimiento más constante para su aplicación. Al utilizar agua como medio de enfriamiento, se puede lograr una mayor capacidad de disipación de calor en comparación con los *water chillers* enfriados por aire. Sin embargo, son más complejos y necesitan una fuente de agua adicional constante, por lo que pueden requerir más espacio físico debido a los equipos auxiliares, como torres de enfriamiento y sistemas de almacenamiento de agua [5]. En la Figura 1 se muestra un esquema de un *water chiller* enfriado por agua.

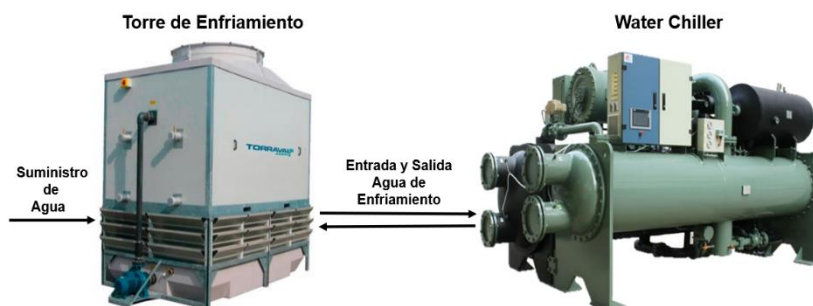


Figura 1. *Water Chiller* enfriado por agua. Fuente: Autor, 2023.

- Refrigerados por aire

Utilizan el aire del ambiente para disipar el calor del refrigerante y comúnmente cuentan con uno o más ventiladores que ayudan a mejorar el intercambio de calor. El aire caliente se expulsa al ambiente exterior y el agua enfriada se redistribuye para su uso en el proceso (Figura 2). Estos dispositivos son comunes en aplicaciones donde no es factible o conveniente utilizar agua para enfriar el sistema como en las áreas, en las cuales la calidad o disponibilidad del agua puede resultar en un inconveniente al sistema. También se emplean para climatizar lugares más

pequeños debido a la simplicidad de instalación y su bajo costo en comparación con los sistemas enfriados por agua. Además de esto, es importante tener en cuenta que el rendimiento y la eficiencia de estos dispositivos pueden verse afectados por las condiciones ambientales, como la temperatura y la humedad del medio ambiente al que se exponen [4].

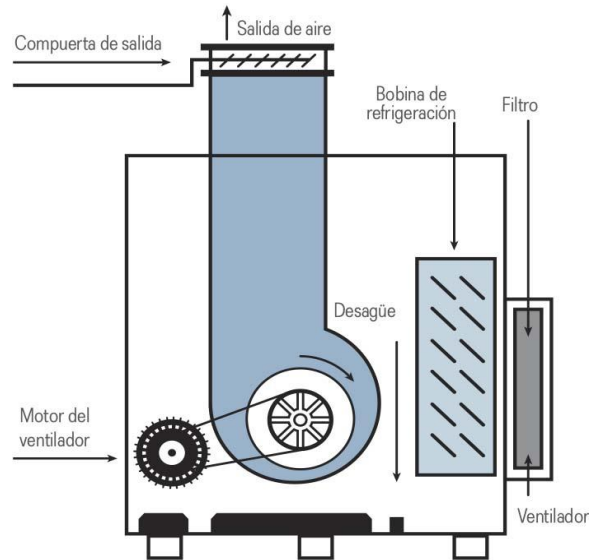


Figura 2. Componentes de un *water chiller* enfriado por aire. Fuente: [19].

De manera general, debido a las diferentes características que pueden presentar, los *water chillers* también pueden clasificarse según su diseño en aplicaciones específicas. Estos están orientados hacia determinados sectores en los que desempeñan un papel esencial, permitiéndoles satisfacer las necesidades de enfriamiento, eficiencia energética y requisitos ambientales del proceso en el que se emplean. A continuación, se mencionan algunos de los tipos de *water chillers* más comúnmente utilizados y sus características esenciales:

- De compresión de vapor: Es el más común dentro de estos tipos de dispositivos. Funcionan según el ciclo de refrigeración por compresión de vapor y utilizan un compresor para comprimir y enfriar el refrigerante, que luego se utiliza para enfriar el agua o el líquido en el sistema [11].
- De absorción: Utilizan un proceso químico para enfriar el agua o el líquido que consiste en la combinación de refrigerante y un fluido absorbente para lograr el enfriamiento [20].
- De placa: Emplean una configuración de placas con canales por los que fluye el refrigerante y los líquidos, y el intercambio de calor entre ellos se produce

a través de ellas. Son compactos, eficientes y se utilizan comúnmente en aplicaciones de refrigeración de baja capacidad [13].

- Por absorción con energía solar: Utilizan la energía solar térmica para generar el calor necesario para el proceso de refrigeración. Son una opción respetuosa con el medio ambiente y pueden ser útiles en lugares donde la energía solar se encuentra fácilmente disponible [21].
- De ciclo inverso: Usa un ciclo de refrigeración de ciclo inverso para proporcionar tanto calefacción como refrigeración. Pueden cambiar entre la producción de calor y la producción de frío según las necesidades del sistema. Esto los hace adecuados para aplicaciones en las que se requiere tanto enfriamiento como calefacción, en edificios comerciales y residenciales [22].
- Por ionización: Los chillers por ionización utilizan la ionización del agua para lograr el enfriamiento. Este proceso implica la separación de los iones positivos y negativos en el agua mediante el uso de campos eléctricos. Al separar los iones, se produce una corriente de agua fría y una corriente de agua caliente. La corriente de agua fría se utiliza para el enfriamiento del sistema [22].

1.1.3 Componentes

Los *water chillers* se conforman por varios elementos que permiten suministrar y mantener la adecuada temperatura de enfriamiento de los procesos industriales; dentro de estos pueden mencionarse los que siguen:

- Compresor: Encargado de comprimir el refrigerante que circula en el sistema, aumentando su temperatura y presión en forma de gas para después enviarlo al condensador. Es considerado el principal componente de los *chillers*.
- Condensador: Permite disipar el calor del refrigerante comprimido y convertirlo en líquido a través del proceso de condensación. Es un intercambiador de calor donde por un lado entra el gas caliente a alta presión y sale líquido con destino al dispositivo de expansión y por el otro lado del intercambiador puede entrar agua para enfriar el refrigerante o bien se hace circular aire por el intercambiador con el mismo propósito.

- Válvula de expansión: Regula la presión del refrigerante hacia el evaporador y lo expande, causando una disminución de su temperatura.
- Evaporador: Su función es absorber el calor del agua caliente u otro fluido que se desea enfriar. A medida que el refrigerante se calienta, se evapora y luego se direcciona nuevamente al compresor.
- Bombas de agua: Mecanismo de potencia empleado para impulsar un flujo continuo de agua a una determinada velocidad y presión. Generalmente estos sistemas cuentan con dos bombas instaladas: una a la entrada, impulsando el líquido hacia el condensador y el evaporador, y otra a la salida del sistema para recircularla al sistema.
- Sistema de control: Es responsable de monitorear y controlar la temperatura y presión del refrigerante y el agua, asegurando que el *chiller* funcione de manera eficiente y segura.

1.1.4 Compresores y su clasificación

Un compresor es una máquina térmica diseñada para elevar la presión de un gas y reducir su volumen [23]. Se utilizan en diversos campos de la ingeniería y son de gran importancia en casi todas las industrias. Uno de los sectores que más se beneficia del uso de los compresores es el mercado de la climatización, en particular los *water chillers* [24], [25].

La literatura especializada [26]–[29] refiere mayormente el uso de dos clasificaciones de compresores para estos dispositivos: los de desplazamiento positivo y los dinámicos. Los compresores de desplazamiento positivo son comúnmente empleados para procesos que requieren altas presiones, como los de la industria petrolera, automotriz y farmacéutica. Por otro lado, los compresores dinámicos o conocidos también como compresores centrífugos, suelen ser más grandes y utilizados en aplicaciones más específicas como en las áreas quirúrgicas de instalaciones médicas, laboratorios químicos y biofarmacéuticos, entre otros.

Otras clasificaciones de compresores, menos empleadas pero presentes en algunos *water chiller*, se mencionan a continuación:

- Compresores de tornillo: Estos compresores proporcionan una alta eficiencia operacional y un nivel silencioso de operación. Los *water chillers* de tornillo son ideales para capacidades de 150 a 550 toneladas de refrigeración y utilizan gas refrigerante ecológico HFC-134 a4. Son una opción popular para

ser utilizados en *chillers* debido a su elevada eficiencia y bajo nivel de ruido [4].

- Compresores scroll: Estos compresores tienen una menor presencia acústica y son más ligeros que los compresores de tornillo.
- Compresores de absorción: Estos compresores utilizan agua como refrigerante ecológico y son ideales para aplicaciones donde se puede utilizar vapor de baja presión o agua caliente.

1.1.5 Flujo tecnológico de un *water chiller*

El flujo tecnológico de un *water chiller* se rige por un proceso secuencial, en el cual el ciclo de refrigeración comienza con la etapa de compresión. En esta, el compresor se encarga de aumentar la temperatura y presión del refrigerante en estado gaseoso. Este proceso es fundamental, ya que garantiza que el refrigerante pueda realizar el intercambio de calor de manera eficiente y propiciar un enfriamiento óptimo en el sistema.

Una vez que el refrigerante ha sido comprimido, se dirige hacia la etapa de condensación, donde se encuentra en un entorno más frío, provocando un proceso de transferencia de calor desde adentro hacia el entorno externo (aire o agua, en dependencia del tipo de *chiller*), permitiendo ello su enfriamiento y nuevamente la condensación en forma de líquido.

Luego de que el refrigerante ha alcanzado su estado líquido a una alta presión, tiene lugar en el proceso la etapa de expansión, donde el mismo atraviesa una válvula de expansión, cuya función es reducir rápidamente la presión del refrigerante, provocando una disminución en su temperatura. Cuando se alcanza el estado de baja temperatura y presión, ingresa al evaporador, donde ocurre la vaporización al entrar en contacto con el agua o líquido a enfriar.

Durante esta etapa, el refrigerante experimenta un cambio de estado de líquido a gaseoso al evaporarse. En este proceso, ocurre un intercambio de calor, en donde el refrigerante absorbe el calor del líquido; permitiendo que este último se enfríe mientras el refrigerante pasa a estado gaseoso. Luego de esta etapa, el refrigerante retorna al compresor para comenzar de nuevo el ciclo de enfriamiento. Este ciclo se repite de manera continua para mantener una temperatura determinada y proporcionar un enfriamiento eficiente y constante en todo el sistema [4], [5].

A continuación, se muestra un esquema en el cual se representa el flujo tecnológico básico de un *water chiller* (Figura 3).

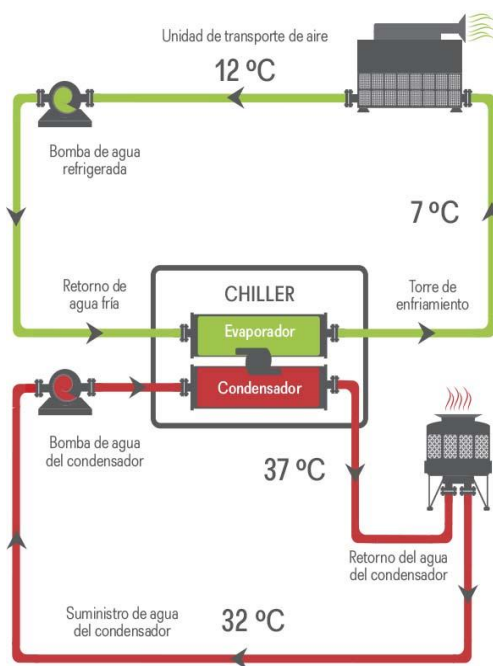


Figura 3. Flujo tecnológico de un *water chiller*. Fuente: [19].

1.2 Aplicaciones en el sector industrial

Los *water chiller* son empleados en una amplia gama de operaciones comerciales. Participan en procesos de impresión, soldadura y corte de materiales, construcción de maquinarias, y son comúnmente empleados en la industria alimentaria, la química, el sector farmacéutico, la industria médica, en centros de telecomunicaciones, en la generación de energía, entre otros. Los *water chillers* industriales son equipos altamente confiables y eficientes y por lo general están diseñados con tecnología de punta, lo cual permite que estos sean capaces de desempeñar su función de manera segura y eficiente.

1.2.1 Aplicaciones en la industria farmacéutica

Debido a su versatilidad y capacidad para mantener la conservación de productos farmacéuticos, la industria farmacéutica es una de las principales beneficiadas. En este caso, la función principal de estos dispositivos es evitar la degradación de los productos y garantizar el cumplimiento de los estándares de calidad y eficacia. Sumado a lo anterior, es común su uso en el control de la temperatura y humedad en las áreas de producción clasificadas y en las denominadas "salas limpias", pues asegura la calidad y estabilidad de los productos que se encuentren en condiciones inadecuadas, pueden comprometer la integridad de los mismos. Otras tecnologías biomédicas beneficiadas con los *water chillers* son los equipos de laboratorio sensibles como espectrofotómetros y cromatógrafos, pues requieren mediciones

precisas y resultados confiables, que solo pueden lograrse mediante el control de la temperatura del sistema de clima de las instalaciones.

La norma ISO 14644-1 es ampliamente utilizada como referencia en la industria farmacéutica y en el caso de esta tecnología, permite asegurar su correcto funcionamiento y establecer los parámetros de temperatura necesarios en las áreas clasificadas. Esta norma además, proporciona directrices detalladas para el diseño, construcción y operación de salas limpias y entornos controlados [30]. En general, las áreas clasificadas en la industria farmacéutica suelen mantenerse dentro de un rango de temperatura controlado, con valores que se establecen según las Buenas Prácticas de Manufactura (BPM) y las regulaciones locales aplicables. Estos valores pueden variar, pero por lo general, se considera que una temperatura controlada se encuentra dentro del rango de 20°C a 25°C [6].

1.2.2 Normas del CECMED para sistemas de clima en Cuba

El Centro para el Control Estatal de Medicamentos, Equipos y Dispositivos Médicos (CECMED) [31] es el organismo regulatorio establecido en Cuba para validar el uso de las producciones de la industria biofarmacéutica y tiene la responsabilidad de garantizar la calidad, seguridad y eficacia de los medicamentos, así como de controlar su fabricación, distribución y comercialización en el país. Este organismo trabaja en estrecha colaboración con otros entes reguladores a nivel internacional para asegurar el cumplimiento de los estándares y disposiciones sanitarias establecidas en la industria farmacéutica a nivel internacional, incluyendo la supervisión de ensayos clínicos, la vigilancia continua de productos una vez que están en el mercado, las inspecciones para asegurar el cumplimiento de buenas prácticas, la liberación de lotes de productos y la expedición de licencias para establecimientos relacionados, entre otros. De este modo, se garantiza que los medicamentos y dispositivos médicos disponibles en el mercado cumplan con estándares de calidad y seguridad, y proporcionen información precisa a los profesionales de la salud y a los pacientes.

Las regulaciones establecidas por el CECMED en el caso de las “Buenas Prácticas para la fabricación de productos farmacéuticos”, y particularmente la Regulación 16 de 2012 (disposición 6.10; 6.17 y 6.43), detalla las condiciones y normas a cumplir para los sistemas de climatización [9], [32]. A continuación, se muestran los parámetros de las temperaturas establecidos en ella para las áreas clasificadas (Tabla 1)

Tabla 1. Valores establecidos por el CECMED para parámetros del clima

Parámetros	Valor Nominal	Rango
temperatura de agua fría en la entrada de la manejadora	12 °C	± 4 °C
temperatura de agua fría en la salida de la manejadora	17 °C	± 4 °C
temperatura en las salas de las áreas clasificadas C y D	22 °C	± 2 °C

1.3 Industria farmacéutica y biotecnológica en Cuba

En la década de 1960, se estableció en Cuba la industria farmacéutica, cuya misión principal era crear una sólida infraestructura para la producción de medicamentos y formar a profesionales del área de la salud. Se priorizaba con ello el desarrollo de la medicina preventiva y a su vez, la producción de medicamentos que cumplieran con las necesidades de salud de toda la población cubana y también el encargo exportador [33], [34]. Durante este período, se reconoció la importancia de tener un control de calidad centralizado y normalizado para la producción farmacéutica y biotecnológica. Como resultado de esto, se crea el Centro para el Control Estatal de Medicamentos, Equipos y Dispositivos Médicos (CECMED).

En el año 2012, producto de la reorganización empresarial y de acuerdo con el modelo económico cubano [35], se fundó el Grupo de Industrias Biotecnológicas y Farmacéuticas de Cuba, conocido como BioCubaFarma. Esta entidad estatal integra todas las empresas de los sectores biotecnológico y farmacéutico del país. La Organización Superior De Desarrollo Empresarial (OSDE) BioCubaFarma se encarga de producir medicamentos, equipos y servicios de alta tecnología basados en el desarrollo científico y técnico del país. Su objetivo principal es mejorar la salud de la población cubana y generar bienes y servicios exportables, incluyendo tecnologías avanzadas en la producción de alimentos [34], [36].

Actualmente, este grupo empresarial está compuesto por 32 empresas con 110 líneas de producción y 391 proyectos de inversión. Para ello se nutre de 21 unidades de ciencia y técnica, organizadas bajo el principio de una empresa de ciclo cerrado que abarca todas las etapas de producción, desde la investigación hasta la comercialización. BioCubaFarma fabrica 525 de los 849 fármacos que conforman el cuadro básico de medicamentos del Ministerio de Salud Pública de

Cuba y tiene 802 registros sanitarios en el extranjero, además de exportar sus productos a 48 países (Figura 4).



Figura 4. Empresas pertenecientes a BioCubaFarma. Fuente: [37].

Puede afirmarse que Cuba se ha convertido en un líder mundial en la producción de medicamentos innovadores y tratamientos para diversas enfermedades, gracias a las importantes inversiones en investigación y desarrollo en los campos de biotecnología y farmacología [38]. Sus instituciones cuentan con recursos humanos altamente calificados y reconocidos a nivel internacional. Muchos de sus productos están patentados y registrados en diversos mercados, lo que demuestra la calidad y competitividad de sus proyectos. BioCubaFarma impulsa la inversión extranjera directa en Cuba, especialmente en la Zona Especial de Desarrollo Mariel, contribuyendo significativamente al crecimiento de este sector a través de un marco regulatorio, que favorece a empresas extranjeras interesadas en invertir en instalaciones de investigación [34], [36], [39].

1.3.1 Empresa Laboratorios Farmacéuticos Oriente

La Empresa Laboratorios Farmacéuticos Oriente (LBF) pertenece al grupo BioCubaFarma y fue inaugurada el 21 de diciembre de 1976 y actualmente se dedica a la producción y comercialización de medicamentos, productos naturales y equipos médicos de la industria farmacéutica del país [40]. Su misión es contribuir a la salud y bienestar de la sociedad, elaborando productos farmacéuticos de elevada calidad, que estén garantizados por una fuerza de trabajo calificada y éticamente comprometida. Además, mantiene una política integrada de gestión, conforme con los requisitos establecidos en las Buenas Prácticas de Producción Farmacéuticas [32], las Normas ISO 9000, ISO 14000 e ISO 18000 de acuerdo a las legislaciones cubanas vigentes y otros requisitos aplicables en materia de medio ambiente, seguridad y salud en el trabajo.

La empresa cuenta con un total de dos plantas especializadas instaladas en la provincia, en las cuales existen cinco líneas de producción farmacéuticas avaladas con la Licencia Sanitaria de Operaciones Farmacéutica que otorga el CECMED, y se mencionan a continuación:

1. Comprimidos orales (Tabletas).
2. Soluciones concentradas para Hemodiálisis.
3. Equipos médicos (Vendas enyesadas).
4. Polvos orales (Sales de Rehidratación Oral).
5. Soluciones Parenterales de gran volumen (Sueros).

Esta entidad tiene como responsabilidad social producir y tributar al cuadro básico de medicamentos del país, el 100% de las vendas enyesadas y de las Sales de Rehidratación Oral (SRO), el 17% de los surtidos en forma de tabletas, el 50% de las soluciones concentradas para hemodiálisis, el 75 % de las Soluciones Parenterales de Gran Volumen (SPGV) en bolsas plásticas, que se distribuyen en el país y un porcentaje de la producción destinado a la exportación.

1.3.2 Flujo Tecnológico de la planta de Soluciones Parenterales de Gran Volumen

Las soluciones parenterales son soluciones líquidas que contienen nutrientes, medicamentos y otros componentes esenciales que se administran directamente en el torrente sanguíneo de un paciente [41]. Estas se fabrican en laboratorios especializados y siguen estrictas normas de calidad y de cumplimiento con los estándares y regulaciones establecidos por las autoridades sanitarias correspondientes.

Los procesos de producción de soluciones parenterales pueden variar de acuerdo al flujo tecnológico que presente la planta de producción de estos, pero en general siguen un conjunto de pasos que son fundamentales para garantizar la calidad y seguridad de las soluciones parenterales. La Planta de Soluciones Parenterales de Gran Volumen (SPGV) de Santiago de Cuba, fue inaugurada el 20 de julio de 1988 en la sede principal de LBF Oriente y su proceso de fabricación se realiza de la siguiente manera:

1. Recepción de materia prima: El laboratorio recibe los insumos necesarios para la fabricación de las soluciones parenterales, como principios activos, excipientes y materiales de envasado. Estos materiales deben ser verificados y almacenados adecuadamente.

2. Preparación de la formulación: Se realiza la preparación de la formulación de la solución parenteral. Esta etapa implica la mezcla de los principios activos y excipientes en las proporciones adecuadas, siguiendo las especificaciones establecidas en la fórmula maestra.
3. Filtración y esterilización: Una vez preparada la formulación, se realiza la etapa de filtración y esterilización para eliminar cualquier microorganismo presente en la solución. Este proceso se lleva a cabo mediante técnicas de filtración, calentamiento o irradiación.
4. Envase y etiquetado: Una vez esterilizada la solución, se procede a su envasado en contenedores apropiados, como ampollas, viales o bolsas plásticas, previamente esterilizadas. Asimismo, se realiza el etiquetado con la información necesaria, como nombre del producto, dosis, fecha de elaboración, fecha de vencimiento, entre otros.
5. Inspección de calidad: Se realizan controles de calidad exhaustivos para verificar la seguridad, calidad y estabilidad de las soluciones parenterales producidas. Estos controles incluyen pruebas físicas, químicas y microbiológicas, así como la evaluación de la estabilidad del producto a lo largo de su vida útil.
6. Almacenamiento y distribución: Una vez aprobadas las soluciones parenterales, se almacenan en condiciones adecuadas de temperatura y humedad, para preservar su estabilidad. Las temperaturas de almacenamiento suelen oscilar entre 10-15°C. Posteriormente, se distribuyen a través de la cadena de suministro, siguiendo las regulaciones y normativas establecidas por los organismos reguladores del país.

1.3.3 Sistema de clima de la Planta de Sueros Parenterales

Durante el proceso de fabricación de sueros parenterales, la temperatura del entorno de producción y de almacenamiento representa una de las variables cruciales que influyen en la calidad del producto final. El sistema de enfriamiento en este tipo de plantas es el encargado de propiciar las óptimas condiciones ambientales para las etapas del proceso productivo. Los *water chiller* por excelencia, desempeñan un papel esencial en la realización de esta tarea, pues son equipos diseñados específicamente para controlar y mantener una temperatura específica, garantizando la calidad de los sueros, la estabilidad ambiental en la que se producen y optimizan los tiempos de producción.

El *water chiller* es el componente responsable de generar y suministrar el agua fría necesaria para el enfriamiento del aire. Esta se distribuye a través de tuberías a una Unidad Manejadora de Aire (UMA), donde es utilizada por la bobina de enfriamiento para enfriar el aire que se dirige hacia las instalaciones. De esta forma, permite que la temperatura en los locales se mantenga constante, lo cual es esencial para evitar efectos no deseados de degradación de los productos debido a temperaturas inadecuadas. Todo esto favorece además el funcionamiento eficaz y preciso de los equipos que intervienen directamente en la fabricación de los sueros parenterales. Particularmente, la planta de SPGV en cuestión, cuenta con un sistema de clima centralizado para toda la planta conformado por un *water chiller* y una UMA como se muestra en la Figura 5 (Anexo 1).



a)



b)

Figura 5. Componentes del sistema de clima centralizado de la planta SPGV. a) *water chiller* enfriado por agua, b) UMA. Fuente: Autor, 2023.

El sistema de clima de la planta de SPGV también suministra aire frío a las siguientes áreas:

- Desinfección de manos.
- Secadora.
- Autoclave de ropas.
- Doblado de ropas.
- Laboratorio de Control.
- Cambio de ropas de mujeres y hombres.
- Impresora plástica.
- Taller de mantenimiento.
- Lavandería.
- Local de fabricación de bolsas plásticas.

El *water chiller* del sistema en cuestión tiene una capacidad de 140 toneladas de refrigeración (Anexo 2). Está compuesto por dos compresores que operan en paralelo: uno considerado como el principal y actualmente constituye el de mayor capacidad, y otro como secundario, empleado para auxiliar al primero. El compresor principal mantiene un régimen de trabajo constante, estando operativo de manera continua, sin interrupciones, para satisfacer las necesidades de refrigeración requeridas en el proceso a lo largo de toda la producción. El compresor secundario tiene un régimen de trabajo más reducido, pues solo es utilizado en momentos específicos de alta demanda, es decir, cuando se requiere una mayor capacidad de enfriamiento durante los horarios de máxima producción o consumo. Esto permite optimizar el rendimiento y la eficiencia energética del *water chiller*, utilizando el compresor secundario de manera puntual para cumplir con determinadas condiciones.

1.3.4 Instrumentación

La unidad de clima de la planta está compuesta por un *water chiller* híbrido, del tipo refrigerado por agua, el cual se compone por los siguientes elementos:

Compresores de tornillo del tipo semihermético (2 unidades):

- Fabricante: Hanbell Precise Machinery CO.
- Modelos: RC2-260B y RC2-320B.
- Números de serie: 3M 216 y 3M 440.
- Fecha de fabricación: 2003.
- Peso: 545 y 600 kg respectivamente.
- Lubricante: Suniso 5GS.
- Capacidad: 65 y 75 toneladas de refrigeración respectivamente.
- Descripción: Los compresores semiherméticos de doble tornillo Hanbell están desarrollados especialmente para aplicaciones en aire acondicionado y refrigeración (Anexo 4). Con un diseño integrado de alta carga operativa, cuentan con motores de alta eficiencia que disponen de un arranque estrella-delta. Los rotores de tornillo están diseñados de acuerdo a las características del gas refrigerante con el que trabaja (R-22). Presentan control dual de capacidad en forma continua o discreta de 4 etapas, del 25% al 100% para ambos casos, con válvulas solenoides de fácil instalación. Permiten un fácil mantenimiento y reparación,

trabajan a un bajo nivel de ruido y una mínima vibración. En la Figura 6 se representa uno de estos compresores.



Figura 6. Compresor Hanbell Modelo RB-230B. Fuente: [42].

Electroválvulas Solenoides

- Modelo: GDM B12.
- Fabricante: Hirschmann.
- Tipo: Solenoide.
- Material de fabricación: Acero inoxidable.
- Descripción: Dispositivo del tipo normalmente cerrado, que se utiliza para controlar el flujo de fluidos, como agua, gas o aceite, en sistemas hidráulicos o neumáticos, regular su presión y permitir diferentes caudales en dependencia de su configuración. También cuenta con diferentes tipos de conexiones, entre ellas de roscas y bridas, para facilitar su instalación.

El *water chiller* cuenta con un total de 8 electroválvulas de este tipo, 4 dispuestas en cada compresor, de las cuales una se utiliza para controlar el paso del refrigerante y la otras 3 son empleadas en el control de capacidad de los compresores. En la Figura 7 se muestra una de estas electroválvulas utilizadas en el *chiller*.



Figura 7. Electroválvula Hirschmann, modelo GDM B12. Fuente: Autor, 2023.

Sensores de Temperatura:

- Fabricante: GRM Válvulas e Instrumentación.
- País: España
- Tipo: Pt100 de inmersión.
- Clase: A.
- Rango de medida: -50 a 400 °C.
- Elemento sensor: Platino.
- Presión: Max. 40 bar.
- Material de la sonda: acero inoxidable.
- Material de la carcasa: aluminio.
- Protección: IP54.
- Descripción: Es un tipo de termorresistencia muy común y expandido en las industrias, gracias a su confiabilidad. Tienen una precisión alta y cumplen con las especificaciones de la norma IEC 60751. Estos modelos tienen una resistencia de 100 ohmios a 0°C con una tolerancia de $\pm 0.15^{\circ}\text{C}$ o $\pm 0.06^{\circ}\text{C}$ en un rango de temperatura desde -200°C a 850°C lo cual la hace idónea para este tipo de aplicaciones.

Para medir la temperatura del agua a la entrada y a la salida del *water chiller* se emplean 2 sensores de temperatura de este tipo (Figura 8).



Figura 8. Sensor de temperatura PT100 clase A. Fuente: [43].

Bomba de Agua Refrigerada (Figura 9).

- Fabricante: Siemens
- Potencia 15.5 kW
- Frecuencia 60 Hz
- Tensión 440-480 V
- Corriente máxima 30 A



Figura 9. Bombas de agua refrigerada. Fuente: Autor, 2023.

Bomba de Agua de Enfriamiento

- Fabricante: Siemens
- Potencia 25.3 kW
- Frecuencia 60 Hz
- Tensión 440-480 V
- Corriente máxima 43 A



Figura 10. Bomba de agua enfriamiento. Fuente: Autor, 2023.

Sistema de control:

Compuesto por (Anexo 4):

- 1 PLC S7-200 CPU 224 AC/DC/RELAY.
- 1 módulo de expansión de entradas y salidas digitales EM222 RELAY.
- 1 módulo de expansión de entradas y salidas analógicas EM235.

El modelo de autómatas instalado posee una rápida capacidad de procesamiento. Es capaz de manejar hasta 14 entradas digitales y 10 salidas digitales incorporadas, sin embargo, estas se pueden ampliar mediante el uso de módulos de expansión como los mencionados anteriormente. Se alimenta con una tensión

alterna (AC) de 110 V, posee una salida de corriente continua (DC) de 24 V y las salidas tienen conexión a relé libre de potencial. Estos dispositivos se encuentran conectados en un panel de control como se muestra en la Figura 11.



Figura 11. Sistema de Control. Fuente: Autor, 2023.

Además de los elementos mencionados anteriormente, el sistema también cuenta con:

- Reconocimiento del funcionamiento de la bomba de agua de enfriamiento.
- Reconocimiento del funcionamiento de la bomba de agua congelada.
- Relé de anti congelación.
- Relé de Alta Presión de los compresores.
- Relé de Baja Presión de los compresores.
- Supervisor de línea de los compresores.
- Relé de sobrecarga de los compresores.
- Protección por falta de aceite en los compresores.
- Torre de enfriamiento marca MITA (Figura 12).



Figura 12. Torre de Enfriamiento. Fuente: Autor, 2023.

1.3.5 Limitaciones tecnológicas en la planta SPGV de la Empresa LBF

Esta empresa constituye una Unidad Docente de la Universidad de Oriente, amparada por convenios de colaboración en el área de Investigación y Desarrollo (I+D). La interacción con especialistas de esta empresa permitió conocer un conjunto de limitaciones de tipo tecnológico que enfrentaba la planta de SPGV desde finales de septiembre y principios de octubre del año 2022. Concretamente, se reportó la ocurrencia de una avería en la Interfaz Hombre-Máquina (HMI, del inglés *Human-Machine-Interface*), dañándose de forma irreparable e impidiendo monitorear los parámetros más importantes y el ajuste del *water chiller*. Debido a esto, el sistema de clima quedó inoperable. Además, el personal de mantenimiento quedó sin acceso al programa en el PLC por las restricciones de seguridad que tenía. Esta situación conllevó a la paralización de la producción de soluciones parenterales por un periodo de una semana. Los compromisos asumidos por esta importante planta de producción y la necesidad de cumplir con los volúmenes pactados, conllevó a implementar una solución temporal y básica "desde cero" en el PLC que, si bien garantizó el funcionamiento de los compresores y la pronta puesta en marcha de la planta, no tuvo en cuenta los siguientes requisitos:

- La rotación de los compresores.
- El modo de trabajo en mantenimiento.
- El conteo de horas de trabajo para el mantenimiento programado.

Actualmente, la planta no cuenta con un HMI que permita la interacción del Operario con dicho sistema. Esta situación provoca que el sistema de clima actual sea considerado ineficiente, presentando los siguientes inconvenientes:

- No contar con una seguridad que regule las acciones solo al personal cualificado y de un registro de las actividades que guarde el historial de acciones.
- Trabajar con un valor de temperatura deseada que no se puede ajustar.
- Ausencia de la visualización de temperaturas de entrada y salida del agua refrigerada, de las posibles fallas del sistema, así como de un indicador que muestre el estado del proceso.
- Falta de un registro de las horas de trabajo de cada compresor para el mantenimiento programado.

Conclusiones Parciales

El estudio realizado arroja resultados que quedan resumidos en las siguientes conclusiones:

- Se caracterizaron los sistemas de clima *water chiller* desde una perspectiva histórico-gnoseológica, analizando su principio de funcionamiento, clasificación y control en general, enfatizando en el sistema actual de la planta de SPGV en Santiago de Cuba.
- Fueron identificadas y recopiladas las limitaciones tecnológicas en la instalación de clima de la planta de SPGV de Santiago de Cuba, teniendo en cuenta las normas del CECMED para la industria farmacéutica y la operación y control de los compresores asociados.
- Se realizó un estudio de la instrumentación presente en la planta.

CAPITULO 2. Propuesta de automatización para los compresores del *Water Chiller*.

En el presente capítulo se realiza una propuesta de automatización de la planta SPGV, teniendo en cuenta los requerimientos planteados por la empresa LBF Oriente, con el objetivo de solucionar las problemáticas existentes. De esta forma se presenta una propuesta de pantalla HMI y su diseño, así como una descripción del proceso mediante un diagrama Grafcet, brindando una representación visual detallada. Finalmente, se realiza la programación del controlador en lenguaje de programación *Ladder Diagram* (LD), donde se muestra parte de la solución a los problemas encontrados en la planta SPGV.

2.1 Requisitos de la empresa LBF para la solución

La importancia de los procesos productivos en la empresa LBF Oriente en un sector estratégico como el de la salud pública, obliga a asegurar un funcionamiento óptimo de todas sus instalaciones y garantizar la calidad de los procesos que en ella se ejecutan. Lo que justifica que sean implementadas medidas enfocadas a la mejora continua y que garanticen la eficiencia y calidad en toda la planta.

Basado en ello, la empresa demanda mejorar el funcionamiento actual del sistema de clima y reincorporar las antiguas prestaciones del mismo estableciendo los siguientes requerimientos para aceptar la propuesta de automatización:

- Se debe emplear el mismo PLC que se encuentra actualmente instalado en la planta.
- La nueva interfaz en un HMI debe ser compatible con dicho PLC y permitir la interacción del operador con el proceso.
- La programación del PLC debe brindar la posibilidad de intercambiar los compresores para equilibrar la cantidad de horas de trabajo de estos.
- Garantizar el conteo de las horas de trabajo durante el proceso de producción para el mantenimiento programado.

Teniendo en cuenta las necesidades y desafíos en términos de seguridad y eficiencia de la planta de SPGV de la empresa en cuestión, se analizaron los requerimientos y se analizaron las problemáticas presentes mediante el diálogo con los operarios y el personal calificado. Además, se llevó a cabo un estudio sobre la tecnología empleada y un diagnóstico general de la instrumentación existente en la

planta. Todo con el objetivo de que la solución propuesta cumpla con todas las condiciones demandadas por la entidad.

2.2 Interfaz Hombre Máquina

Un Interfaz Hombre-Máquina, conocido como HMI (por sus siglas en inglés), es un sistema que permite la interacción entre un operador humano y una máquina o sistema automatizado. Es la interfaz a través de la cual el ser humano puede controlar y monitorear las funciones y operaciones de la máquina.

El objetivo principal de un HMI es facilitar la comunicación y la visualización de información entre el usuario y la máquina. Esto se logra a través de una combinación de elementos, como pantallas táctiles, botones, perillas, indicadores, gráficos, gráficos de barras, alarmas y otras representaciones visuales. El HMI permite al usuario enviar comandos y recibir retroalimentación de la máquina. Esto puede incluir tareas como iniciar o detener una operación, ajustar configuraciones, monitorear el estado del sistema, revisar datos y recibir alertas o notificaciones[5], [44], [45].

2.2.1 Criterios de selección de una pantalla HMI

Los criterios de selección para una pantalla pueden variar según las necesidades y requisitos específicos de cada aplicación [46], [47]. Sin embargo, existen algunos aspectos claves que deben considerarse al elegir una pantalla adecuada:

1. **Tamaño y resolución:** Se debe elegir un tamaño de pantalla que se ajuste al espacio disponible y que permita una visualización clara de la información. Además, la resolución de la pantalla debe ser lo suficientemente alta para mostrar gráficos, imágenes y textos de manera nítida.
2. **Funcionalidad y capacidades táctiles:** Se debe verificar si la pantalla HMI es táctil u ofrece botones físicos adicionales para complementar la interacción táctil, de modo que facilite la interacción del usuario y permita una navegación intuitiva.
3. **Conectividad:** Es de vital importancia saber si la pantalla HMI es compatible con los protocolos de comunicación requeridos para el sistema. Esto incluye opciones como Ethernet, USB, RS-232, RS-485, entre otros. La conectividad adecuada es esencial para la comunicación y el intercambio de datos con otros dispositivos conectados.
4. **Durabilidad y condiciones ambientales:** Se debe evaluar si la pantalla HMI está diseñada para soportar las condiciones ambientales en las que se utilizará. Si

se emplea en entornos industriales, debe ser resistente al polvo, la humedad, los productos químicos y las vibraciones. Además, verificar si la pantalla tiene una clasificación de protección IP (*Ingress Protection*) adecuada.

5. Software y programación: La configuración y la programación deben ser accesibles y ajustarse a las necesidades del sistema, ya sea a través de un entorno de programación basado en software o mediante un lenguaje específico.
6. Costo: Por último, se evalúa el costo de la pantalla HMI en relación con su calidad, funcionalidad y durabilidad. Se comparan diferentes opciones en el mercado y se elige la que mejor se adapte al presupuesto sin comprometer la calidad y el rendimiento que demanda la aplicación.

Al considerar estos criterios de selección, se prevé que la pantalla HMI satisfaga las necesidades específicas y proporcione una interacción efectiva entre el operador y la planta.

2.2.2 Propuesta de pantalla HMI

Un estudio de vigilancia tecnológica, referido a soluciones de interfaz para supervisión de procesos realizado por [45], resume los principales fabricantes, características y prestaciones de pantallas compatibles con el autómata Simatic S7-200. A partir de la revisión bibliográfica y de este propio estudio, se resumen las diferentes opciones comerciales de pantallas HMI (Tabla 2).

Tabla 2. Tabla comparativa de pantallas HMI.

Modelo de Pantalla	Software	Simulación en línea	Precio/Proveedor (USD)
KTP700 DP BASIC	Bajo licencia	si	1040-1455
Delta DOP-B03E211	Bajo licencia	no	300-450
CGHMI 4	Bajo licencia	no	800
Pro-Face GP37W2	Bajo licencia	no	600-800
Weintek MT8070iE	Libre	si	100-250

Los datos aportados en la tabla anterior, permiten estimar que el modelo de pantalla más atractivo es Weintek MT8070iE, teniendo en cuenta que presenta un software libre, con capacidad de simulación en línea, cumple con los requisitos demandados por el cliente y que es la opción más económica. Por tanto, es el modelo escogido para desplegar la propuesta de automatización.

Particularmente esta pantalla HMI ha sido considerada parte de este estudio, por ser una de las mejores opciones para controlar y supervisar sistemas automatizados, lo cual la hace adecuada para entornos industriales exigentes como la industria biofarmacéutica. Entre las prestaciones más importantes, se destacan:

1. Pantalla: Cuenta con una pantalla táctil panorámica TFT LCD de 7 pulgadas con una resolución de 800x480 píxeles, a todo color con retroiluminación LED. Proporciona una interfaz intuitiva y fácil de usar.
2. Conectividad: Tiene puertos de comunicación como RS232, RS485 y Ethernet para conectarse a otros dispositivos y sistemas de control. También es compatible con varios protocolos de comunicación, como Modbus RTU/TCP, FTP, SNMP, etc.
3. CPU: Está integrada por un potente CPU RISC de 600 MHz que le permite admitir una red de hasta 64 dispositivos.
4. Memoria: Cuenta con una memoria interna de 128 MB para almacenar proyectos o datos y 128 MB de RAM DDR2. También es posible expandir la memoria utilizando una tarjeta SD.
5. Funciones: Ofrece una amplia gama de funciones, entre ellas: alarmas, registros de datos, recetas, temporizadores, gráficos y más. También ofrece seguridad de contraseña en tiempo de ejecución para hasta 128 cuentas de usuario con 14 niveles de acceso. Además, permite la creación de pantallas personalizadas y la programación de macros para automatizar tareas.
6. Software: Utiliza el software *EasyBuilder Pro* para diseñar y configurar la interfaz de usuario. Este software proporciona una amplia variedad de herramientas y opciones para crear pantallas personalizadas y programar funciones avanzadas.
7. Robustez: Está diseñada para operar en entornos industriales exigentes. Cuenta con una carcasa resistente y cumple con los estándares de protección IP65 para resistencia al polvo y al agua.

La HMI se puede adquirir a través de proveedores y terceros como son: Alibaba, AliExpress, Rodavigo, Amazon y Automatismos y procesos [48]–[49].

2.2.3 Diseño de pantalla HMI

El diseño del HMI requiere del empleo del *EasyBuilder Pro* (versión 6.08.01.622), que es el *software* de diseño de pantallas utilizado específicamente con los HMI de la marca Weintek. Ofrece una amplia gama de herramientas y funciones que permiten diseñar interfaces personalizadas y atractivas para la visualización y control de los sistemas de automatización. Una vez que se completa el diseño de la pantalla en *EasyBuilder Pro*, se puede simular el proyecto y establecer la conexión con el PLC desde la computadora sin necesidad de una pantalla física (Anexo 5). En caso de contar con la pantalla, los archivos de proyecto se transfieren al dispositivo HMI Weintek, donde se cargan y ejecutan para mostrar la interfaz visualmente agradable y funcional.

La realización del diseño se concretó de conjunto con la participación del personal de mantenimiento implicado en el departamento de mantenimiento, hasta obtener un diseño final aprobado por el cliente y que se muestra a continuación (Figura 13).

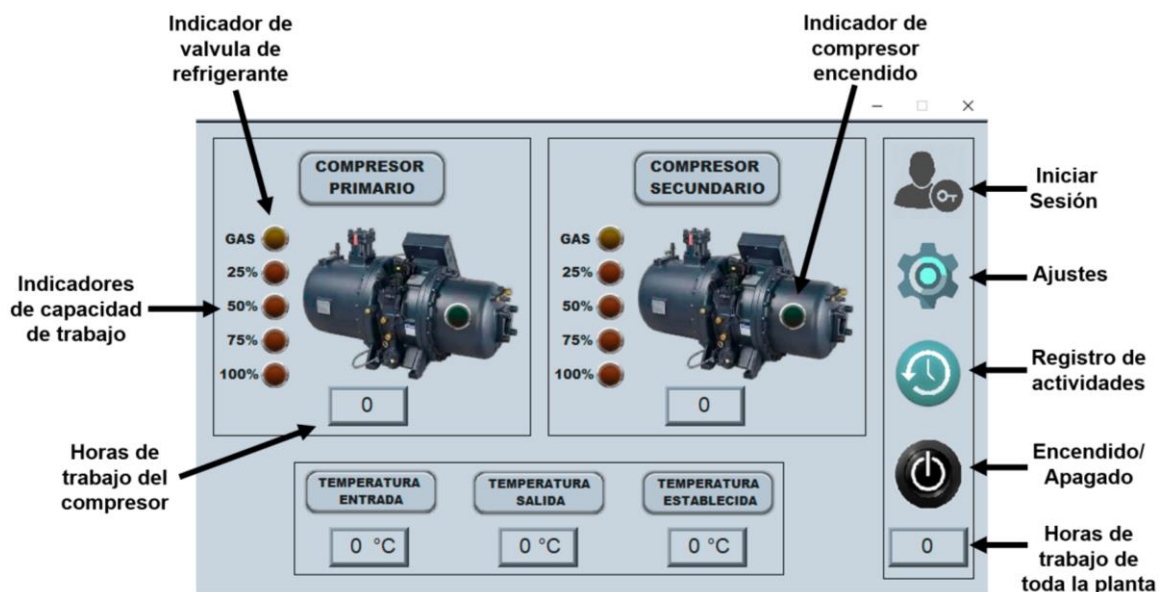


Figura 13. HMI, pantalla principal. Fuente: Autor, 2023.

En la figura anterior puede comprobarse que los elementos de la pantalla principal, se dividen en dos grupos: indicadores de lectura o estados y botones

Los indicadores de lectura o estados comprenden:

- Indicadores lumínicos para mostrar estado de los compresores (encendido/apagado, estado de la válvula de refrigerante y capacidad a la que se encuentran trabajando).

- Horas de trabajo de cada compresor y de la planta en general.
- Valores de temperatura (el establecido en la configuración y los que se miden a la entrada y salida del *chiller*).

Por otro lado, se cuenta con 4 botones, colocados en una columna a la derecha de la pantalla, 3 que direccionan a una nueva ventana y el botón de encendido y apagado, que funciona como un interruptor del proceso.

El botón de inicio de sesión, permite al operador registrar su usuario y contraseña, para poder iniciar el proceso o realizar cualquier operación. En caso de no haberse registrado, la interfaz no permitirá realizar ninguna operación y lo indicará a través de un mensaje de error como se muestra en la Figura 14.

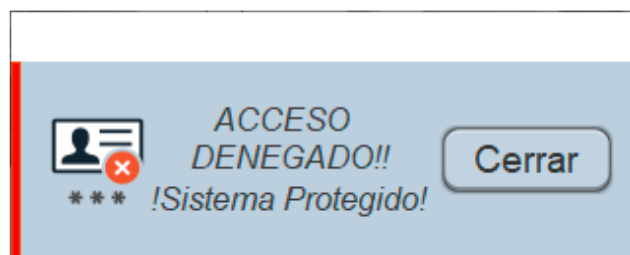


Figura 14. Mensaje de error del HMI si no se inicia sesión. Fuente: Autor, 2023.

Una vez seleccionado el icono de inicio de sesión, se abre una ventana nueva, y se brindan las opciones de elegir usuario, ya sea administrador (libre acceso a todas las configuraciones) u operador (acceso limitado a algunas configuraciones). Esta ventana también le permitirá cerrar sesión en el caso que así se requiera (Figura 15).



Figura 15. Ventana de inicio de sesión. Fuente: Autor, 2023.

El botón de registro de actividad despliega una nueva ventana que incluye un historial de todas las actividades, dígame: inicios de sesión, junto con su fecha, hora y las respectivas operaciones realizadas, así como las fallas que se puedan

producir. La capacidad de borrar el historial se reserva solo al administrador, siendo este el responsable de acuerdo a su conocimiento y experiencia, de evaluar la pertinencia de mantener o eliminar ciertos registros (Figura 16).



Tiempo	Nombre usuario	Fecha	Comentario
15:57:01	admin	10/30/23	
15:56:59	admin	10/30/23	ON/OFF
15:56:58	admin	10/30/23	ON/OFF
15:56:58	admin	10/30/23	ON/OFF
15:56:58	admin	10/30/23	ON/OFF
15:56:57	admin	10/30/23	ON/OFF
15:56:57	admin	10/30/23	ON/OFF
15:56:56	admin	10/30/23	
15:56:55		10/30/23	
15:56:54		10/30/23	
15:56:50		10/30/23	
23:30:04	admin	10/29/23	
23:30:02	admin	10/29/23	
23:29:22	admin	10/29/23	
23:29:21		10/29/23	
23:29:20		10/29/23	
23:27:49		10/29/23	
23:27:43		10/29/23	
23:26:33	admin	10/29/23	

Figura 16. Ventana del registro de actividad. Fuente: Autor, 2023.

Por último, se cuenta con un botón de configuración, donde se despliega una ventana con 4 botones como se muestra en la Figura 17.



Figura 17. Ventana de configuración. Fuente: Autor, 2023.

El botón de protecciones ofrece la posibilidad de acceder a una nueva ventana donde se muestra la ubicación en la que se haya producido una o varias fallas. Si se produce alguna falla, la ventana principal mostrará un indicador de advertencia (Figura 18), alertando al operador sobre dicha situación. Para obtener información

más detallada sobre las fallas, se accede a la ventana de protecciones del sistema (Figura 19).

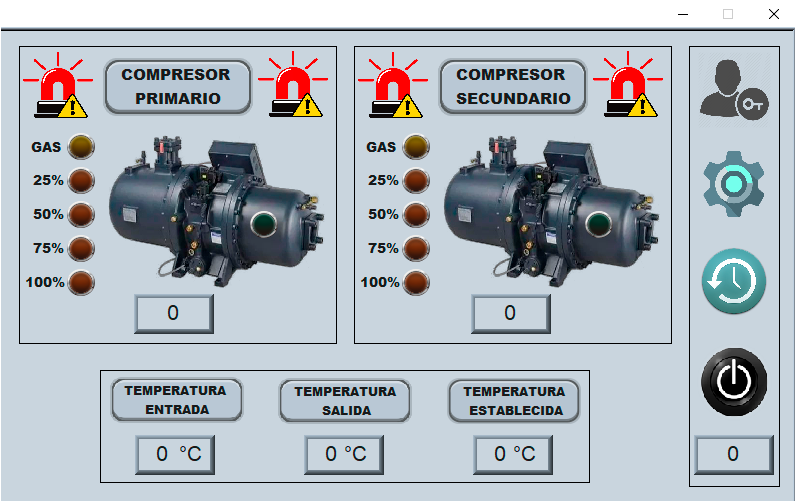


Figura 18. Ventana principal en alerta por falla del sistema. Fuente: Autor, 2023.



Figura 19. Ventana de protecciones del sistema. Fuente: Autor, 2023.

El botón de temperatura permite acceder a la configuración de la temperatura que se desea establecer a la salida del *water chiller*, en el agua refrigerada (Figura 20).

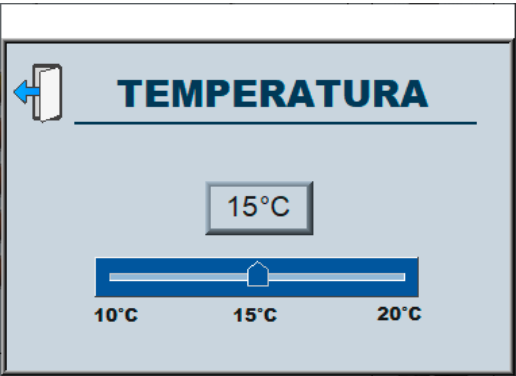


Figura 20. Ventana de ajuste de temperatura. Fuente: Autor, 2023.

El botón de compresores, permite acceder a una ventana en la que se pueden elegir dos modos de trabajo:

- Normal: Se tienen en cuenta los dos compresores trabajando en paralelo.
- Ajuste: Es un modo de trabajo en el que un solo compresor se ocupa de todo el proceso, recomendable solo durante el mantenimiento de uno de los dos compresores.

Además de esto, la ventana permite seleccionar cuál de los compresores trabajará como principal, y cuál trabajará como secundario (Figura 21).

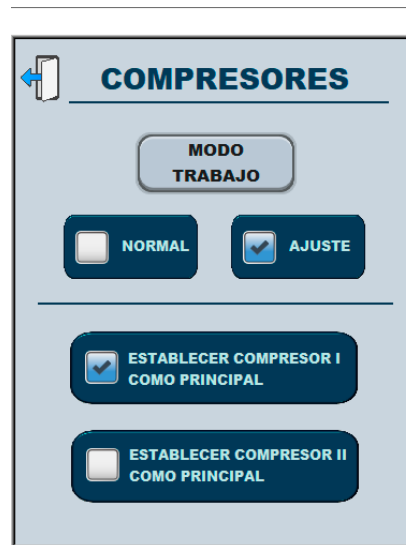


Figura 21. Ventana de selección del modo de trabajo de los compresores.

Fuente: Autor, 2023.

El botón de seguridad permite al administrador tomar decisiones relacionadas con las restricciones del sistema para los usuarios que interactúan con el proceso. Al presionar este botón, se abre una ventana que ofrece diferentes opciones y configuraciones que el administrador puede ajustar según sea necesario. Estas opciones incluyen: restricciones de ciertas funciones o acciones para los usuarios, establecer permisos en términos de datos o acciones permitidas, agregar cuentas, entre otras. En resumen, el botón de seguridad brinda al administrador el control total sobre las restricciones y configuraciones del HMI, otorgándole la capacidad de garantizar la seguridad y cumplimiento de políticas dentro del sistema (Figura 22).

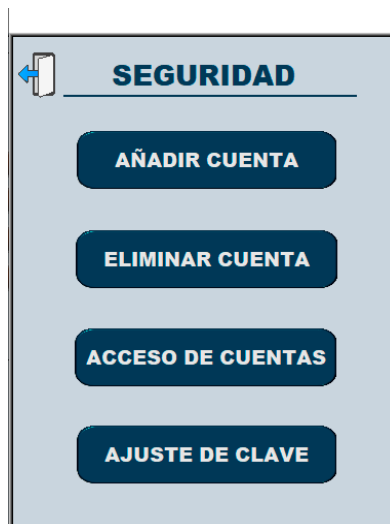


Figura 22. Ventana de ajustes de seguridad. Fuente: Autor, 2023.

2.2.4 Protocolo de comunicación

El protocolo para comunicación existente entre el HMI y el autómatas es el *Interface Point to Point* (PPI, por sus siglas en inglés). En este modo de comunicación se puede supervisar al PLC S7-200 a través de un estándar de comunicación que se denomina RS-485. La velocidad de transmisión de datos va de 0.3 a 187.5 kbits/s, aunque las más usadas son 9.6; 19.2 y 187.5 kbits/s y para esta aplicación se eligió la velocidad de 9.6 kbits/s.

Este protocolo contempla dos tipos de dispositivos de red:

- Los maestros: pueden enviar una petición a otros dispositivos.
- Los esclavos: solo pueden responder a las peticiones de los maestros, sin poder lanzar nunca una petición por su propia cuenta.

En este caso, la pantalla HMI actúa como el maestro y el PLC como el esclavo. La comunicación se establece como muestra a continuación la Figura 23:



Figura 23. Comunicación entre el HMI y el PLC. Fuente: Autor, 2023.

2.3 Requisitos de los compresores para el algoritmo

Selección del compresor principal:

El *water chiller* de la planta de SPGV cuenta con dos compresores. El compresor 1, de mayor capacidad, es el principal y el compresor 2, de menor capacidad es el secundario. Una de las limitaciones tecnológicas actuales, es la incapacidad para alternar el orden de prioridad de los compresores. Sin embargo, con la implementación de un HMI y un algoritmo específico, es posible resolver este problema. Al permitir que el compresor 2 sea el principal y el compresor 1 el secundario en el momento deseado, se logrará una mayor flexibilidad y eficiencia en el funcionamiento de la planta. El algoritmo, por otro lado, permite equilibrar las horas de trabajo entre los diferentes compresores, lo que evitaría el desgaste y mantenimiento frecuente del compresor 1. En conjunto, la implementación de esta solución permitirá mitigar la limitación actual y mejorar el desempeño del sistema de clima.

Control de capacidad de trabajo de los compresores:

La capacidad de trabajo de los compresores instalados en el sistema de clima de la planta de SPGV, se puede regular a través de válvulas de control. Cuando estas están en posición cerrada, el compresor funciona a plena capacidad. Cuando una de las válvulas se abre, la longitud efectiva de trabajo de los rotores disminuye, reduciéndose así la capacidad. El exceso de gas es devuelto al lado de aspiración del compresor [50]. Estos compresores presentan dos métodos para regular su capacidad:

Sistema de ajuste de capacidad continuo: Utiliza una electroválvula proporcional normalmente cerrada y una electroválvula normalmente abierta. Mediante este método, el sistema puede ajustar la capacidad dentro del rango de 25%-100% de forma continua. La capacidad de trabajo se ajusta a partir del 25% mediante el control de la electroválvula proporcional, en dependencia de su apertura.

Sistema de ajuste de capacidad discreto: Utiliza tres electroválvulas normalmente cerradas que posibilitan el ajuste de capacidad de cuatro escalones (25%, 50%, 75% y 100%). Cada electroválvula tiene un porcentaje de apertura fijo, de este modo, para el ajuste de capacidad de trabajo, solo se necesita tener una de estas abiertas.

El método de ajuste de capacidad de los compresores que está instalado en la planta, es el de cuatro escalones, además de que los mismos no cuentan con la

electroválvula proporcional normalmente cerrada que posibilitaría la aplicación del otro método.

Control de capacidad de los compresores mediante el método discreto:

En el momento que el compresor arranca, la carga del sistema es muy elevada y la temperatura del agua congelada es bastante alta. Esto provoca que el sobrecalentamiento del lado de baja presión y la sobrecarga del compresor puedan fácilmente accionar el interruptor de protección por sobrecarga del motor del compresor y hacer que se detenga el proceso por falla. A fin de prevenir este fenómeno, la máquina debe arrancarse de acuerdo con la siguiente secuencia establecida por su fabricante [50]:

1. Arrancar con un 25% de capacidad y mantener esta carga durante 3 minutos.
2. Luego se aumenta la capacidad hasta un 50%, manteniéndose otros 3 minutos espera.
3. A continuación, se aumenta la capacidad en este caso a un 75% y se aguardan nuevamente 3 minutos.
4. Finalmente, se alcanza el 100% de su capacidad.

Analizando la secuencia anterior se puede observar que después de un estimado de 9 minutos desde que el compresor arranca, este habrá alcanzado su máxima capacidad. Sin embargo, es importante destacar que el compresor solo puede trabajar al 100% de capacidad durante un máximo de 7 minutos, luego de los cuáles deberá volver al 75% y esperará otros 7 minutos antes de volver al 100%.

Este procedimiento descrito es válido tanto para el momento de arranque como cuando el compresor ya está en marcha y requiere disminuir su capacidad porque la temperatura del agua congelada es muy baja, disminuye su capacidad por ejemplo al 50% y no puede pasar al 75% hasta que haya trabajado durante al menos 3 minutos, en 50% de capacidad (Anexo 6).

2.4 Diagrama GRAFCET

El uso de un diagrama GRAFCET es fundamental debido a su capacidad para representar gráficamente las diferentes etapas y transiciones del proceso de manera clara y ordenada. Esta herramienta visual es ampliamente utilizada en la automatización de procesos industriales y puede mejorar de manera significativa la eficiencia y coordinación de las tareas involucradas.

Para la realización del diagrama GRAFCET de este proceso, fue necesaria la creación de variables que identificasen las etapas y transiciones utilizadas. A

continuación, se muestran los nombres de estas etapas y transiciones, con su significado (Tabla 3):

Tabla 3. Nombres de las etapas y transiciones del diagrama GRAFCET

Etapas/Transiciones	Comentarios
RUN	Sistema encendido y sin fallas
Sistemas Aux.	Macro etapa de encendido de los sistemas auxiliares
Falla	Sistema en Falla
OK	Sistema sin fallas listo para siguiente etapa
OFF	Apagar sistema
Compresor1_on/off	Compresor 1 encendido/ apagado
Compresor2_on/off	Compresor 2 encendido apagado
Temp	Temperatura de <i>set point</i>
Temp_off_C1/ Temp_off_C2	Temperatura de apagado de compresores
Off_temp	Macro etapa apagado por temperatura
Arranque_C1/ Arranque_C2	Macro etapas de arranque de compresores
V25_C1/ V25_C2	Compresor 1 o 2 al 25% de capacidad
V50_C1/ V50_C2	Compresor 1 o 2 al 50% de capacidad
V75_C1/ V75_C2	Compresor 1 o 2 al 75% de capacidad
V100_C1/ V100_C2	Compresor 1 o 2 al 100% de capacidad
Up_C1_25/Up_C2_25	Establecer capacidad al 25%
Up_C1_50/Up_C2_50	Aumento de capacidad al 50%
Up_C1_75/Up_C2_75	Aumento de capacidad al 75%
Up_C1_100/Up_C2_100	Aumento de capacidad al 100%
Down_C1_25/Down_C2_25	Bajar capacidad al 25%
Down_C1_50/Down_C2_50	Bajar capacidad al 50%
Down_C1_75/Down_C2_75	Bajar capacidad al 75%
Tmin.C1_100/Tmin.C2_100	Tiempo mínimo de espera antes de volver a trabajar al 100%
TMax_C1_100/TMax_C2_100	Tiempo máximo que un compresor puede trabajar al 100%

El proceso de arranque del *water chiller* en cuestión, comienza con una verificación previa al arranque. Antes de encender, es importante realizar una revisión de todos los sistemas auxiliares para asegurarse de que todos los componentes estén en buen estado de funcionamiento. Esto implica hacer una inspección visual de los niveles de refrigerante, la disponibilidad de agua de enfriamiento y asegurarse de que todos los interruptores de seguridad y válvulas estén en la posición correcta (Anexo 7).

Una vez que se ha completado este procedimiento, se realiza el ajuste inicial desde el HMI, lo cual incluye:

- Establecer temperatura de trabajo deseada a la salida del agua congelada del *water chiller*.
- Seleccionar cuál será el compresor principal durante todo el proceso de trabajo.

Realizado esto, se procede a encender el *water chiller* a través del botón de inicio en el HMI. Si se ha presionado el botón de inicio y en el sistema no está activa ninguna alarma por fallas, la planta pasa a modo “RUN”, con lo cual inicia todo el proceso de arranque del *water chiller* (Figura 24).

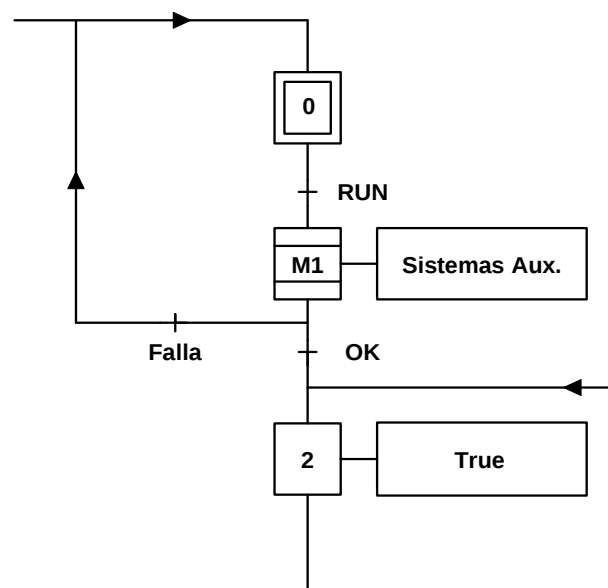


Figura 24. Secuencia de arranque del *water chiller*. Fuente: Autor, 2023.

El primer paso en el proceso de arranque conlleva el encendido de sistemas auxiliares (Figura 25), lo cual comprende:

- 1- Arranque de la torre de enfriamiento.
- 2- Arranque de la bomba de agua de enfriamiento.
- 3- Arranque de la bomba de agua congelada.

Una vez encendidos estos equipos, el sistema comprueba el correcto funcionamiento de estos dos últimos, así como la circulación del flujo de agua. En caso de que existiese alguna falla en este punto, se activaría una alarma de error, se apagarían los equipos encendidos hasta ese momento y se volvería al estado inicial.

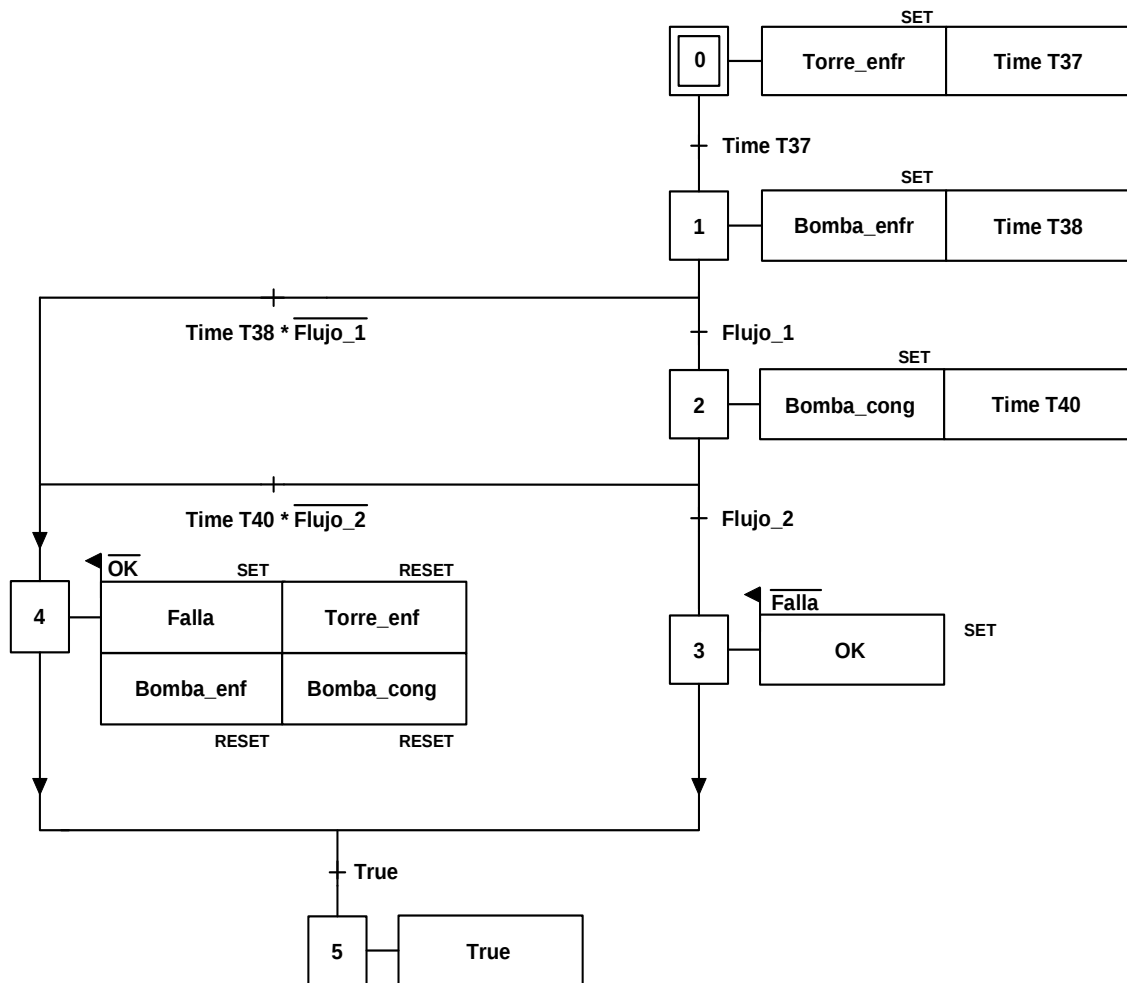


Figura 25. Secuencia de encendido de sistemas auxiliares. Fuente: Autor, 2023.

Si el funcionamiento es correcto, se pasa a la siguiente etapa con el arranque de los compresores.

Antes de arrancar el compresor principal, se comprueban los siguientes parámetros:

- 1- El compresor a encender esta apagado.
- 2- No se ha detectado ninguna falla en el sistema.
- 3- No se ha mandado a apagar.
- 4- La temperatura del agua congelada a la salida del *water chiller* es superior a la temperatura que se desea, fijada en el HMI.

Luego de confirmar que se cumplen estas condiciones, se siguen los siguientes pasos (Figura 26):

- 1- Abrir la válvula del 25% de capacidad y esperar 5 segundos.
- 2- Abrir válvula de refrigerante (R22) y esperar 5 segundos.

- 3- Activar contactor magnético común y contactor magnético estrella, para arranque suave y esperar 7 segundos.
- 4- Desactivar contactor magnético estrella y activar contactor magnético delta (esto ocurre de manera simultánea).

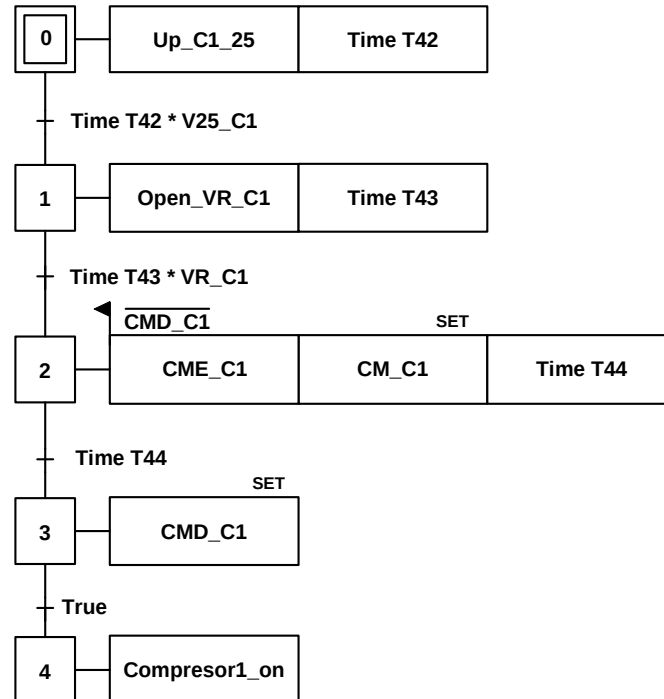


Figura 26. Secuencia de arranque del compresor principal. Fuente: Autor, 2023.

De este modo, el compresor principal pasa al estado de encendido y trabajando a un 25% de su capacidad total. Luego de esto, se espera un tiempo aproximado de 3 minutos, antes de comparar la temperatura del agua congelada con la temperatura que se desea. Transcurrido este tiempo, se obtiene una de las siguientes condiciones (Figura 27):

- La temperatura medida es mayor a la establecida en el HMI, el compresor principal está listo para aumentar su capacidad al 50%.
- La temperatura medida es igual a la establecida en el HMI, el compresor principal permanece en este régimen de carga hasta que la temperatura cambie en cualquier dirección.
- La temperatura medida es menor a la establecida en el HMI, se activa una función de apagado por temperatura que se explicará más adelante.

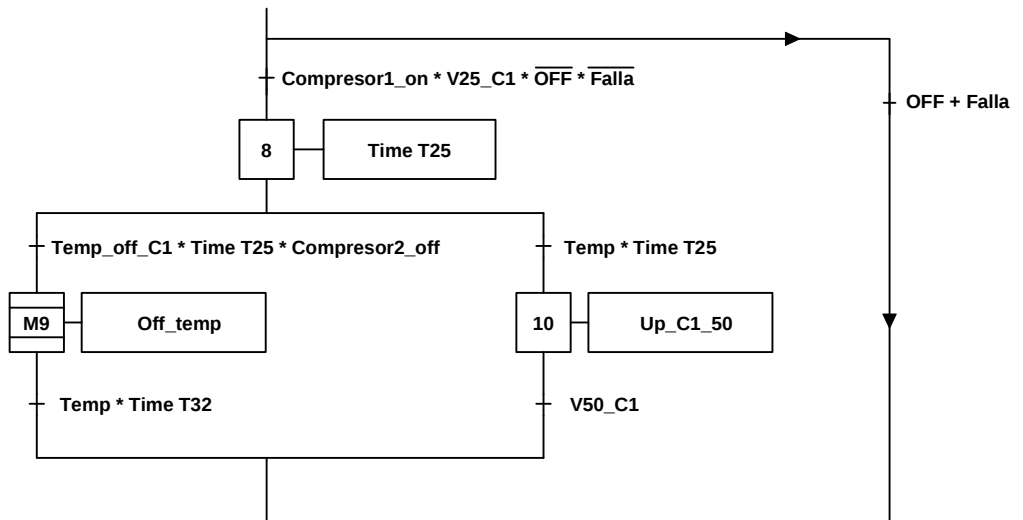


Figura 27. Secuencia del compresor principal al 25% de capacidad y en espera.

Fuente: Autor, 2023.

Si se cumple la primera opción, el compresor principal aumenta su carga al 50% de capacidad y verifica si:

- No se ha detectado ninguna falla.
- No se ha recibido una orden de apagar la planta.

En caso de cumplir con estas condiciones, el compresor mantendrá un régimen de carga del 50% durante 3 minutos adicionales. Después de este tiempo, se realizará nuevamente una comparación entre la temperatura medida del agua congelada y la temperatura deseada establecida en el HMI, repitiendo la misma secuencia que en la etapa anterior. Sin embargo, en esta ocasión, si la temperatura medida es menor que la temperatura establecida en el HMI, el compresor reducirá su capacidad al 25% (Figura 28).

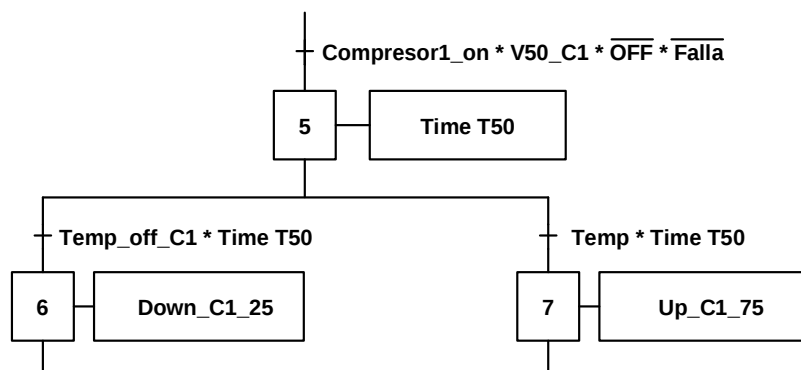


Figura 28. Secuencia del compresor principal al 50% de capacidad y en espera.

Fuente: Autor, 2023.

El proceso descrito anteriormente se aplica de manera similar para las etapas de carga del compresor principal del 75% y 100%. En el caso de la etapa del 100% de

capacidad, esta se mantendrá activa hasta que se cumpla una de las siguientes condiciones:

- La temperatura medida sea menor que la establecida en el HMI.
- Transcurridos 7 minutos, que es el tiempo máximo que puede un compresor trabajando a su máxima capacidad.

En cualquiera de los dos casos mencionados, el compresor reducirá su capacidad al 75%. Sin embargo, si el compresor ha alcanzado el tiempo máximo de funcionamiento en carga del 100% de capacidad, no volverá a entrar en esta etapa hasta que hayan transcurrido al menos 7 minutos. Este periodo de espera es necesario para proteger los compresores, independientemente de la medición de temperatura que se esté obteniendo. Posteriormente, el compresor podrá volver a funcionar al 100% de carga (Figura 29).

Si el compresor principal está encendido al 100% de capacidad y se cumplen cada una de las siguientes condiciones:

- No se han detectado fallas.
- No se ha mandado a detener el proceso.
- La temperatura medida a la salida del agua congelada sigue siendo mayor a la establecida en el HMI.
- El Compresor secundario está apagado.
- Transcurrieron 3 minutos.

Entonces, el sistema se encuentra preparado para iniciar el arranque del compresor secundario.

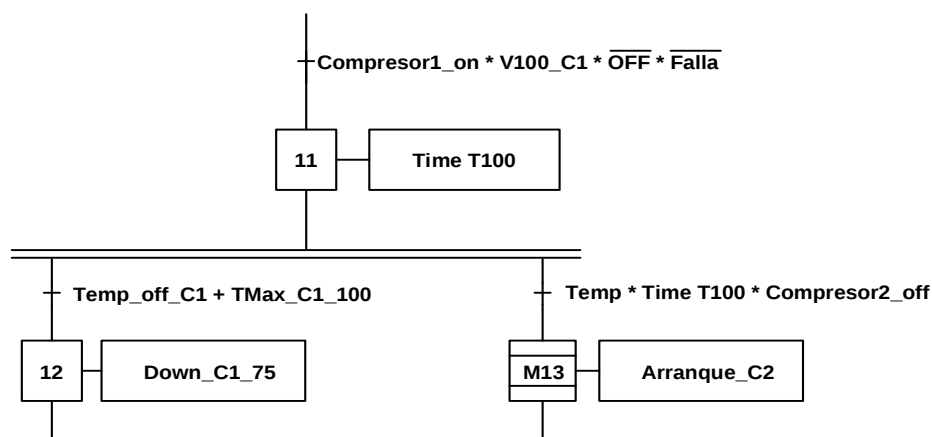


Figura 29. Secuencia del compresor principal al 100% de capacidad y en espera.

Fuente: Autor, 2023.

El proceso de arranque del compresor secundario es similar al del compresor principal, pero con la particularidad de que el secundario debe cumplir previamente con todas las condiciones mencionadas anteriormente. Con respecto a la escalada a través de los distintos niveles de carga del compresor secundario, sigue el mismo algoritmo utilizado en el compresor primario.

Apagado por temperatura:

En el caso de que la temperatura medida sea inferior a la establecida desde el HMI, comienza una apagado secuencial, reduciendo la capacidad de trabajo de ambos compresores, si llegado al 25% de capacidad del compresor secundario, la temperatura sigue siendo baja, se procede al apagado del compresor secundario por temperatura, en tanto que el compresor primario espera que se cumplan las condiciones:

- Compresor secundario ya está apagado
- La temperatura sigue siendo baja

En ese caso, también se apaga el compresor principal (Figura 30). Una vez apagados los compresores por temperatura, no podrán volver a encender hasta pasados 10 minutos, por cuestiones de protección. Independientemente de que la temperatura ya sea superior a la establecida en el HMI. Cumplido ese tiempo, el sistema vuelve a iniciarse, comenzando por las etapas que ya se han descrito anteriormente.

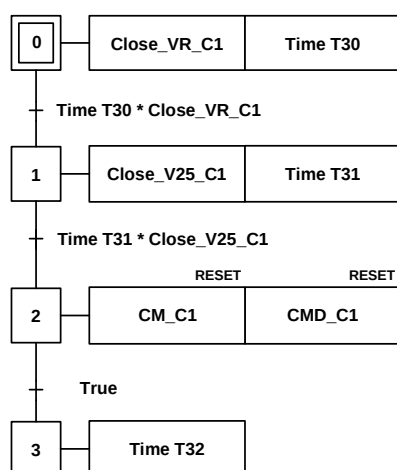


Figura 30. Secuencia de apagado por temperatura. Fuente: Autor, 2023.

Apagado por falla o por detención el proceso:

Si en cualquier etapa del proceso, se recibe una falla, o se manda a apagar el sistema, el proceso entra en una fase de apagado con el siguiente orden (Figura 31):

- 1- Cerrar las válvulas de capacidad de carga de los compresores hasta llegar al 25% de capacidad.
- 2- Desconectar el contactor magnético común de cada compresor.
- 3- Desconectar el contactor magnético delta de cada compresor
- 4- Cerrar válvula de refrigerante, válvula del 25% de capacidad y esperar 10 segundos.
- 5- Una vez apagado el compresor principal, secundario y cumplido los 10 segundos, apagar bomba de agua de enfriamiento y esperar 5 segundos.
- 6- Cumplidos los 5 segundos, apagar bomba de agua congelada y esperar 5 segundos.
- 7- Luego de transcurrido los 5 segundos, apagar torre de enfriamiento y esperar 10 minutos antes de permitir que se vuelva a encender el sistema.

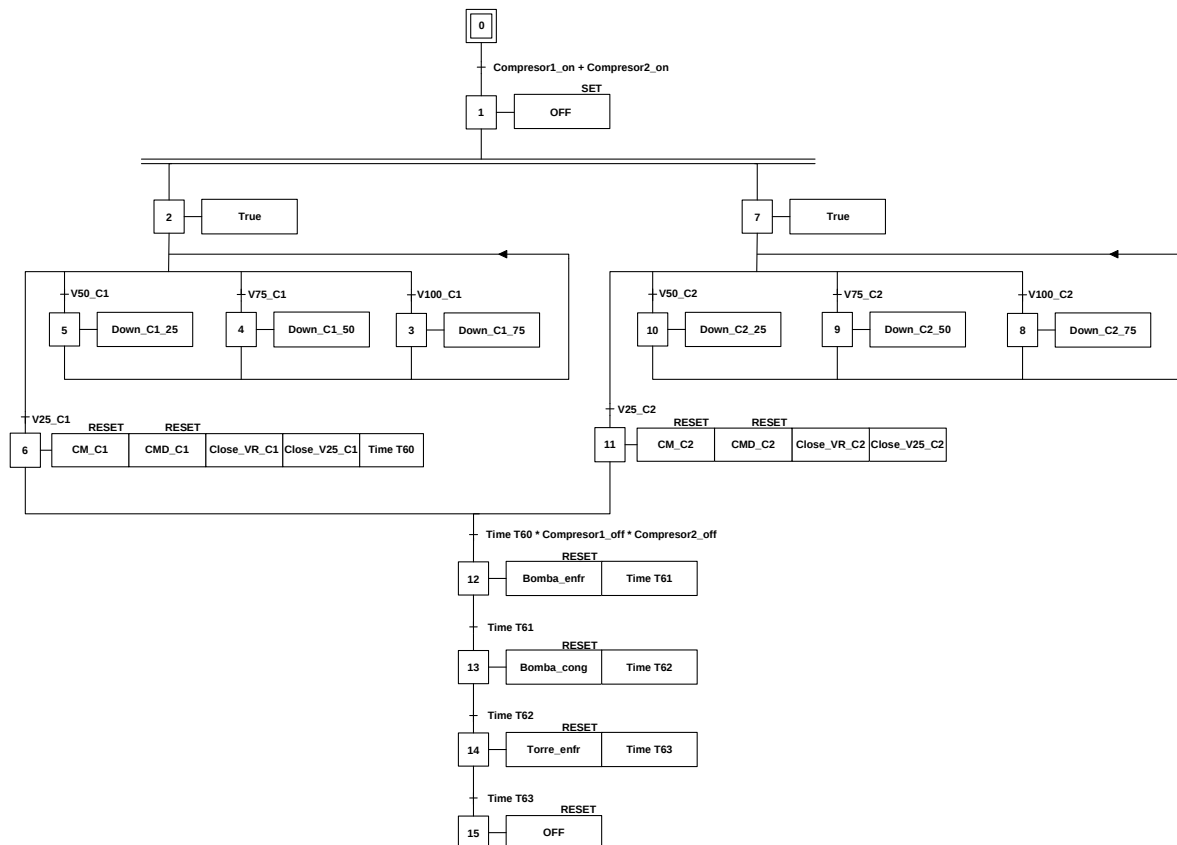


Figura 31. Secuencia de apagado por falla o detención del proceso. Fuente:

Autor, 2023.

A continuación, se muestra en la Figura 32 un diagrama GRAFCET general de todo el proceso, el cual muestra de manera visual toda la secuencia y condiciones de activación, proporcionando así una mayor comprensión del proceso en general.

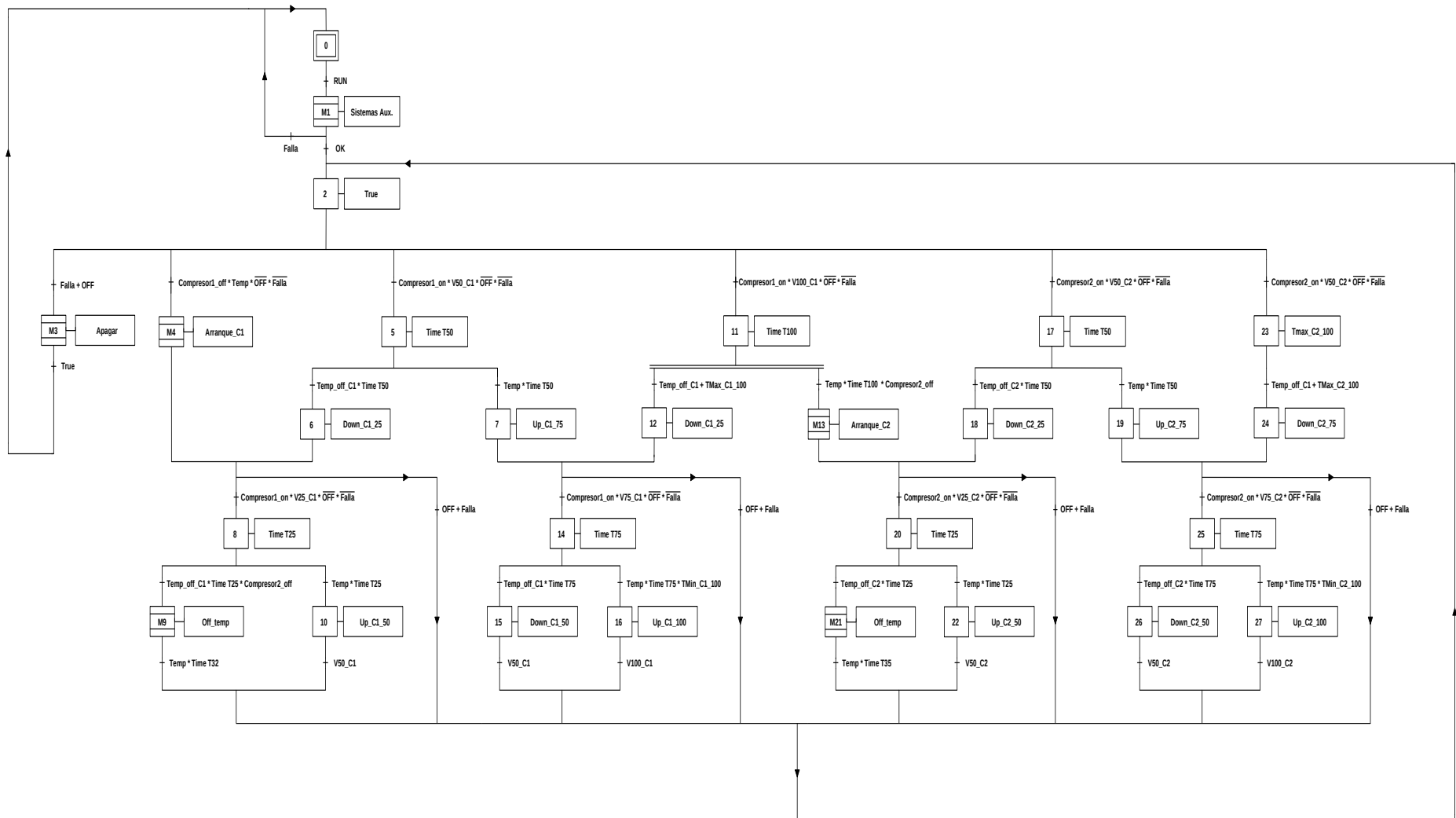


Figura 32. Diagrama GRAFCET del proceso. Fuente: Autor, 2023.

CONCLUSIONES

En la presente investigación, se ha abordado el tema de la automatización de los compresores del *water chiller* en el sistema de clima de la Planta de SPGV de Santiago de Cuba. A lo largo de este estudio, se han analizado y examinado diversos aspectos relacionados con el diseño y la programación de un algoritmo eficiente para el control de los compresores de refrigerante de la entidad, así como la interfaz que permite la interacción del operador con el proceso. Como resultado, es posible afirmar que los objetivos trazados fueron alcanzados, permitiendo arrojar las siguientes conclusiones:

- Se caracterizó desde el punto de vista histórico-gnoseológico los sistemas de clima y su control en general, enfatizando en el sistema actual de la planta de SPGV de Santiago de Cuba.
- Se recopilaron los requisitos funcionales de la instalación de clima en la planta de SPGV de Santiago de Cuba, específicamente en la operación y control de los compresores asociados.
- Se programó el micro PLC S7 200/CPU224 AC/DC/RELAY, basándose en el algoritmo diseñado para el control de los compresores del *water chiller*.
- Se diseñó y programó la interfaz Weintek MT8070iE, para la interacción con el proceso.
- Se verificó a través de simulación, la conexión entre el autómatas y la pantalla.
- La solución propuesta, logró satisfacer las necesidades de la empresa, así como cumplir con los requisitos impuestos por la misma, lo que se evidencia a partir del aval recibido por la dirección de la empresa (Anexo 10).

RECOMENDACIONES

- Aplicar cada una de las propuestas planteadas.
- Cumplir con el mantenimiento programado de los compresores.
- Tener una retroalimentación de los sistemas auxiliares como la torre de enfriamiento y la unidad manejadora de aire.
- Ampliar este tipo de soluciones, como la propuesta del HMI a otros sectores productivos de la empresa como la fabricación de vendas enyesadas.
- Añadir mejoras al diseño del HMI, según las necesidades de la planta que se puedan presentar.
- Debido a la compleja situación energética que atraviesa el país, se recomienda aplicar el método continuo para el control de capacidad de los compresores, por todas las bondades que este ofrece en cuanto a eficiencia energética se refiere.

BIBLIOGRAFIA

- [1] M. L. Amigo and O. A. Vergel, *Frío industrial y aire acondicionado*. Universidad de Castilla La Mancha, 2012.
- [2] N. P. Quadri, "Sistemas todo refrigerante," in *Sistemas de Aire Acondicionado*, 1era ed., L. y E. Alsina, Ed., Buenos Aires, 2001, p. 123.
- [3] K. R. Tigua, "Implementación de un sistema de climatización mediante aplicación domótica para el Área Administrativa de la Carrera de Ingeniería en Computación y Redes.," vol. 1, pp. 1–97, 2021.
- [4] K. Jimenez Nigro, "Aplicación de la metodología RCM para un Chiller enfriado por aire, del sistema de enfriamiento de la compañía envasadora del atlántico," Universidad Industrial de Santander, 2022.
- [5] J. Hernández, "Diseño E Implementación De Un Sistema De Enfriamiento Por Agua ' Chiller ' Mediante Sistema Scada Para El Taller H-Frio," 2021, [En línea]. Disponible en: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/23218/1/UPS-GT003929.pdf>
- [6] J. D. Nally, *Good manufacturing practices for pharmaceuticals*. New Jersey: CRC Press, 2016.
- [7] V. H. GARCIA and M. Rojas, "Propuesta de creación de un instrumento de medición de clima organizacional para una industria farmacéutica." UNIVERSIDAD ICESI, 2011.
- [8] W. Rezquellah, "Validación de los procesos de limpieza en la industria farmacéutica, mediante la aplicación del análisis de riesgo, seguridad toxicológica y UPLC," 2015.
- [9] R. F. Linares Vicente, "Propuesta de automatización para el sistema de climatización en salas limpias de la Planta de Soluciones Parenterales de Santiago de Cuba.," Universidad de Oriente, Facultad de Ingeniería Eléctrica, 2019.
- [10] G. Viña-Pérez and F. Debesa-García, "La industria farmacéutica y la promoción de los medicamentos. Una reflexión necesaria," *Gac. Médica Espirituana*, vol. 19, no. 2, pp. 110–122, 2017.
- [11] F. E. Moreno García, E. P. Bandarra Filho, and O. S. Hernandez Mendoza, "Proposal to use adaptive control in water chillers for use in vapor

- compressor refrigeration system,” *Rev. Colomb. Tecnol. Av. Av.*, vol. 2, no. 14, 2009.
- [12] C. Almengor-Morales, “Control de un sistema de distribución de agua HVAC tipo Chilled Water.,” 2010.
 - [13] C. R. Ruelas Chozo, “Chiller Carrier 30RBA12054 Con Condensador Cobre–Aluminio, Como Alternativa Para Evitar Fuga De Gas Refrigerante En El Sistema De Aire Acondicionado Del Edificio Corporación Mg Sac,” 2017.
 - [14] B. L. Foliaco and A. Bula, “Mejora de un modelo de caja gris para performance y consumo de chillers centrífugos en plantas de agua fría,” in *Tercer Congreso Internacional de Distritos Térmicos*, p. 32.
 - [15] J. C. Armas, M. Lapidó Rodríguez, J. R. Gómez, and Y. Valdivia Nodal, “Evaluación termodinámica de sistemas de climatización centralizados por agua helada usando herramientas de inteligencia artificial,” *Ing. e Investig.*, vol. 31, no. 2, pp. 134–142, 2011.
 - [16] W. Kauzmann, *Teoría cinética de los gases*, vol. 1. Barcelona: Reverté, 1970.
 - [17] A. Aramburú Pardo Figueroa, “Estudio de un sistema de refrigeración por compresión de vapor aplicado a la industria agroalimentaria,” Universidad de Piura, 2017.
 - [18] J. R. Welty, C. E. Wicks, R. E. Wilson, and C. S. Franchini, *Fundamentos de transferencia de momento, calor y masa*. Limusa, 1999.
 - [19] E. Rivera, “¿Cómo seleccionar un chiller?,” *Revista Cero Grados*. Accedido: Oct. 23, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://0grados.com/como-seleccionar-un-chiller/>
 - [20] D. Triché, S. Bonnot, M. Perier-Muzet, F. Boudéhenn, H. Demasles, and N. Caney, “Experimental and numerical study of a falling film absorber in an ammonia-water absorption chiller,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 111, pp. 374–385, 2017.
 - [21] G. Romage *et al.*, “Enfriador solar mediante refrigeración por absorción adiabática utilizando energía solar a baja temperatura,” 2022.
 - [22] W. Gupton Jr, *HVAC controls: Operation and maintenance*, 3a ed. New York: The Fairmont Press, 2001.

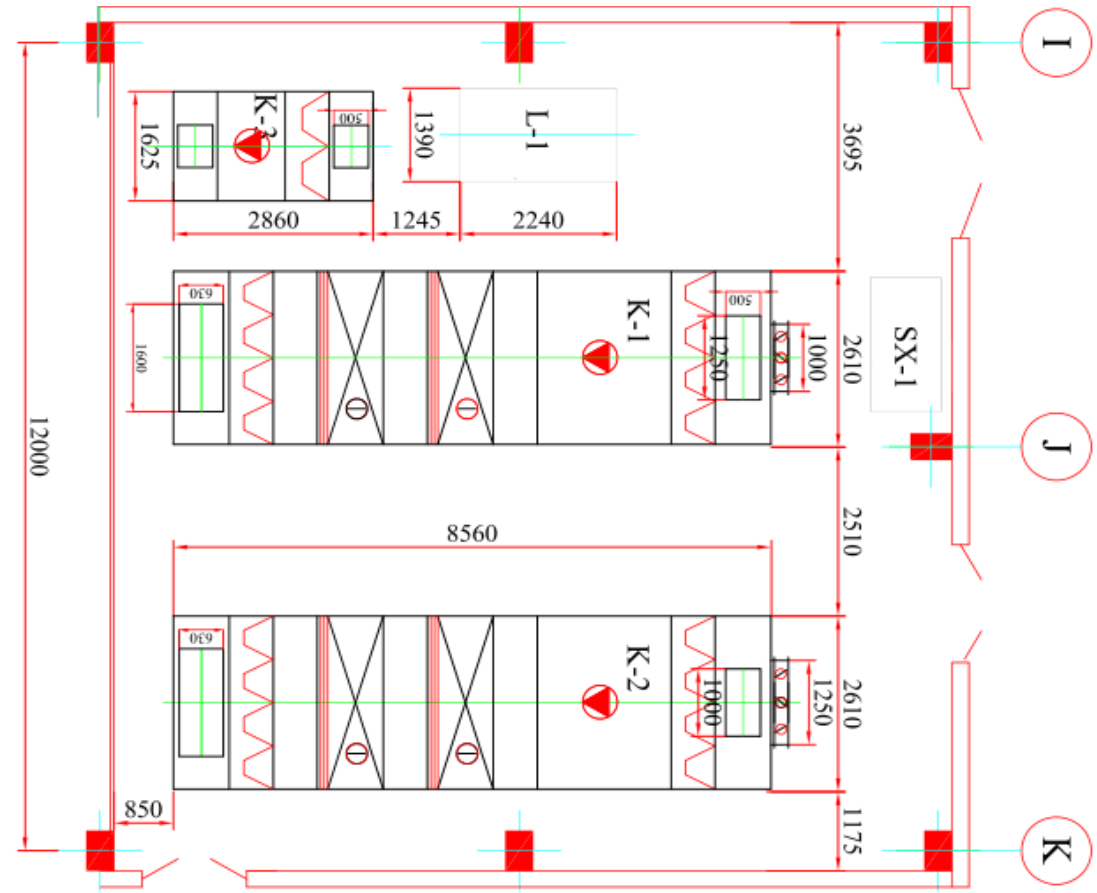
- [23] P. F. Díez, "Compresores," Universidad de Cantabria, Cantabria, 2000.
- [24] J. Nieto Fuentes, "Climatización." Universidad Politécnica Comillas, Madrid.
- [25] T. J. Ruiz, "Análisis comparativo de compresores frigoríficos para R-134a," 2016.
- [26] R. J. Salazar Garza, "Compresores centrífugos," Universidad Autónoma de Nuevo León, 2001.
- [27] J. A. Sánchez, "Instrumentación y control de procesos: capítulo 10: control de compresores dinámicos," *Ing. química*, no. 311, pp. 133–140, 1995.
- [28] A. Calomarde Herrero, "Desarrollo de correlaciones para la caracterización de compresores de piston dentro del campo de la refrigeración comercial." Universitat Politècnica de València, 2020.
- [29] J. G. Maciá, "Desarrollo de un modelo global de compresores de refrigeración de desplazamiento positivo." Universidad Politécnica de Valencia, 2001.
- [30] C. T. I. 209, "Salas limpias y entornos controlados asociados. Parte 1 Clasificación de la limpieza del aire. ISO 14644." 2015.
- [31] CECMED, "CECMED." Accedido: Oct. 25, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.cecmed.cu/>
- [32] Y. C. Biorkys and F. P. R. Yanelis, Martínez Pi, González Cabeza Yoleisi, "Buenas Prácticas Farmacéuticas Sistema Regulador en Cuba." Ministerio de Salud Pública, La Habana, p. 28, 2017.
- [33] N. Casademunt Balbín and M. Collazo Herrera, "La farmacoeconomía en la industria farmacéutica y el sistema sanitario de Cuba," 2001.
- [34] L. Martínez Corbillón, R. Figueras Texidor, and D. Guerrero Seino, "Los sistemas computarizados: la industria farmacéutica y sus regulaciones," 2020.
- [35] E. C. Paz, "El VI Congreso del Partido Comunista de Cuba," *Rev. Soc. y Jurídicas*, no. 8, pp. 4–75, 2012.
- [36] B. M. García Delgado, E. Uramis Díaz, J. L. Di Fabio, I. Fleitas, and E. M. F. Fajardo, "Experiencia cubana en la producción local de medicamentos, transferencia de tecnologías y mejoramiento en el acceso a la salud." La Habana, 2019. [Online]. Available: www.paho.org/cub

- [37] BioCubaFarma, "BioCubaFarma." Accedido: Oct. 26, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.biocubafarma.cu/>
- [38] M. Díaz-Canel Bermúdez and J. Núñez Jover, "Gestión gubernamental y ciencia cubana en el enfrentamiento a la COVID-19," *An. la Acad. Ciencias Cuba*, vol. 10, no. 2, pp. 1–10, 2020.
- [39] A. L. Fernández Aguilar, "PROCEDIMIENTO PARA PERFECCIONAR LA GESTIÓN FINANCIERA DESDE LA DIRECCIÓN DE TESORERÍA. APLICACIÓN EN EL GRUPO EMPRESARIAL BioCubaFarma," Universidad Holguín, Cuba, 2017.
- [40] BioCubaFarma, "LBF Laboratorios Farmacéuticos." Accedido: Oct. 27, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.biocubafarma.cu/empresas/empresa.php?ID=26>
- [41] P. G. Muñoz and M. A. V. Zanuy, "Nutrición parenteral," *Ángel Gil Hernández. Tratado Nutr. Ed. Médica Panam. Madrid*, pp. 143–169, 2010.
- [42] "High Quality Hanbell Compressor RC2 Series RC2-230b Hanbell Screw Compressor," Made-in-China.
- [43] GRM Válvulas e Instrumentación, "Sonda de Temperatura PT100," GRM Válvulas e Instrumentación S.L.
- [44] E. E. Ortega Ortiz and J. A. Torres Poveda, "Diseño e implementación de un sistema scada basado en el software quick hmi para el monitoreo y operación de los dos chiller centrífugo con generación de reporte estadístico en el hotel Hilton Colón Guayaquil." 2019.
- [45] J. G. Orbe Peña and H. A. Pungaña Zambrano, "Implementación de la interfaz hombre-máquina (hmi) para el medidor de energía multiparámetro sentron pac del laboratorio de Electromecánica de la Universidad Técnica de Cotopaxi Extensión La Maná." Ecuador: Latacunga: Universidad Técnica de Cotopaxi (UTC), 2023.
- [46] A. Murciano Carretero, "Diseño de automatización y control de sistema de cultivo indoor industrial mediante PLC y pantalla HMI." Universidad Politécnica de Valencia, 2019.
- [47] R. E. Brito Reyes, W. E. Franco Veintimilla, and D. Larco, "Diseño de la automatización de una máquina post acondicionador de pellet para una industria de alimentos acuícolas." ESPOL. FIEC, 2020.

- [48] “Alibaba.” [En línea]. Disponible en: <https://spanish.alibaba.com/product-detail/Weintek-Weinview-MT6071iP-1wv-HMI-touch-60822850518.html>
- [49] “Made in China.” [En línea]. Disponible en: https://es.made-in-china.com/co_ruihuaele/product_15inch-Weintek-Touch-Screen-MT8150X_hoosyyeg.html
- [50] Hanbell, “Hanbell Screw Compressors Service Manual.” 2003. [En línea]. Disponible en: <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjfy42qvbOCAxUYTTABHTaGDKQQFnoECBkQAAQ&url=https%3A%2F%2Fmcscontrols.com%2FDocuments%2FHanbell%2FManuals%2FHanbell%2520Service%2520Manual.pdf&usg=AOvVaw1k1Ne1B7hXUop3Pf>
- [51] A. A. Santos, A. F. da Silva, and F. Pereira, “Simulation of Cyber-Physical Intelligent Mechatronic Component Behavior Using Timed Automata Approach,” in *International Conference Innovation in Engineering*, Springer, 2022, pp. 72–85.

ANEXOS

Anexo # 1. Ubicación de los equipos de clima (unidades manejadoras de aire y el water chiller).

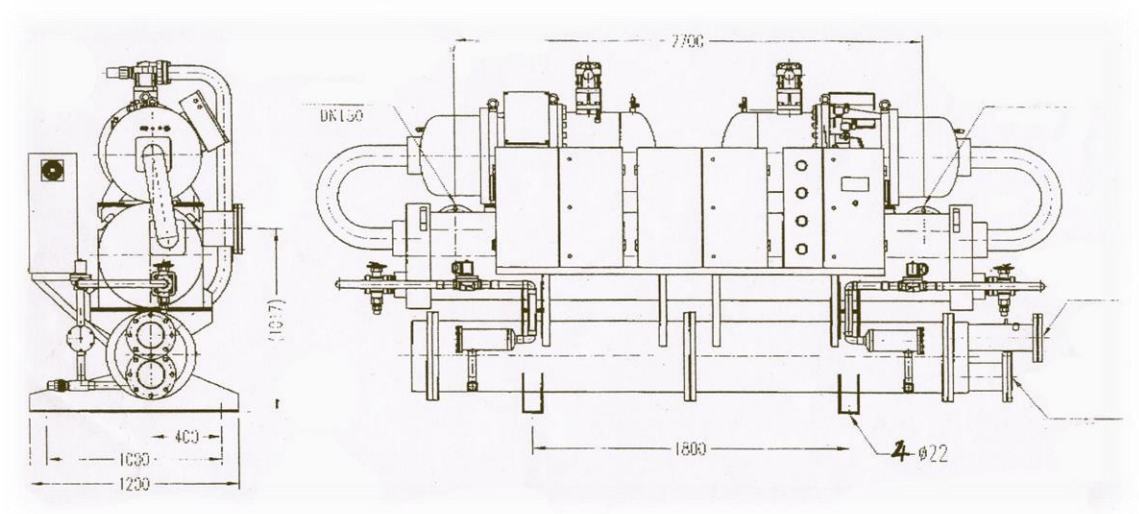


Simbología:

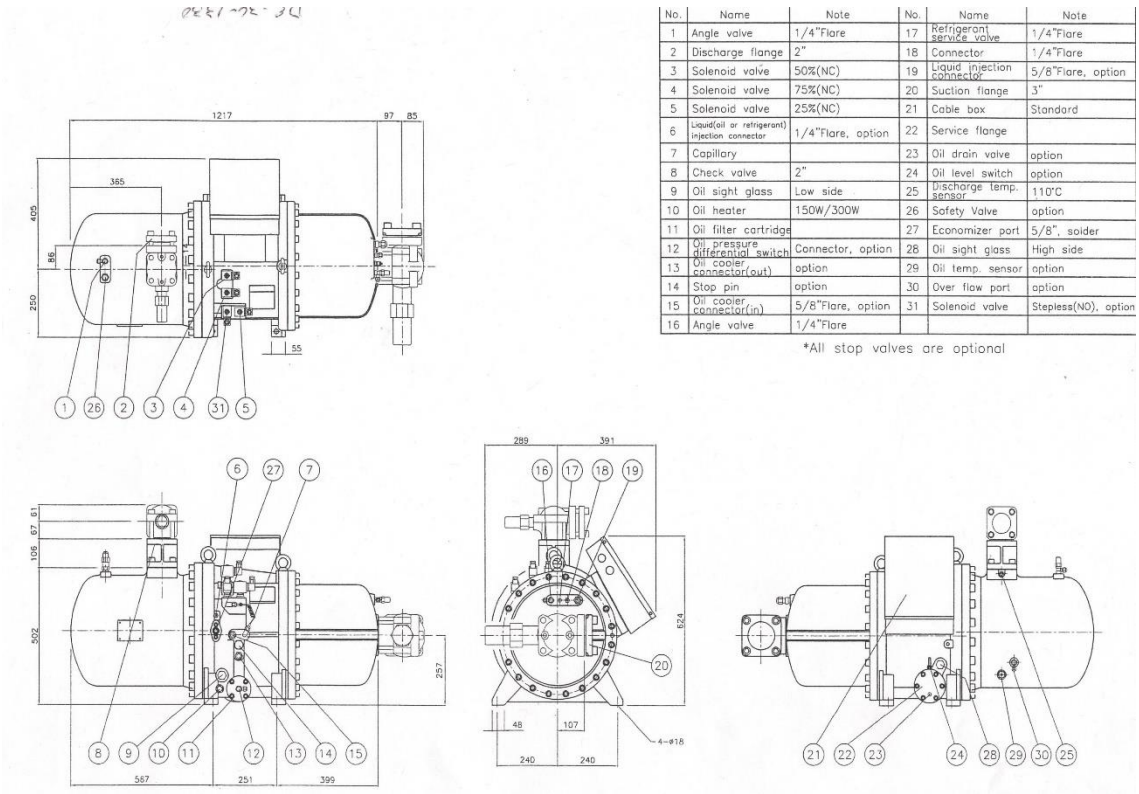
- K-1: Unidad de tratamiento de aire Caudal: 44 946 m³/h, H= 1800 Pa, N= 37 kW
- K-2: Unidad de tratamiento de aire Caudal: 40 860 m³/h, H= 1800 Pa, N= 37 kW
- K-3: Unidad de extracción de aire Caudal: 14 832 m³/h, H= 900 Pa, N= 7.5 kW
- L-1: Unidad de enfriamiento de agua Potencia frigorífica 140 T.R
- SX-1: Tanque de agua fría
- K-1 K-2
 - Sección de filtración gruesa con prefiltros de bolsas clase G4, cantidad 16 unidades
 - Sección de filtración fina con filtros de bolsas clase F9, cantidad 16 unidades
- K-3
 - Sección de filtración gruesa con prefiltros de bolsas clase G4, cantidad 12 unidades

UBICACION DE EQUIPOS DE CLIMA K1, K2, K3, L-1, SX-1

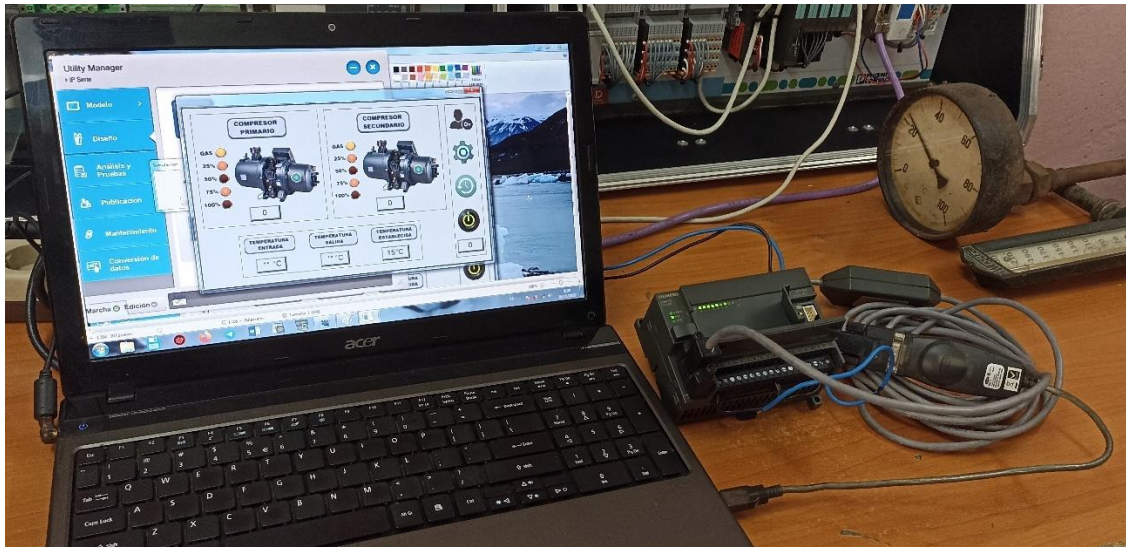
Anexo # 2. Water Chiller del sistema de clima de la planta de SPGV.



Anexo # 3. Compresores del water chiller de la planta de SPGV.



Anexo # 5. Simulación de la pantalla HMI con el PLC desde una computadora.



Anexo # 6. Escaladas de los diferentes porcentajes de capacidad del compresor durante el arranque según el fabricante.

3. Protección contra arrancadas incorrectas del compresor:

Cuando el compresor está arrancando, la carga del sistema es muy alta, la temperatura del agua fría es bastante alta. Por lo tanto, cuando arranca el compresor, el sobrecalentamiento del lado de la presión baja y la sobrecarga del compresor pueden fácilmente hacer accionar el interruptor de la protección por sobrecarga del motor del compresor y parar la máquina. A fin de prevenir el fenómeno antes descrito, la máquina debe arrancarse de acuerdo con la siguiente secuencia establecida por nuestra compañía:

Comenzar la arrancada del compresor con 25% de carga. Déjelo correr durante 3-5 minutos. Pase a operar durante 3-5 minutos a 50% de carga.

Luego, hay que cambiar a 75% de carga y volver a operar durante otros 3-5 minutos. Y luego subir la carga hasta 100%.

La temperatura de agua de enfriamiento puede reducirse después de que la máquina opere durante 9 minutos a carga completa. Cuando el compresor llegue a operar a carga completa, hay que ajustar el tiempo de arrancada de acuerdo con la carga real, de forma tal que el compresor pueda trabajar con el mejor rendimiento.

Después de parar el compresor, el mismo solo podrá arrancarse con carga “cero” después que haya transcurrido el tiempo indicado en la tabla anterior. Si el tiempo es menor y se arranca la máquina, la corriente de arrancada puede que sea tan alta que haga actuar la protección e incluso dañar el compresor.

4. Sistema de ajuste de la capacidad del compresor:

El sistema ajusta la capacidad usando la diferencia de la presión del aceite. Si la temperatura es baja, la viscosidad de aceite será alta; si el compresor se arranca en esas condiciones, el sistema no funcionará bien. Por lo tanto, antes de comenzar la arrancada del sistema, hay que efectuar el precalentamiento durante 8 horas.

a. Cuatro escalones del sistema de ajuste de la capacidad del compresor:

El sistema de ajuste de capacidad está conformado por un bloque deslizante o escalonado de ajuste de capacidad y un juego de pistones de presión de aceite para ajustar la capacidad. Los cuatro escalones del ajuste de capacidad son: 25%, 50%, 75% y 100%. El pistón empuja desplazando el bloque deslizante. Cuando el trabajo se realiza a carga parcial, el desplazamiento del bloque deslizante hará que el medio de enfriamiento parcialmente recircule de forma tal que el flujo del medio de enfriamiento se reduzca. De esta forma, la máquina puede operar con capacidad parcial.

Cuando la máquina para, la fuerza de retorno del muelle puede llevar el pistón hacia atrás a su lugar inicial. Cuando el compresor está funcionando, la presión de aceite empuja el pistón a desplazarse. La presión de aceite y la válvula electromagnética controlan el movimiento del pistón y deciden la posición del pistón. La válvula electromagnética es controlada por señales de temperatura del sistema de control.

El aceite en el tanque de almacenamiento fluye hacia el sistema de aceite del pistón de ajuste de capacidad mediante la diferencia de presión entre el filtro de aceite y la tubería capilar. Cualquier obstrucción en el filtro de aceite y la tubería capilar puede resultar en operaciones impropias o fallos en el sistema de ajuste de capacidad. Un fallo de la válvula electromagnética puede ocasionar el mismo resultado por la misma razón.

% de capacidad	Válvula electromagnética		
	SV1	SV2	SV3
100%	0	0	0
75%	0	1	0
50%	0	0	1
25%	1	0	0

0 significa “desconectado”

1 significa “conectado”

b. Sistema de ajuste de capacidad continuo (sin escalones):

La estructura del sistema de ajuste de la capacidad, continuo y sin escalones, es similar al sistema de ajuste de capacidad de cuatro escalones. Estos dos sistemas son diferentes en la aplicación de la válvula electromagnética. El sistema de ajuste de capacidad (continuo) usa una solamente válvula electromagnética de cierre y una válvula electromagnética de apertura. Estas dos válvulas controlan la salida y la entrada del tanque de aceite a presión respectivamente. Un controlador magnetizará la válvula de acuerdo con lo establecido a fin de controlar la salida del flujo y su entrada al tanque de aceite a presión, así que el pistón de ajuste de capacidad puede moverse continuamente.

El sistema puede ajustar la capacidad cambiándola dentro del rango de 25%-100% continuamente, lo cual asegura un trabajo estable. La precisión del control de temperatura depende de la precisión del controlador de temperatura.

El sistema usa dos tipos de válvulas electromagnéticas. Una es para cerrar y la otra para abrir. Esta condición permite que el compresor re-arranque exitosamente a "0" carga después de realizar una parada por emergencia.

	Válvula electromagnética	
	SV1 (NC)	SV2 (NO) 25%
Cambio de capacidad		
Arrancada	ON	ON/OFF
Incremento	OFF	OFF
Decreciendo	ON	ON
Estable	OFF	ON

Anexo # 7. Proceso de arranque del *water chiller* según datos del fabricante.

Δ Los daños causados por las pruebas de resistencia a la compresión y de aislamiento ejecutadas en desacuerdo con las regulaciones emitidas por el Fabricante son considerados como resultado de una acción errónea y no se cubrirán por la garantía.

! La unidad debe energizarse y precalentarse durante 8 horas antes de que comience a ser utilizada. Exceptuando por el mantenimiento o la parada de temporada, el suministro energético de calentamiento de aceite no debe cortarse a fin de asegurar una estable temperatura de aceite en el compresor.

3. OPERACIÓN, MANTENIMIENTO Y REPARACIÓN

3.1. Arrancada del enfriador ("water chiller")

! La ejecución de pruebas y arreglos debe llevarse a cabo por operadores profesionales autorizados por el Fabricante. Todos los controles y las comprobaciones deben efectuarse antes de la puesta en marcha del enfriador ("water chiller"). En el caso contrario, inclusive durante un momento breve, la puesta en marcha no se permite.

3.1.1. Preparativos para la puesta en marcha

Antes de que el operador calificado comience la prueba y la reparación de los desperfectos de la unidad, él debe, ante todo, chequear la unidad y los equipos preparados por el Usuario a fin de garantizar que la prueba se ejecute con seguridad. A continuación se ofrecen las instrucciones detalladas:

1. Comprobar todos los equipos auxiliares, tales como: bomba de agua de enfriamiento, bomba de agua fría, unidades de manejo de aire o de sistemas de ciclo de agua de enfriamiento. En cuanto a los requerimientos sobre los equipos auxiliares deben consultarse las guías de su uso de los correspondientes Fabricantes. Hay que estar seguro de que el interruptor del flujo de agua esté conectado al puerto correcto de la caja de control.
2. Comprobar el suministro energético. Hay que asegurarse de que sus especificaciones tales, como: el voltaje, la frecuencia y el diámetro del cable satisfagan los requerimientos del "chiller" y sean consistentes con las establecidas en la Guía.
3. Comprobar el sistema de agua de enfriamiento y del agua fría. Hay que asegurarse de que los sistemas hayan sido instalados, de acuerdo a los requerimientos del sistema de aire acondicionado. Comprobar el sistema de agua para asegurarse de que está limpio. Hay que asegurarse de que todo el aire ha sido extraído de las tuberías de agua. Es preciso arrancar la bomba de agua y observar el comportamiento del flujo de agua para asegurarse de que el sistema de control del flujo de agua funciona bien.
4. Arrancar la torre de enfriamiento de agua para comprobar si el sistema de enfriamiento de agua está funcionando bien. Hay que asegurarse de que la bomba de agua de enfriamiento está funcionando bien y que la dirección de rotación de los ventiladores de la torre de enfriamiento es correcta.
5. Simular la operación sin arrancar el compresor (conectar el suministro energético del sistema de control separadamente) para comprobar la operación del controlador y el buen funcionamiento de la alarma.

6. Abrir la válvula de corte del compresor. Abrirla completa y cuando llegue al tope, hay que dar hacia atrás una sola vuelta. Luego, abrir la válvula de salida del condensador del "water chiller" y comprobar si hay filtraciones y escapes.
7. Observar el nivel de aceite del compresor a través del visor para comprobar si satisface los requerimientos de operación (hay que consultar la Guía correspondiente sobre Adiciones de Aceite).
8. Comprobar las tuberías, los conectores (las tubuladuras) y los platillos del "water chiller" para determinar si hay escapes y filtraciones.
9. Comprobar y fijar bien todas las partes eléctricas conectadas a fin de asegurarse de que están bien apretadas.
10. Asegurarse de que el sistema de calentamiento de aceite está operando bien.
11. Hay que asegurarse de que el calentador de aceite haya sido energizado durante 8 horas y de que la temperatura de la ranura de almacenamiento de aceite haya subido.

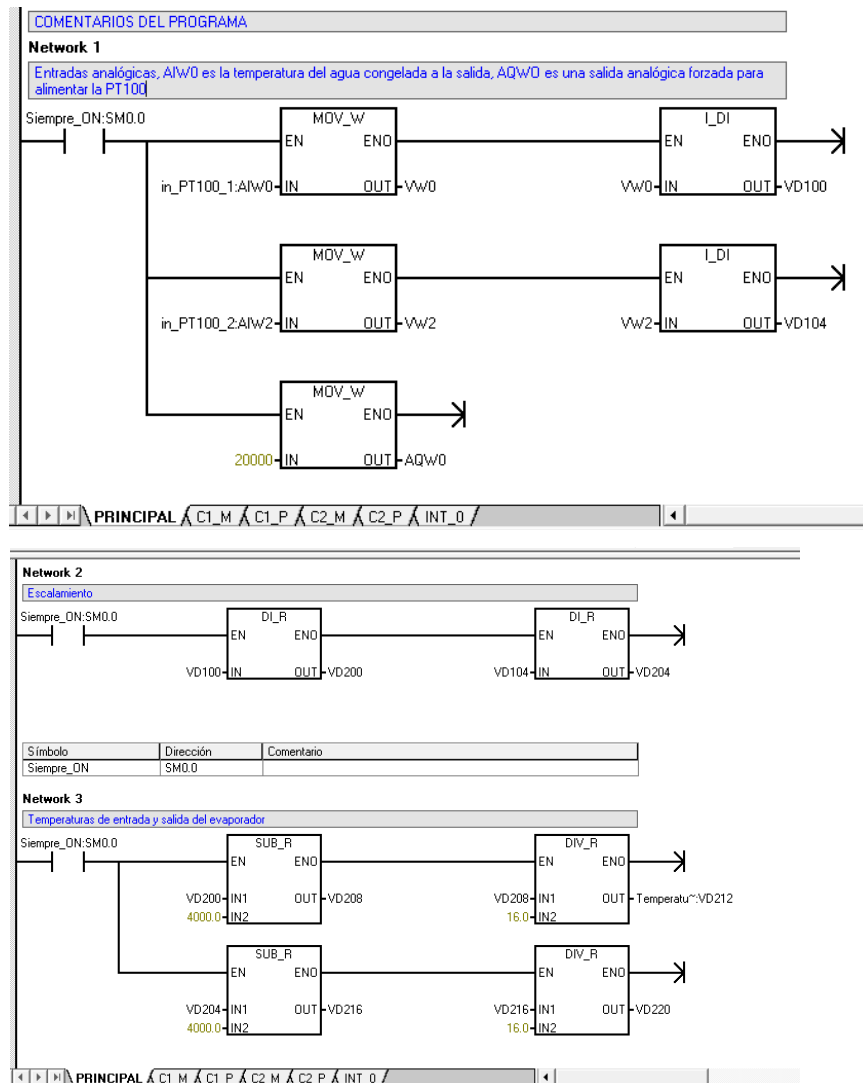
! Todos los parámetros y los dispositivos de protección del controlador han sido calibrados ("seteados") en la planta Fabricante. Los usuarios no deben cambiar los parámetros exceptuando las ocasiones especiales para prevenir cualquier daño del "water chiller".

3.1.2. Operación de arrancada

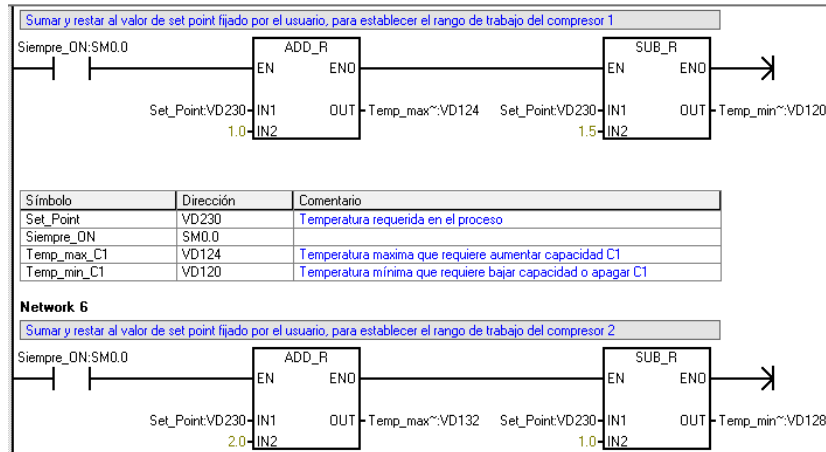
1. Ante todo, ponga a funcionar el interruptor de aire en la caja de interruptores de equipos del Usuario
2. Hay que comprobar las operaciones del dispositivo de seguridad, del de protección y de los dispositivos de conexión en cadena.
3. Debe asegurarse de que todos los componentes están trabajando bien
4. Es preciso ajustar la temperatura inicial en el panel de manipulación de acuerdo con los requerimientos.
5. Solamente después de arreglar los defectos y comprobar que todas las condiciones necesarias corresponden a las exigencias, el personal, responsable por la arrancada y la corrida del equipo, puede arrancar el "water chiller".
6. Presione "Start" en el panel para poner en marcha el equipo.
7. Después de que el equipo arranque, hay que volver a chequear los dispositivos de seguridad, de protección y de conexión en cadena.
8. Comprobar la presión, la corriente eléctrica y la temperatura.
9. Hay que asegurarse de que la presión y la temperatura de trabajo se encuentran en valores normales demostrando que el equipo está funcionando bien.

Anexo # 8. Parte del código de programación empleado en el *water chiller*.

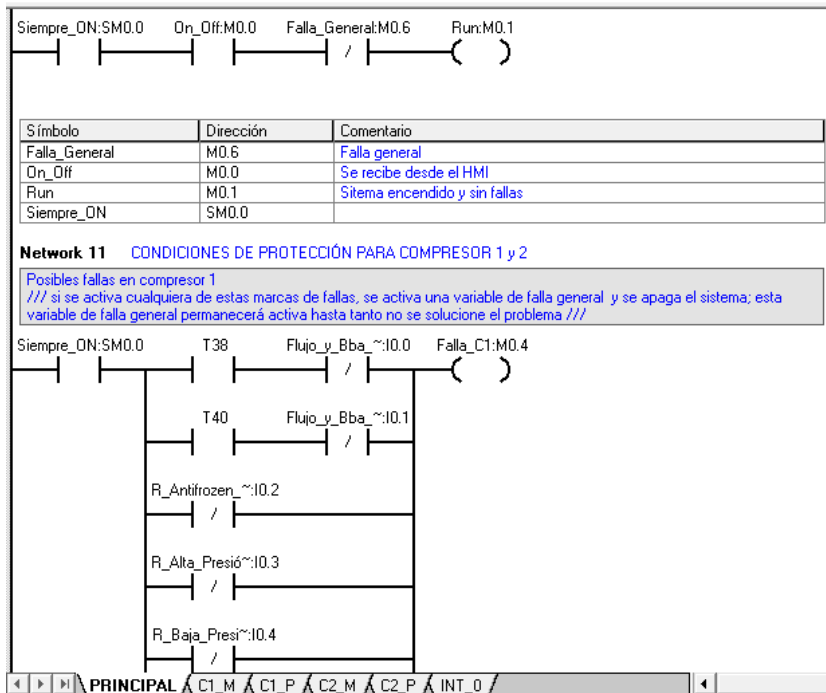
- a) Código empleado para el escalamiento de las señales analógicas de los sensores de temperatura.



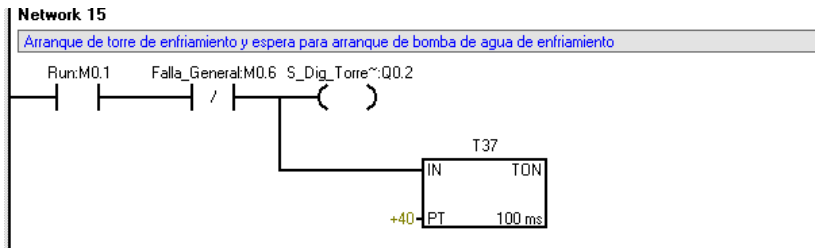
b) Código empleado para fijar la temperatura deseada a la salida del *water chiller*.



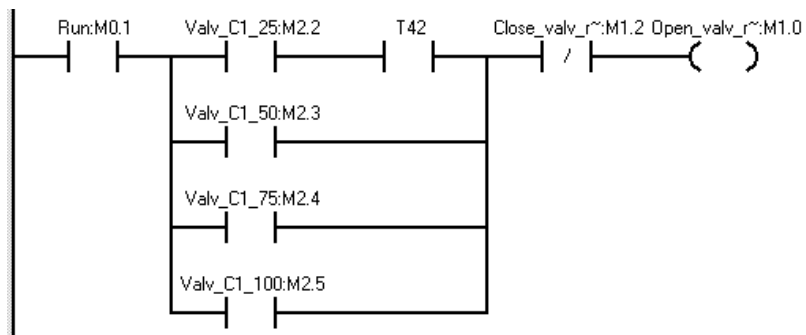
c) Parte del código empleado para arrancar el *water chiller*.



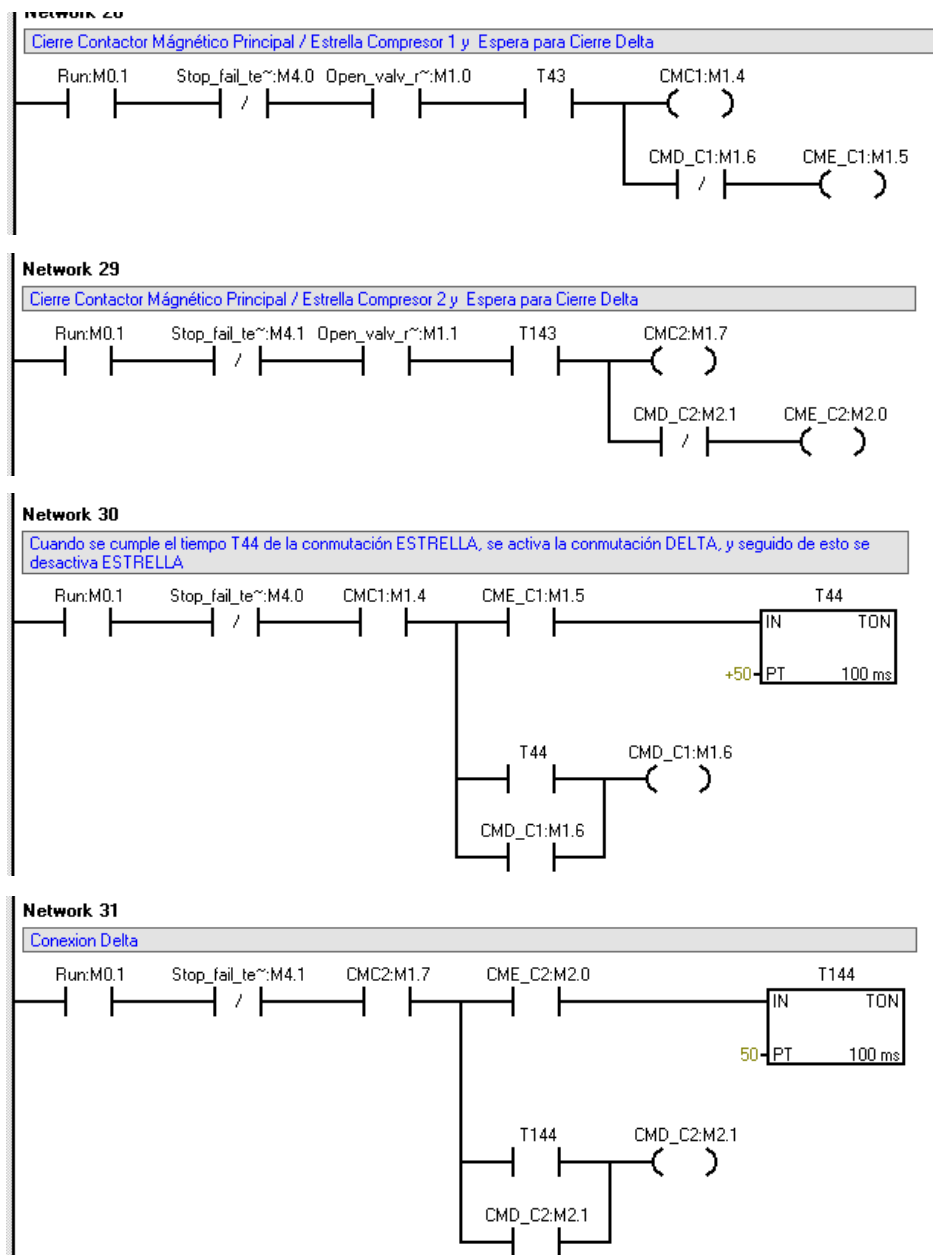
d) Código empleado para arrancar torre de enfriamiento.



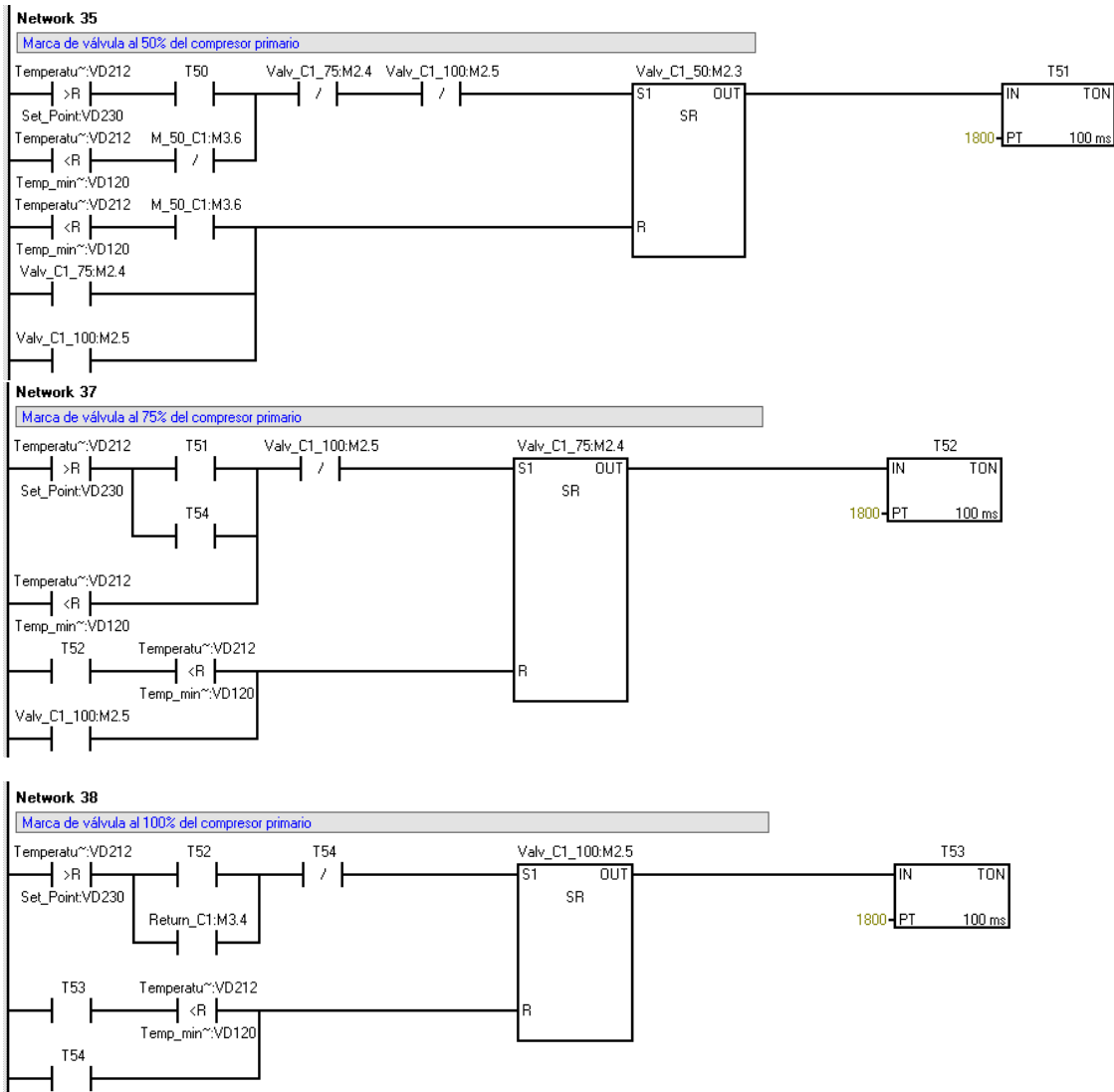
e) Código empleado para abrir válvula de refrigerante.



f) Código empleado para arranque estrella-delta de los compresores.



g) Parte del código empleado para la escalada en los distintos porcentajes de capacidad que se repite en ambos compresores.



Anexo # 9. Código de programación empleado en la selección del compresor principal (subrutina).

Network 1 Título de segmento

Comentario de segmento

Valv_C1_25:M2.2 S_Dig_Val25~:Q0.7

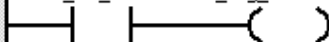


Símbolo	Dirección	Comentario
S_Dig_Val25_C1	Q0.7	Salida Digital para Válvula de 25% Compresor 1
Valv_C1_25	M2.2	25% de capacidad C1

Network 2 Título de segmento

Comentario de segmento

Valv_C1_50:M2.3 S_Dig_Val50~:Q1.0



Símbolo	Dirección	Comentario
S_Dig_Val50_C1	Q1.0	Salida Digital para Válvula de 50% Compresor 1
Valv_C1_50	M2.3	50% de capacidad C1

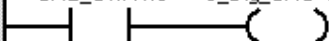


Símbolo	Dirección	Comentario
CMC1	M1.4	Cont.Magn Principal Compresor 1 "CMC1"
S_Dig_CMC1	Q0.4	Salida Dig. Cont.Magn Principal Compresor 1 "CMC1"

Network 10

Comentario de segmento

CME_C1:M1.5 S_Dig_CMC~:Q0.5

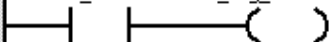


Símbolo	Dirección	Comentario
CME_C1	M1.5	Cont.Magn Cierre "Y" Compresor 1 "CMCS1"
S_Dig_CMCS1	Q0.5	Salida Dig. Cont.Magn Cierre "Y" Compresor 1 "CMCS1"

Network 11

Comentario de segmento

CMD_C1:M1.6 S_Dig_CMC~:Q0.6

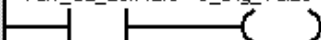


Símbolo	Dirección	Comentario
CMD_C1	M1.6	Cont.Magn Cierre "Delta" Compresor 1 "CMCD1"
S_Dig_CMCD1	Q0.6	Salida Dig. Cont.Magn Cierre "Delta" Compresor 1 "CMCD1"

Network 4 Título de segmento

Comentario de segmento

Valv_C2_25:M2.6 S_Dig_Val25~:Q2.4

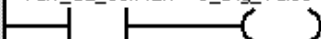


Símbolo	Dirección	Comentario
S_Dig_Val25_C2	Q2.4	Salida Digital para Válvula de 25% Compresor 2
Valv_C2_25	M2.6	25% de capacidad C2

Network 5 Título de segmento

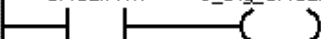
Comentario de segmento

Valv_C2_50:M2.7 S_Dig_Val50~:Q2.5



Símbolo	Dirección	Comentario
S_Dig_Val50_C2	Q2.5	Salida Digital para Válvula de 50% Compresor 2
Valv_C2_50	M2.7	50% de capacidad C2

CMC2:M1.7 S_Dig_CMC2:Q2.1



Símbolo	Dirección	Comentario
CMC2	M1.7	Cont.Magn Principal Compresor 2 "CMC2"
S_Dig_CMC2	Q2.1	Salida Dig. Cont.Magn Principal Compresor 2 "CMC2"

Network 13

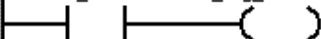
CME_C2:M2.0 S_Dig_CMC~:Q2.2



Símbolo	Dirección	Comentario
CME_C2	M2.0	Cont.Magn Cierre "Y" Compresor 2 "CMCS2"
S_Dig_CMCS2	Q2.2	Salida Dig. Cont.Magn Cierre "Estrella" Compresor 2 "CMCS2"

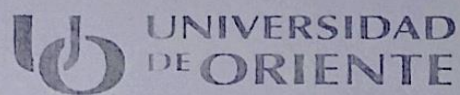
Network 14

CMD_C2:M2.1 S_Dig_CMC~:Q2.3



Símbolo	Dirección	Comentario
CMD_C2	M2.1	Cont.Magn Cierre "Delta" Compresor 2 "CMCD2"
S_Dig_CMCD2	Q2.3	Salida Dig. Cont.Magn Cierre "Delta" Compresor 2 "CMCD2"

Anexo # 10. Aval de cumplimiento de tarea de impacto en la empresa LBF.



AVAL DE CUMPLIMIENTO DE TAREA DE IMPACTO

En correspondencia con la Resolución 3/21 del Ministro de Educación Superior referida a la incorporación de los estudiantes universitarios a tareas de impacto social y económico como parte de su formación integral, se hace necesario dejar constancia de su cumplimiento a partir de relacionar los siguientes aspectos:

DATOS DEL ESTUDIANTE

Nombre y apellidos: Juan Carlos Díaz Almeida
Numero de carné de identidad: 00100581308
Carrera que estudia: Ingeniería en Control Automático
Año académico: 2022-2023

DATOS DEL QUE SUSCRIBE O AVALA:

Nombre y apellidos: Sandra Hechavarría Lafargue
Cargo o responsabilidad: Directora Adjunta
Telefonos de localización: Fijo: 22-64 17 84 Móvil: 52796851
Dirección de correo electrónico (Si procede) sandra@lfo.biocubafarma.cu
Entidad en la que se realiza la vinculación del estudiante a la tarea de impacto: Empresa Laboratorio Farmacéutico Oriente
Tiempo de duración de la vinculación: Febrero 2023
Breve descripción de la tarea realizada y valoración del nivel de responsabilidad mostrado por el estudiante en su cumplimiento:

El estudiante al realizarse su pre ubicación en la Empresa, se inserta en un proyecto de recuperación del sistema de acondicionamiento y ventilación de aire de la Planta 2 Sueros, Hemodiálisis y Vendas Enyesadas en la línea productiva de Soluciones Parenterales de Gran Volumen en Bolsas Plásticas. Este sistema junto al sistema de agua para inyección, constituyen sistemas críticos para la producción de esta forma farmacéutica. Resulta sumamente importante este proyecto para mantener esta producción y cumplir con la Regulación 16-2012. Anexo 04. Directrices para la Fabricación de Productos Estériles del sistema regulador en Cuba, el Centro Estatal de Medicamentos, Equipos y Dispositivos Médicos (CECMED)

Dada a los 24 días del mes de octubre del año 2023. "Año 65 de la Revolución".

Firma del estudiante

Cuño
Dirección
General



Firma del que suscribe

Observaciones: Esta planilla constituye un documento oficial a archivar en el expediente académico del estudiante. Su llenado es competencia integral del que suscribe. Debe llenarse a tinta con letra legible; no tendrá validez sin cuño oficial del que suscribe.