

UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA



Diseño de un sistema de control PID adaptativo de temperatura en cubos de mango para reducir el consumo eléctrico del túnel continuo IQF en la empresa Procesadora Perú S.A.C.

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE
Ingeniero Mecánico Eléctrico

AUTOR

Jose Carlos Nuñez Castro

ASESOR

Alexander Querevalu Morante

<https://orcid.org/0000-0001-5672-6829>

Chiclayo, 2022

Diseño de un sistema de control PID adaptativo de temperatura en cubos de mango para reducir el consumo eléctrico del túnel continuo IQF en la empresa Procesadora Perú S.A.C.

RESENTADA POR

Jose Carlos Nuñez Castro

A la Facultad de Ingeniería de la
Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo
para optar el grado académico de

INGENIERO MECÁNICO ELÉCTRICO

APROBADA POR

Jorge Villanueva Zapata

PRESIDENTE

Luis Gonzales Bazán

SECRETARIO

Alexander Querevalu Morante

VOCAL

DEDICATORIA

Dedicado a mis padres y a mi abuelita por estar siempre presentes con su apoyo incondicional en el camino hacia el cumplimiento de mis metas. A mis hermanos, por su cariño y estar presentes en todo momento motivándome a ser mejor cada día.

AGRADECIMIENTOS

Al Ing. Alexander Querevalú, asesor de la presente tesis, quien me oriento en el transcurso de su elaboración y al Ing. Amado Aguinaga, quien dedicó su tiempo y esfuerzo en orientarme con sus conocimientos a la culminación de esta tesis.
A la Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo, en especial mis profesores, por su dedicación y apoyo con mi desarrollo profesional.
A mi familia, quienes me motivaron a seguir adelante en todo momento, por todo su esfuerzo en mi desarrollo personal.
A la empresa Procesadora Perú S.A.C. por abrirme sus puertas y brindar los datos necesarios para la elaboración de este trabajo.

INFORME DE ORIGINALIDAD

20%

INDICE DE SIMILITUD

18%

FUENTES DE INTERNET

8%

PUBLICACIONES

6%

TRABAJOS DEL
ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	hdl.handle.net Fuente de Internet	2%
2	pirhua.udep.edu.pe Fuente de Internet	1%
3	repositorio.unp.edu.pe Fuente de Internet	1%
4	dokumen.pub Fuente de Internet	1%
5	qdoc.tips Fuente de Internet	1%
6	repositorio.uss.edu.pe Fuente de Internet	1%
7	www.scribd.com Fuente de Internet	<1%
8	tesis.usat.edu.pe Fuente de Internet	<1%
9	dspace.esPOCH.edu.ec Fuente de Internet	<1%

ÍNDICE

RESUMEN	10
ABSTRACT	11
INTRODUCCIÓN.....	12
CAPÍTULO I SITUACIÓN PROBLEMÁTICA	14
1.1. Descripción de la problemática.....	14
1.2. Justificación del problema	15
1.3. Objetivos.....	16
1.3.1. Objetivo Principal.....	16
1.3.2. Objetivos Específicos	16
CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO.....	17
2.1. Antecedentes de la investigación	17
2.2. Bases teóricas.....	18
2.2.1. Fundamentos de termodinámica y transferencia de calor	18
2.2.2. Sistema de refrigeración por compresión de vapor	23
2.2.3. Sistema de refrigeración rápida en túneles continuos	26
2.2.4. Componentes del sistema de refrigeración IQF	28
2.2.5. Fundamentos de ingeniería de control.....	33
2.3. Hipótesis	39
CAPÍTULO III MARCO METODOLÓGICO	40
3.1. Enfoque y diseño	40
3.2. Sujetos de la investigación.....	40
3.3. Métodos y procedimientos.....	41
3.4. Técnicas e instrumentos.....	42
CAPÍTULO IV SITUACIÓN ACTUAL DEL TÚNEL IQF	43
4.1. Descripción de la empresa	43
4.1.1. Proceso productivo	45
4.1.2. Análisis de las fuentes de energía del túnel IQF	48
4.2. Parámetros del Túnel continuo IQF.....	49
4.3. Parámetros del mango congelado	52
2.3.1. Determinación de la carga de fuga	53
2.3.2. Análisis del ciclo de refrigeración	55
CAPÍTULO V DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL PID DE CONGELADO	58
5.1. Modelado del sistema de congelado	58
5.1.1. Modelado del aire dentro del evaporador	60
5.1.2. Modelado del aire en contacto con el producto.....	62

5.1.3. Modelado del producto en contacto con el aire	63
5.1.4. Modelado del ventilador	65
5.1.5. Modelamiento del sistema en Simulink	66
5.2. Diseño de sistema de control PID adaptativo	70
5.3. Selección de los dispositivos	72
CAPÍTULO VI SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	78
6.1. Caso de estudio N° 1	80
6.2. Caso de estudio N° 2.....	83
6.3. Reducción de consumo eléctrico	85
6.4. Análisis económico.....	86
CONCLUSIONES.....	90
RECOMENDACIONES	91
BIBLIOGRAFÍA	92
ANEXOS	94
PLANOS.....	113

Lista de Tablas

Tabla 1. Operaciones con variables dependientes	41
Tabla 2. Consumo de energía anual del túnel IQF.	48
Tabla 3. Parámetros del túnel IQF.	49
Tabla 4. Datos de la pared del túnel IQF.	49
Tabla 5. Equipos auxiliares dentro del túnel IQF.	50
Tabla 6. Equipos auxiliares fuera del túnel IQF.	50
Tabla 7. Parámetros del compresor.	50
Tabla 8. Parámetros del Condensador Evaporativo.	51
Tabla 9. Parámetros del Evaporador Inundado.	51
Tabla 10. Parámetros de los ventiladores centrífugos.	51
Tabla 11. Datos medidos de los ventiladores centrífugos.	52
Tabla 12. Parámetros promedio de los ventiladores centrífugos.	52
Tabla 13. Propiedades físicas del mango.	53
Tabla 14. Condiciones de entrada y salida en el compresor.	55
Tabla 15. Propiedades del aire a diferentes temperaturas.	59
Tabla 16. Propiedades del aire promedio.	60
Tabla 17. Variación del coeficiente de transferencia de calor.	65
Tabla 18. Ahorro energético y económico anual.	85
Tabla 19. Presupuesto de los equipos adicionales a implementar.	86
Tabla 20. Ganancia por producción adicional.	87
Tabla 21. Egresos anuales por mantenimiento y depreciación.	88
Tabla 22. Egresos anuales por producción adicional.	88
Tabla 23. Flujo de caja neto.	89
Tabla 24. VAN y TIR del proyecto.	89

Lista de Figuras

Figura 1. Esquema para un ciclo ideal de refrigeración por compresión de vapor.	23
Figura 2. Diagramas T-s y P-h para un ciclo ideal de refrigeración por compresión de vapor.	23
Figura 3. Diagrama T-s para el ciclo ideal de refrigeración por compresión de vapor.	24
Figura 4. Compresor de Tornillo doble.	28
Figura 5. Funcionamiento del condensador Evaporativo.	29
Figura 6. Control de lazo abierto o feedforward.	35
Figura 7. Control de lazo cerrado o feedback.	35
Figura 8. Diagrama de bloques de un controlador PID.	36
Figura 9. Diagrama de bloques de un controlador PID.	37
Figura 10. Diagrama de bloques de un controlador PID adaptativo.	38
Figura 11. Plano Parcial de área de congelado.	44
Figura 12. Proceso Productivo de la empresa PPSAC.	45
Figura 13. Presentación del cubo de mango.	52
Figura 14. Variación de presiones durante el día con producción de mango.	55
Figura 15. Condiciones termodinámicas del ciclo.	56
Figura 16. Diagrama P-h para el ciclo de refrigeración IQF.	56
Figura 17. Diagrama T-s para el ciclo de refrigeración IQF.	57
Figura 18. Esquema del sistema de refrigeración del túnel IQF.	58
Figura 19. Correlación empírica para el número de Nusselt.	64
Figura 20. Diagrama de dHe.	66
Figura 21. Diagrama de TCe.	66
Figura 22. Diagrama del modelo del aire dentro del evaporador.	67
Figura 23. Diagrama del coeficiente de transferencia de calor.	67
Figura 24. Diagrama de dHp.	68
Figura 25. Diagrama de dHa.	68
Figura 26. Diagrama de TCF.	69
Figura 27. Diagrama del modelo del aire y producto en la faja transportadora.	69
Figura 28. Diagrama del modelo del sistema de congelado IQF.	70
Figura 29. Diagrama del algoritmo del controlador PID.	70
Figura 30. Diagrama del sistema de congelado con el controlador PID.	71
Figura 31. Diagrama P&ID del sistema de control de temperatura.	72
Figura 32. Diseño panel HMI para control.	73
Figura 33. Variador de frecuencia Altivar320.	74
Figura 34. PLC Siemens Simatic S7 1200 CPU 1214C.	74
Figura 35. PLC Modulo S7 1200 Analog Input 4AI.	75
Figura 36. PLC Modulo S7 1200 Analog Output 4AO.	75
Figura 37. Sensor de temperatura RTD PT100.	76
Figura 38. Sensor de temperatura infrarrojo PyroCouple.	76
Figura 39. Simatic HMI KTP400 Basic Panel.	77
Figura 40. Variación de temperatura del mango dentro del túnel IQF.	78
Figura 41. Temperatura (T_2) dentro del túnel IQF.	78
Figura 42. Revoluciones del ventilador.	79
Figura 43. Temperatura (T_2) dentro del túnel IQF – Caso 1.	80
Figura 44. Temperatura (T_{p2}) la salida del túnel – Caso 1.	80
Figura 45. Revoluciones del ventilador – Caso 1.	80
Figura 46. Parámetro K_p del PID – Caso 1.	81
Figura 47. Parámetro K_i del PID – Caso 1.	81

Figura 48. Parámetro Kd del PID – Caso 1.....	81
Figura 49. Temperatura (T_2) dentro del túnel IQF – Caso 2.....	83
Figura 50. Temperatura (T_{p2}) la salida del túnel – Caso 2.....	83
Figura 51. Revoluciones del ventilador – Caso 2.....	83
Figura 52. Parámetro Kp del PID – Caso 2.....	84
Figura 53. Parámetro Ki del PID – Caso 2.....	84
Figura 54. Parámetro Kd del PID – Caso 2.....	84

Lista de Anexos

Anexo 1. Calor específico de los productos.....	94
Anexo 2. Hoja de datos de seguridad del Amoniaco.	95
Anexo 3. Recibo del consumo eléctrico Enero-2019.....	96
Anexo 4. Motor Lincoln del ventilador centrífugo del túnel IQF.....	97
Anexo 5. Luminaria del túnel IQF.....	98
Anexo 6. Especificaciones del compresor de tornillo.....	98
Anexo 7. Especificaciones del Condensador Evaporativo.....	99
Anexo 8. Parte de control de las condiciones del compresor.....	100
Anexo 9. Programación en TiaPortal.....	101
Anexo 10. Programación de la simulación en Matlab.....	102
Anexo 11. Vista general seccionada del Túnel IQF.....	103
Anexo 12. Dimensiones del agitador de cadena del túnel IQF.....	103
Anexo 13. Localización de las tuberías del sistema dentro del túnel IQF.....	104
Anexo 14. Diseño general del túnel IQF.....	105
Anexo 15. Distribución del túnel IQF en la planta.....	106
Anexo 16. Dimensiones del cuarto del túnel IQF.....	107
Anexo 17. Vista isométrica del sistema interior de la faja del túnel IQF.....	108
Anexo 18. Especificación de la faja por cadena.....	109
Anexo 19. Disposición de tuberías y tanques para la circulación de Amoniaco (Vista Frontal).....	110
Anexo 20. Disposición de tuberías y tanques para la circulación de Amoniaco (Vista Superior).....	111

RESUMEN

El ministro de Agricultura y Riego, Gustavo Mostajo, informó al diario Gestión que en el período enero-octubre del 2018, las agroexportaciones en el Perú aumentaron 13,1% en comparación al mismo periodo del año anterior y sumaron US\$ 5 475 millones. En las agroexportaciones el procesamiento y la conservación de alimentos son de gran importancia. En las empresas agroindustriales, donde se procesan alimentos perecederos, permite conservar la frescura y sabores de los productos, sin descuidar la calidad de estos para su posterior venta en el mercado nacional y extranjero. Chiclayo es una de las regiones con mayor desarrollo del sector agroexportador, siendo la que más ha crecido en ese sector a nivel nacional.

La empresa Procesadora Perú S.A.C. tiene en posesión y uso un túnel continuo IQF (Individual Quick Freezing) con un compresor de tornillo de 112 kW que trabaja a su máxima capacidad, para congelar los alimentos, tres ventiladores centrífugos de 11 kW que girando a una velocidad fija esparcen el aire refrigerado por todo el túnel; teniendo una productividad de 1200 kg/h de una variedad de productos como mango, banano y frijol de palo. Teniendo todo este sistema un gasto de energía eléctrica del 31% respecto al consumo total de la empresa. Uno de los problemas es que la temperatura del producto al entrar al túnel es variable haciendo que los equipos trabajen a su máxima potencia esto conlleva al uso desmedido de la energía eléctrica siendo un gasto innecesario para la empresa, además la calidad del producto final en la producción se ve influenciada por las condiciones térmicas que no cumplan los estándares del mercado.

Ante esto, se propuso el diseño de un sistema de control PID adaptativo capaz de analizar constantemente los niveles de temperatura del producto dentro del túnel IQF y de acuerdo a esos valores regule las revoluciones de los ventiladores, manteniendo las condiciones deseadas, alcanzando la independencia de procesos anteriores y disminuyendo el consumo eléctrico de los ventiladores hasta en un 10%, provocando que se procese más producto de calidad, haciendo viable la implementación de este sistema.

Palabras Clave: Control PID, temperatura, congelado, consumo eléctrico, túnel continuo, IQF.

ABSTRACT

The Minister of Agriculture and Irrigation, Gustavo Mostajo, informed the newspaper Gestión that in the January-October 2018 period, agro-exports in Peru increased 13,1% compared to the same period of the previous year and totaled US \$ 5 475 million. In agro-exports food processing and conservation is of great importance. In the agro-industrial companies, where perishable foods are processed, it allows to preserve the freshness and flavors of the products, without neglecting the quality of these for their subsequent sale in the national and foreign market. Chiclayo is one of the regions with the greatest development of the agro-export sector, being the one that has grown the most in that sector nationwide.

The company Procesadora Perú S.A.C. It has in possession and use a continuous tunnel IQF (Individual Quick Freezing) with a screw compressor of 112 kW that works at its maximum capacity, to freeze food, three centrifugal fans of 11 kW that spinning at a fixed speed spread the cooled air all over the tunnel; having a productivity of 1200 kg/h of a variety of products such as mango, banana and stick bean. Having this entire system an electric energy expenditure of 31% compared to the total consumption of the company. One of the problems is that the temperature of the product when entering the tunnel is variable, causing the equipment to work at its maximum power, which leads to excessive use of electrical energy being an unnecessary expense for the company, in addition to the quality of the final product in the production is influenced by thermal conditions that do not meet market standards.

Given this, it was proposed the design of an adaptive PID control system capable of constantly analyzing the temperature levels of the product within the IQF tunnel and according to those values regulate the revolutions of the fans, maintaining the desired conditions, achieving the independence of previous processes and decreasing the electrical consumption of the fans by up to 10%, causing more quality product to be processed, making the implementation of this system viable.

Keywords: Control PID, temperature, frozen, electricity consumption, continuous tunnel, IQF.

INTRODUCCIÓN

A inicios del siglo XXI, las empresas exportadoras según un artículo publicado en el portal web “El Montonero” han ido creciendo debido a nuevas leyes que establecen la posibilidad de crear un mercado de tierras, así como la motivación para la inversión privada. Esto ha desarrollado una competencia entre las empresas para ser las más reconocidas en el mercado, pero para que se logre este objetivo deben de hacer grandes inversiones en infraestructura y equipos ofreciendo productos de calidad.

Por otro lado, a lo largo de los últimos años, el clima en el mundo ha ido cambiando de manera que ha afectado a los ecosistemas. Todo este cambio es debido a la industrialización de todos los procesos que han llevado a la utilización en demasía de energía eléctrica para alimentar los equipos que se encuentran dentro de las plantas.

El consumo eléctrico con el cambio climático está relacionado, pues al haber más demanda de energía, las empresas generadoras que utilizan energías limpias no tienen la capacidad de cumplir con esa demanda por lo que, irremediablemente, se debe usar la generación térmica la cual emite gases de efecto invernadero que dañan al medio ambiente.

Por lo tanto, si se observa el crecimiento del mercado agroexportador donde las empresas deben utilizar más equipos de manera continua, ser competitivas económicamente y a la par cuidar el medio ambiente, aparecerá el término de eficiencia energética el cual su objetivo es de reducir la cantidad de energía requerida para proporcionar productos y servicios sin dejar de lado la calidad que se ofrece.

La empresa Procesadora Perú S.A.C. (PPSAC) tiene en su planta de congelado un túnel continuo IQF, el cual es un proceso de congelación rápida que forma pequeños cristales de hielo dentro del tejido de los productos evitando que los tejidos vegetales se rompan. Esto permite que el alimento mantenga su textura, sus nutrientes y el sabor que tenía cuando recién fue cosechado.

El sistema de congelación del túnel IQF es por compresión de vapor, en este caso utiliza el amoníaco como fluido refrigerante. El equipo que controla las condiciones es el compresor, pero sin valerse de la temperatura del producto dentro del túnel.

Es por eso que la empresa PPSAC en el afán de ser competitiva en el mercado busca una manera de tener una eficiencia energética dentro de su planta de congelado y mejorar las operaciones manuales ejecutadas por los trabajadores. Para ello este trabajo de investigación propone un sistema de control PID que permita mantener unas condiciones deseadas para el producto y a la vez de disminuir los costos del consumo de la energía eléctrica beneficiando a la empresa y al medio ambiente.

CAPÍTULO I

SITUACIÓN PROBLEMÁTICA

1.1. Descripción de la problemática

Según el diario Gestión, en el año 2018; el Perú a nivel de Latinoamérica, tiene una de las tarifas de electricidad más altas en el sector industrial, después de Guatemala, Chile, Uruguay y Costa Rica. La tarifa de electricidad para ese sector, en el primer trimestre del año 2016, fue de 13,85 centavos de dólar americano (US\$) por kilovatio-hora (kWh).

La Asociación de Exportadores (ADEX) expresa que el sector agroexportador del país viene desarrollándose fuertemente provocando, en las empresas, la necesidad de invertir en sus equipos para ser más eficaces dentro del mercado. La empresa Procesadora Perú S.A.C. tiene en su planta de congelado un túnel continuo IQF en la cual sus equipos trabajan a su máxima potencia lo cual hace que el consumo eléctrico sea elevado.

El proceso de congelado depende del flujo de refrigerante para determinar la temperatura del aire dentro del túnel, a su vez los ventiladores se encargan de darle el flujo de aire necesario al producto para que absorba su calor. Los equipos dentro del túnel IQF trabajan a su máxima potencia debido a que la temperatura del producto a la entrada varía según las condiciones de los procesos anteriores.

El congelamiento del producto influirá en la conservación de este, por lo que si el sistema no trabaja en buenas condiciones el resultado será un producto de baja calidad, generando desconfianza en los clientes y por ende una disminución en las ventas.

Es por eso que un deficiente control de la temperatura del producto al momento de realizar el proceso de congelado genera un gasto de energía eléctrica innecesaria, siendo un gasto económico para la empresa.

1.2. Justificación del problema

En los últimos años la industria alimentaria en el país está evolucionando de acuerdo a las tendencias y exigencias del mercado por productos saludables, y ya no solo se enfocan en mejorar la calidad de sus productos sino en innovar. Es por eso que el uso de equipos convencionales poco confiables está siendo superado por la implementación de equipos modernos o la mejora de los ya existentes basándose en el uso eficiente de los recursos para obtener un ahorro económico en la empresa. Es por eso que la ingeniería mecánica eléctrica nos permite dar soluciones en la parte técnica-económica.

En una empresa que se dedica al procesamiento de alimentos congelados el mantener su temperatura a ciertos parámetros validados para cada producto es crítico porque afecta directamente a la calidad del mismo; es por eso que la implementación de un sistema de control satisface esta necesidad. Además, al hacer que los equipos trabajen eficientemente esto disminuye el consumo de energía eléctrica generando así un ahorro económico

Así mismo, el ahorro de energía eléctrica está de la mano con el cuidado del medio ambiente debido a que en los últimos años a nivel mundial se viene concientizando el uso desmedido de la energía eléctrica ya que es una de las principales causas de las emisiones de gases de efecto invernadero, responsables del cambio climático.

El deficiente sistema de control, así como la antigüedad del mismo justifica el diseño de un nuevo sistema de control PID que sea capaz de mantener la temperatura deseada del producto dentro del túnel de congelamiento utilizando de manera adecuada la energía eléctrica y así reducir el costo de operación de este proceso.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo Principal

- Diseñar un sistema de control PID adaptativo de temperatura en cubos de mango para reducir el consumo eléctrico del túnel continuo IQF en la empresa Procesadora Perú S.A.C.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Determinar la situación actual del sistema de congelado del túnel continuo IQF en la empresa Procesadora Perú S.A.C.
- Modelar matemáticamente el proceso de congelado en el túnel continuo IQF y elaborar los diagramas de bloques para su simulación.
- Diseñar y simular el sistema de control de temperatura del mango en el túnel continuo IQF utilizando un controlador PID adaptativo.
- Determinar la reducción del consumo eléctrico y realizar la evaluación económica del sistema de control diseñado para su implementación.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación

Para esta investigación se ha realizado una búsqueda bibliográfica de investigaciones anteriores sobre temas y áreas relacionadas al sistema de refrigeración continuo IQF y al control de los procesos utilizando diferentes equipos.

F. Ordoñez [1] describe todo sobre el túnel continuo IQF que utiliza amoníaco como refrigerante, en su trabajo propone el mantenimiento preventivo de estos túneles, así como lo importante que es tener un control de la temperatura de los productos que congela.

W. Guzmán [2] diseñó una planta piloto de refrigeración industrial y plantea las estrategias de control que se deben utilizar en estas para tener un producto de calidad manteniendo las condiciones de la planta al variar el flujo de refrigerante y del flujo de aire.

J. Alonso [3] realizó el modelado y control multivariable de un sistema de refrigeración por compresión de vapor donde se observa que para modelar un sistema de refrigeración existen varias entradas y salidas que se deben de tomar en consideración haciendo que la dinámica del sistema sea no lineal.

S. Venegas [4] diseñó un control en cascada para la optimización del consumo de energía eléctrica de los compresores de pistón para un proceso de refrigeración de envasado de bebidas gasificadas el cual proporciona una opción para el diseño del controlador que se usará, sin embargo, este método presenta muchas desventajas.

A. Chancusing y D. Herrera [5] diseñaron un sistema automático para reducir el tiempo de enfriamiento en la línea de producción de chocolate describiendo la importancia del flujo de aire en la transferencia de calor que tiene con el producto y al variar esta condición el tiempo de enfriamiento también varía.

2.2. Bases teóricas

Antes de empezar con el desarrollo de este trabajo es necesario plantear la teoría necesaria para su elaboración.

2.2.1. Fundamentos de termodinámica y transferencia de calor

Es importante conocer los fundamentos termodinámicos que están involucrados en el sistema de refrigeración del túnel IQF para poder controlar la temperatura dentro de este. En esta sección se tomará de referencia los libros de Y. Cengel [6] y R. Dossat [7] que plantean los principales conceptos de la termodinámica y la refrigeración.

▪ Sistema termodinámico

Se define como “*una cantidad de materia o región en el espacio elegido para análisis*”. La parte exterior del sistema se le llama alrededores y la superficie real o imaginaria que separa estas dos partes se le conoce como frontera.

Los sistemas cerrados constan de una masa fija donde solo la energía, calor y trabajo, puede cruzar la frontera y el volumen puede ser variable. Si la energía no cruza hacia los alrededores se le conoce como un sistema aislado.

En este trabajo se utilizarán los sistemas abiertos o también llamados volúmenes de control, que, comparado con los cerrados, si existe un flujo másico. Es por eso que se plantea la ecuación de conservación de la masa, la cual indica que la variación de masa dentro del volumen de control es igual a la diferencia entre el flujo másico de entrada y de salida.

$$\sum_{ent} \dot{m}_e - \sum_{sal} \dot{m}_s = \frac{dm_{VC}(t)}{dt} \quad (1)$$

Donde:

$$\begin{aligned} \dot{m}_e &= \text{Flujo másico a la entrada} && [kg/s] \\ \dot{m}_s &= \text{Flujo másico a la salida} && [kg/s] \\ m_{VC} &= \text{Masa dentro del vol. de control} && [kg] \end{aligned}$$

Siendo el flujo másico (\dot{m}):

$$\dot{m} = \rho f = \rho AV \quad (2)$$

Donde:

$$\begin{aligned} \rho &= \text{Densidad del fluido} && [kg/m^3] \\ f &= \text{Flujo volumétrico} && [m^3/s] \\ A &= \text{Sección perpendicular al flujo} && [m^2] \\ V &= \text{Velocidad del fluido en una dirección} && [m/s] \end{aligned}$$

Además, cualquier cambio, de las propiedades en condición de equilibrio, de un estado a otro en un sistema se le conoce como proceso y si después de varios procesos llegase a la condición inicial se formaría un ciclo. [6, pp. 10-15]

▪ Ley de la conservación de la energía

La primera ley de la termodinámica establece que la cantidad de energía en cualquier sistema termodinámico se mantiene. Cuando un cuerpo posee energía significa que se ha efectuado trabajo sobre este, proporcionándole movimiento y posición. Por lo tanto, la energía puede clasificarse como energía cinética y potencial, manifestándose en cualquiera de sus formas, que, en el caso de la refrigeración, serán la energía mecánica, térmica y eléctrica; teniendo una conversión de una forma a otra. [7, p. 21] Por lo tanto, el cambio de energía dentro del sistema será igual a la diferencia de energías que se encuentran a la entrada y a la salida de este. Se puede definir con la siguiente ecuación. [6]

$$\begin{aligned} & \left[\dot{Q}_{ent} + \dot{W}_{ent} + \sum_{ent} \dot{m}(h + e_c + e_p) \right] \\ & - \left[\dot{Q}_{sal} + \dot{W}_{sal} + \sum_{sal} \dot{m}(h + e_c + e_p) \right] \\ & = \frac{d}{dt} \left[m_{vc} \sum (u + e_c + e_p)_{vc} \right] \end{aligned} \quad (3)$$

Donde:

$$\begin{aligned} \dot{Q} &= \text{Flujo de calor} && [kJ/s] \\ \dot{W} &= \text{Flujo de trabajo} && [kJ/s] \\ h &= \text{Energía específica} && [kJ/kg] \\ e_c, e_p &= \text{Energía cinética y potencial} && [kJ/kg] \\ u &= \text{Energía interna específica} && [kJ/kg] \end{aligned}$$

▪ **Transferencia de calor**

“El calor es una forma de energía”, siendo la transferencia de calor como la energía fluyendo de un cuerpo con temperatura alta hacia un cuerpo con temperatura baja. La temperatura es una propiedad de la materia que expresa el grado de agitación de las partículas dentro de un cuerpo. [6], [7] Según J. Holman [8] la transferencia de calor ocurre de tres formas:

- ✓ **Conducción**, cuando dos o más cuerpos entra en contacto directo sin intercambio de material.

$$\dot{Q}_{cond} = A_s \frac{k dT}{L dt} \quad (4)$$

Donde:

\dot{Q}_{cond}	= Flujo de calor por conducción	[W]
A_s	= Área de la superficie en contacto	[m ²]
k	= Conductividad térmica del material	[W/m * K]
L	= Espesor del material	[m]
T	= Temperatura del material	[K]

- ✓ **Convección**, cuando hay un contacto indirecto por medio del movimiento de un fluido.

$$\dot{Q}_{conv} = hA_s(T_s - T_\infty) \quad (5)$$

Donde:

\dot{Q}_{conv}	= Flujo de calor por convección	[W]
A_s	= Área de la superficie en contacto	[m ²]
h	= Coeficiente de convección del fluido	[W/m ² * K]
T_s	= Temperatura de la superficie	[K]
T_∞	= Temperatura del fluido	[K]

- ✓ **Radiación**, cuando la energía se transmite sin necesidad de un medio material, emitida en forma de ondas electromagnéticas. Sin embargo, en los sistemas de refrigeración la radiación es insignificante por lo que no se tomará en cuenta.

- **Saturación, sobrecalentamiento y subenfriado**

Para una determinada presión, la temperatura de saturación es la máxima que el líquido puede tener y la temperatura mínima que el vapor puede tener antes de que cambien de fase. [7, pp. 35-36]

El vapor a cualquier temperatura arriba de su temperatura de saturación, correspondiente a su presión, es vapor sobrecalentado; siendo netamente vapor. Sin embargo, al aumentar la presión se eleva el valor de la temperatura de saturación donde la ebullición solo ocurre a esa temperatura. Caso contrario, en el líquido subenfriado, la temperatura esta por bajo de la saturación siendo este netamente líquido. [7, pp. 34-68]

- **Entalpia y entropía**

La energía térmica que produce un cambio en la temperatura se le conoce como calor sensible y la que cauce un cambio en la fase de la sustancia se le llama calor latente. Además, con fines teóricos se dice que la temperatura permanece constante durante un cambio de fase. [7, p. 34]

Una propiedad importante de la materia es la entalpia siendo “*la suma de todas las energías suministradas para mantenerla en su condición actual con respecto a una condición inicial conocida arbitrariamente como entalpia cero*”. [7, p. 69] La cual se define en la siguiente ecuación.

$$h = u - pv \quad (6)$$

Donde:

$h =$ Entalpia	[kJ/kg]
$u =$ Energía interna	[kJ/kg]
$p =$ Presión Absoluta	[kPa]
$v =$ Volumen específico	[m ³ /kg]

Donde u es la parte de la energía transferida que es almacenada en el fluido mientras pv es la parte de la energía que sale del fluido para efectuar trabajo.

Para calcular la variación de entalpía en una sustancia se tiene la siguiente ecuación:

$$\Delta h = C_p \Delta T \quad (7)$$

Donde:

$$\begin{aligned} C_p &= \text{Calor específico a presión cte.} && [kJ/kg * K] \\ \Delta T &= \text{Varación de la temperatura} && [K] \end{aligned}$$

El C_p depende de la temperatura inicial de la sustancia, pero para fines prácticos se toma como un promedio dentro de un rango de temperaturas en el que se trabajará.

Existen otros términos para la entalpía como:

- ✓ **Entalpía de líquido saturado (h_f)**, que es la suma de energía necesaria para elevar la temperatura del líquido hasta la temperatura de saturación.
- ✓ **Entalpía de vaporización (h_{fg})**, que es el calor latente de vaporización a la temperatura de saturación dada.
- ✓ **Entalpía de líquido saturado (h_g)**, que es la suma de los dos anteriores.

Por otro lado, la tasa de variación de energía interna dentro de un volumen de control se expresa en la siguiente ecuación.

$$\frac{d(mu)_{VC}}{dt} = mC_v \frac{dT}{dt} \quad (8)$$

Donde:

$$C_v = \text{Calor específico a volumen cte.} \quad [kJ/kg * K]$$

Al igual que el C_p , el C_v depende de la temperatura inicial de la sustancia, pero para fines prácticos se toma un promedio.

Otra propiedad importante es la entropía siendo “*la expresión de la energía total transferida al material por grado de temperatura absoluta para llevar al material a su condición real desde un punto de referencia cero*”. Con frecuencia, se describe como una medición de la energía no aprovechada.

[7, p. 70]

2.2.2. Sistema de refrigeración por compresión de vapor

▪ Ciclo de refrigeración ideal

La refrigeración se define como “proceso de eliminación de calor” este proceso disminuye la temperatura de un espacio o material, esto ocurre cuando la sustancia refrigerante, en estado líquido, absorbe calor a medida que cambia de fase. [7, pp. 109-112] En la *Figura 1* se muestra un sistema típico de compresión de vapor.

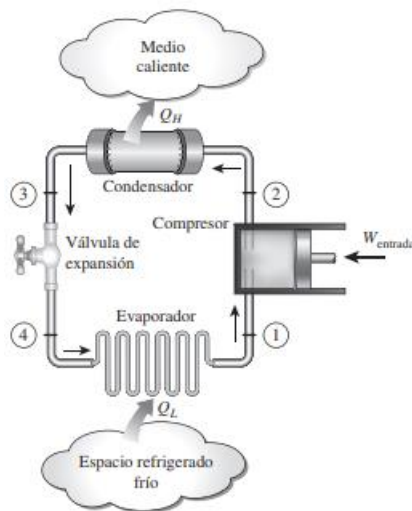


Figura 1. Esquema para un ciclo ideal de refrigeración por compresión de vapor.

Fuente: Y. Cengel [6]

En la *Figura 2* se muestran los diagramas T - s y P - h que son herramientas de valor para el análisis de los ciclos de refrigeración donde ocurren los siguientes procesos: [7, p. 117]

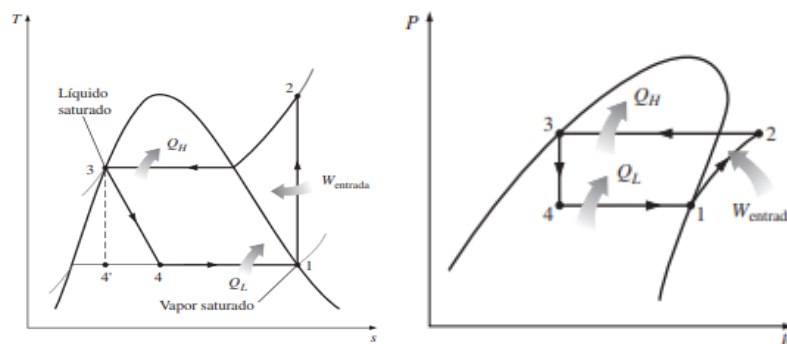


Figura 2. Diagramas T - s y P - h para un ciclo ideal de refrigeración por compresión de vapor.

Fuente: Y. Cengel [6]

- ✓ **Proceso 1 – 2 (\dot{W}_c):** Este proceso isentrópico ocurre en el compresor donde el vapor saturado proveniente del evaporador se le añade un trabajo aumentando su presión, temperatura y entalpía hasta convertirlo en vapor sobrecalentado.
- ✓ **Proceso 2 – 3 (\dot{Q}_H):** Este proceso isobárico ocurre en el condensador donde al vapor sobrecalentado se le disminuye la temperatura manteniendo la presión hasta convertirlo en líquido saturado.
- ✓ **Proceso 3 – 4 (\dot{Q}_V):** Este proceso isoentálpico ocurre en la válvula de expansión donde la presión y temperatura del líquido saturado disminuye hasta convertirse en una mezcla bifásica.
- ✓ **Proceso 4 – 1 (\dot{Q}_L):** Este proceso isotérmico e isobárico ocurre en el evaporador donde el calor es absorbido aumentando su entropía y entalpía hasta las condiciones de succión en el compresor.

▪ **Ciclo real de refrigeración por compresión de vapor**

La diferencia que se tiene con el ciclo ideal es debido a las irreversibilidades de los procesos que ocurren en los componentes del sistema; siendo las más comunes la fricción del fluido que causa caídas de presión y la transferencia de calor hacia o desde los alrededores. [6, p. 616] En la *Figura 3* se muestra cómo sería el ciclo real en un diagrama T - s .

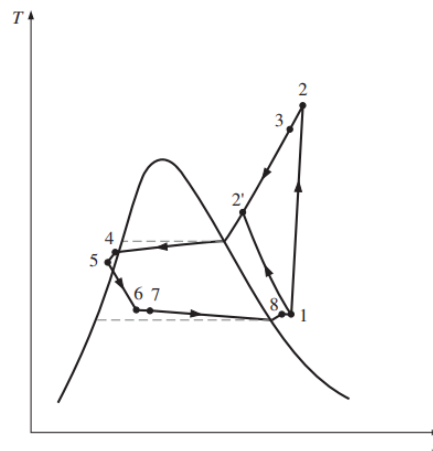


Figura 3. Diagrama T - s para el ciclo ideal de refrigeración por compresión de vapor.

Fuente: Y. Cengel [6]

En el proceso de compresión real se incluye la fricción de fluido, lo cual aumenta o disminuye la entropía y la transferencia de calor. Además, es inevitable la caída de presión en el condensador, así como en las tuberías que lo conectan con el compresor y la válvula de expansión. [6]. Es por eso que existen, en los sistemas reales, equipos auxiliares que ayudan a que el sistema se asemeje a uno real.

▪ **Cargas de enfriamiento**

La carga de enfriamiento es el resultado de varias fuentes de calor, estas pueden ser: [7, p. 187]

- ✓ **Carga de fuga**, siendo el calor transferido por conducción en las paredes debido a la diferencia de temperaturas entre el interior y el exterior. El cálculo de esta carga se encuentra en la *Ecuación 2*.
- ✓ **Carga por cambio de aire**, siendo el calor que pasa al espacio refrigerado debido al aire exterior caliente el cual pasa a través de puertas o ventanas.

$$\dot{Q}_{ca} = \dot{m}(h_e - h_i) \quad (9)$$

Donde:

\dot{Q}_{ca}	= Carga por cambio de aire	[W]
\dot{m}	= Flujo másico de aire al espacio	[kg/s]
h_e	= Entalpía del aire al exterior	[J/kg]
h_i	= Entalpía del aire al interior	[J/kg]

- ✓ **Carga del producto**, siendo el calor cedido por el producto caliente a medida que su temperatura disminuye hasta las condiciones deseadas.

$$Q_{pr} = \dot{m}C_e\Delta T \quad (10)$$

Donde:

\dot{Q}_{pr}	= Carga del producto	[W]
\dot{m}	= Flujo másico del producto	[kg/s]
C_e	= Calor esp. arriba de congelación	[kJ/kg * K]
ΔT	= Variación de temperatura	[K]

- ✓ **Carga del personal**, siendo el calor cedido por el personal que trabaja dentro del espacio refrigerado.
- ✓ **Carga de equipos**, siendo el calor cedido por cualquier equipo dentro del espacio, tales como motores eléctricos, alumbrado y equipos electrónicos.
- ✓ **Cargas adicionales**, siendo este el calor cedido por otros dispositivos o irregularidades que no se pueden calcular fácilmente dentro del sistema. Es por eso que W. Stoecker [9] propone aumentarle un 10% a la suma de las cargas anteriormente mencionadas.

2.2.3. Sistema de refrigeración rápida en túneles continuos

▪ Refrigeración rápida en alimentos

La refrigeración es el uso más común en la conservación de artículos comerciales no perecibles ya que se debe mantener en un estado fresco durante su almacenamiento y transporte. No existe un método de refrigeración que sea el mejor para todos los casos porque dependerá de factores como tipo de producto, tiempo de conservación, disponibilidad de transporte y equipo de almacenamiento. [7, pp. 170-171]

El control de las condiciones específicas que se tiene en un ambiente a congelar proporciona situaciones desfavorables para agentes destructores de los alimentos, como enzimas y microorganismo, volviéndoles inefectivos.

El tiempo a la cual se exponen los agentes destructores para ser eliminados dependerá de la temperatura; mientras más alta sea, menor será el tiempo de exposición. Otro factor importante es la humedad; el calor húmedo es más efectivo debido a su poder de penetración, a menor temperatura y tiempo, comparado con el calor seco.

El enfriamiento de los productos en su estado natural pierde rápidamente humedad siendo importante tener un enfriamiento rápido con velocidades altas de aire dentro del cuarto de manera que la temperatura y la presión del vapor sean bajadas lo más rápido posible para evitar pérdidas excesivas de humedad por evaporación y encogimiento. [7, p. 174]

Según R. Dossat [7] D. K. Tressler, en 1932, estableció lo siguiente como ventajas principales del congelamiento rápido:

- ✓ Los cristales de hielo formados son mucho más pequeños y, por tanto, causan menos daño a las células.
- ✓ Hay menos tiempo para la difusión de las sales y para la separación del agua en forma de hielo.
- ✓ Las bacterias, mohos y levaduras no pueden tener crecimiento con lo cual evita la descomposición durante el congelamiento.

■ **Amoniaco como refrigerante**

El refrigerante es *“la sustancia empleada para absorber calor”* la cual debe ser apropiada para el ciclo de compresión de vapor, teniendo ciertas propiedades químicas, físicas y termodinámicas que satisfagan las necesidades del sistema durante su utilización según la aplicación que se le dé. [7, p. 365]

El refrigerante debe ser químicamente inerte y no ser inflamable, ni explosivo, ni tóxico, tanto en su estado puro como cuando se mezcla con el aire, el aceite lubricante y el material de los equipos utilizados. Además de no contaminar los productos en caso de una fuga dentro sistema refrigerado. [7, p. 366]

Aunque el amoníaco bajo ciertas condiciones es tóxico, poco inflamable y explosivo, sus propiedades térmicas lo hacen ser un refrigerante ideal para fábricas de congelado. [7, p. 395]. Las presiones en el evaporador y condensador son moderadas, lo cual los equipos pueden construirse con materiales de peso ligero pero la presencia de humedad el amoníaco se vuelve corrosivo en materiales no ferrosos. Por otro lado, la temperatura adiabática en la línea de descarga es relativamente alta lo cual el sistema debe tener un enfriamiento en el compresor. Además, se debe evitar sobrecalentamiento en la succión.

2.2.4. Componentes del sistema de refrigeración IQF

Las siglas IQF vienen del término Individual Quick Freezing que significa congelación individual rápida, como se habló en la sección anterior es importante congelar el producto en periodos cortos para mantener sus propiedades nutritivas. En este sistema el producto es colocado en una faja transportadora que pasa por dentro del túnel de refrigeración. El túnel contiene ventiladores que hacen circular el aire frío provocando la absorción del calor por convección forzada. (Ver *Anexo*)

Se describirá los componentes principales del sistema de refrigeración del túnel IQF que se tiene en la empresa. [10] Además el plano del sistema de refrigeración se muestra en el *Plano 2*.

▪ Compresor

Debido a que el sistema trabaja de manera continua absorbiendo la carga térmica de los productos la mejor opción es el uso de compresores de tipo doble tornillo helicoidal donde la compresión del vapor es debido al giro de los tornillos, macho y hembra, dentro de una cámara cilíndrica. El vapor en la descarga es controlado por una válvula de corredera accionada por un pistón que se desplaza por la presión del aceite dentro del sistema. Este equipo, comparado con los compresores de pistón, responde de manera rápida a las variaciones de carga del sistema. Los ejes de los tornillos están acoplados a un motor eléctrico además de tener un sistema de circulación de aceite.

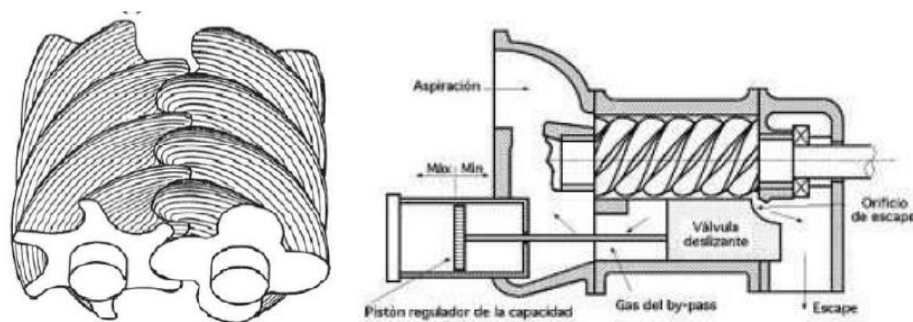


Figura 4. Compresor de Tornillo doble.

Fuente: W. Stoecker, 1998 [9]

▪ Condensador Evaporativo

Este tipo de equipo es un intercambiador de calor compacto que enfría el refrigerante por medio de aire y agua llevándolo a temperaturas más bajas si fuera por un solo medio. Para la circulación de aire utiliza ventiladores centrífugos y para la circulación del agua, blanda para no dañar el equipo, utiliza una bomba que recircula el agua utilizando sistemas de aspersión y una bandeja receptora. Según G. Ramos [10], existen tres variables que influyen en el rendimiento de este equipo: el flujo del aire, el flujo del agua y la temperatura del bulbo húmedo. La última variable que depende de las condiciones ambientales de lugar de trabajo.

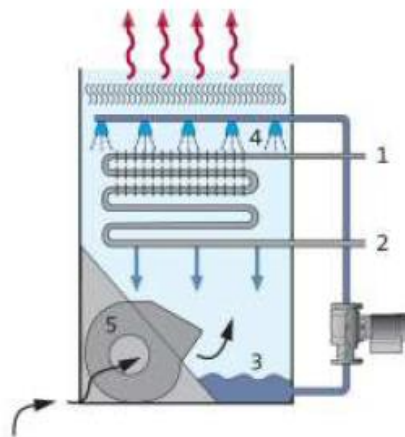


Figura 5. Funcionamiento del condensador Evaporativo.

Fuente: F. Ordoñez, 2013 [1]

▪ Evaporador

Este equipo es un evaporador inundado que tiene serpentines aleteados puestos de manera horizontal debajo de la faja de transportadora del producto en una estructura metálica para que con los ventiladores el aire que están dentro del túnel fluya por este evaporador y absorba el calor. Al decir inundado significa que en el evaporador solo llega refrigerante líquido y sale como mezcla bifásica. (Ver Anexo)

▪ Tanques

La función de estos equipos es almacenar el refrigerante y separarlo naturalmente en sus fases de líquido y vapor para asegurar que en los demás equipos llegue en la fase deseada. En el sistema se tienen los siguientes tanques: (Ver *Anexo*)

- ✓ **Tanque separador de Aceite**, está ubicado de manera horizontal a la salida del compresor; donde su función es separar el aceite del amoniaco, que se mezcla en el compresor, mediante unos filtros coalescentes. Asegurando así que llegue solo vapor sobrecalentado al condensador.
- ✓ **Termosifón**, este tanque vertical se ubica a la salida del condensador; donde su función es suministrar el refrigerante líquido al enfriador de aceite del compresor y otra parte al tanque receptor de líquido. Cuando ese refrigerante ha absorbido el calor del aceite es llevado de nuevo al condensador por medio de este tanque.
- ✓ **Tanque enfriador de Aceite**, este tanque horizontal funciona como un intercambiador de calor utilizando el refrigerante en estado líquido para enfriar el aceite que será llevado al compresor por medio de una bomba.
- ✓ **Tanque receptor de Líquido**, ubicado debajo del condensador; recibe el líquido condensado que será llevado hacia el tanque separador de baja, separando el vapor que aún no se ha condensado y llevándolo de nuevo al condensador. Además, sirve como almacén del refrigerante del sistema cuando este no está en operación.
- ✓ **Economizador**, este tanque horizontal es utilizado para tomar parte del líquido refrigerante antes de llegar al tanque separador de baja utilizándolo para enfriar al compresor y evitar el aumento de entropía en la compresión.
- ✓ **Tanque separador de Baja**, debido que el refrigerante sale del evaporador en estado bifásico, la fase líquida es separada de manera natural antes de ingresar a los compresores, porque el refrigerante en la succión debe de estar en fase gaseosa para no dañarlo.

Esta separación de las fases se realiza en este tanque debido a la acción de la gravedad, recirculando al evaporador el líquido y llevando al compresor el vapor. Además, deben ser aislados con planchas de aluminio.

▪ **Tuberías**

Las tuberías se encargan de conectar los equipos del sistema teniendo diferente clasificación dentro del sistema como:

- ✓ Líneas de alta presión
- ✓ Líneas de baja presión
- ✓ Líneas ecualizadoras
- ✓ Líneas de aceite

El criterio para seleccionar una tubería depende de la caída de presión debido a la rugosidad del material dentro de ella y la velocidad con la que es transportado el fluido.

▪ **Válvulas**

Los tipos de válvula que se tiene son:

- ✓ **Válvula de paso**, que se encargan de abrir y cerrar las tuberías, pero no controla la cantidad de fluido que pasa a través de ella, teniendo la función de aislar una parte del sistema.
- ✓ **Válvula de seguridad**, se activa cuando la presión del refrigerante supera el parámetro que controla. Mayormente se coloca en las líneas de descarga evitando sobrepresiones dentro de las tuberías según fueron diseñadas.
- ✓ **Válvulas de purga y servicio**, son utilizadas para intercambiar o suministrar fluido al sistema además que permiten el acoplamiento de otros dispositivos para la medición.
- ✓ **Válvula antirretorno**, tienen por objetivo cerrar por completo el paso de un fluido en una dirección.

- ✓ **Válvula solenoide**, es operada eléctricamente de forma automática donde existe un solenoide, cuando es energizada por un campo magnético arrastra el vástago, y el émbolo de conexión permitiendo el paso del fluido.

- **Controladores**

Los controladores son dispositivos electromecánicos para mantener al sistema dentro de sus parámetros de operación y proteger los equipos cuando ocurre una falla o existen perturbaciones. Según G. Ramos [10] tenemos los más comunes:

- ✓ **Presostato de Alta Presión**, tiene un conmutador unipolar que abre el circuito entre dos bornes cuando la presión de condensación aumenta interrumpiendo el funcionamiento del compresor debido a una presión de descarga por encima de lo permitido.
- ✓ **Presostato de Baja Presión**, tiene un conmutador unipolar, que abre el circuito entre los bornes que cierran el sistema del equipo a controlar cuando disminuye la presión de aspiración.
- ✓ **Termostatos**, se usan para medir la temperatura dentro de los ambientes a refrigerar y envía señales eléctricas para controlar los ventiladores y las válvulas solenoides.
- ✓ **Control de Presión Diferencial**, tiene un balancín que conecta los interruptores del sistema según la diferencia entre las lecturas que toman los sensores de alta y baja presión.
- ✓ **Control de Nivel de Líquido**, existe el tipo mecánico, donde se restringe el paso del fluido mediante una válvula que contiene un vástago en su interior. Otro tipo, siendo el más usado, es el interruptor que utiliza un flotador que, según el nivel del líquido, mediante un mecanismo, regula el flujo de líquido dentro de la cámara.

2.2.5. Fundamentos de ingeniería de control

El control automático es muy importante en la ingeniería volviéndose una parte integral de los procesos modernos industriales. Es por eso que se debe hablar de los términos básicos que son tomados de referencia de los libros de K. Ogata [11] y R. Hernández [12] .

▪ Variables y perturbaciones

La variable controlada (dependiente), también conocida como salida, es *“la cantidad o condición que se mide y controla”*. En este trabajo la variable a controlar será la temperatura dentro del túnel IQF.

Mientras que la variable manipulada (independiente) es *“la cantidad o condición que el controlador modifica”* afectando al valor de la variable controlada. En este caso las variables manipuladas serán los componentes del sistema de refrigeración.

Según K. Ogata [11] controlar significa: *“medir el valor de la variable controlada del sistema y aplicar la variable manipulada al sistema para corregir o limitar una desviación del valor medido a partir de un valor deseado”*.

Una perturbación es una señal que afecta de manera negativa el valor de la salida en un sistema [11, p. 2]. En este caso la carga de los alimentos será tratada como una perturbación que afectará a la temperatura dentro del túnel.

▪ Sistema y clasificación

Como se sabe un sistema es un conjunto de componentes que cumplen un mismo objetivo en el cual interactúan las variables de entrada y salida. Los sistemas se pueden clasificar de diferentes formas:

- ✓ Según el número de entradas y salidas, donde se utilizan las letras S (Single) y M (Multiple) para indicar la cantidad; y las letras I (Input) y O (Output) para indicar la posición.
- ✓ Según la naturaleza física del sistema como; mecánicos, térmicos, eléctricos, etc.

- ✓ Según la linealidad, pueden ser lineales o no lineales donde se determina si las ecuaciones que modelan el sistema cumplen o no la proporcionalidad y superposición.

Los sistemas de control, generalmente, son no lineales. Sin embargo, es posible aproximarlos mediante modelos matemáticos lineales. Es conveniente que el sistema diseñado tenga mínimos errores en respuesta a la señal de entrada. Por este motivo, debe ser razonable la eliminación de perturbaciones dentro del sistema. [11, p. 9]

Para describir un sistema se utiliza la función de transferencia que relaciona la salida y la entrada expresadas en el plano de Laplace, teniendo la siguiente ecuación:

$$T(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} \quad (11)$$

Donde:

$T(s) = \text{Función de transferencia}$

$Y(s) = \text{Función de salida}$

$U(s) = \text{Función de entrada}$

▪ **Control automático**

En la industria, mayormente, un proceso dinámico sufre cambios ya sea por sí mismo o por su entorno, lo cual la necesidad de mantener sus variables de operación estables hizo la aparición del control automático. Existen dos tipos:

✓ **Control de lazo abierto o feedforward**

Busca que la variable de salida alcance un valor ya definido según un el comando que se le dé a la entrada del proceso. Las desventajas que tiene este control es que no se compara la salida del sistema con el valor deseado y dependerá de la calibración del controlador.

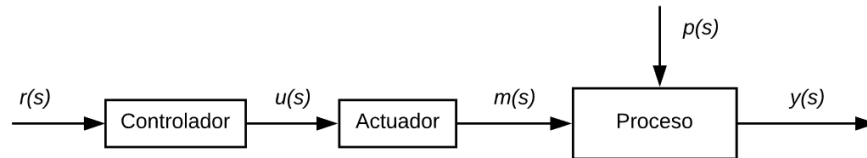


Figura 6. Control de lazo abierto o feedforward
Fuente: Elaboración propia basado en [11]

✓ Control de lazo cerrado o feedback

En este caso la variable de salida es medida, esa medición es llevada al controlador que mediante un valor de referencia manda una señal al actuador, modificando la variable de entrada. Este tipo de control es mejor debido a que mantiene la variable controlada a su valor de referencia aun cuando se presenten las perturbaciones. La única desventaja es que compensa el disturbio cuando ya se ha generado.

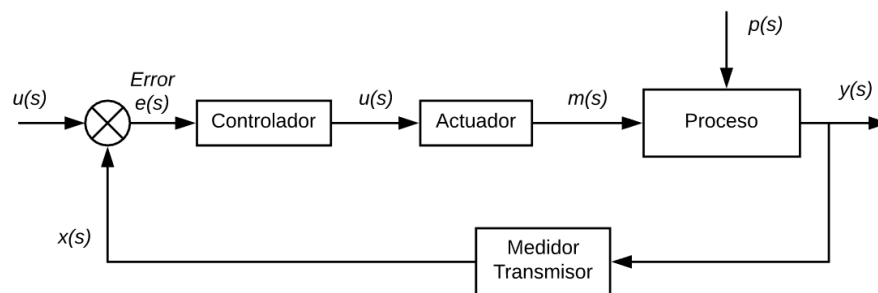


Figura 7. Control de lazo cerrado o feedback
Fuente: Elaboración propia basado en [11]

▪ Controladores PID

El controlador Proporcional Integral Derivativo (PID) es el más utilizado en las plantas industriales debido a las facilidades que tiene como la utilización de varias entradas y salidas.

- ✓ Acción de controlador proporcional (K), introduce una ganancia adicional.
- ✓ Acción de controlador integral (T_i), proporcionar error nulo.
- ✓ Acción de controlador derivativo (T_d), tiene carácter anticipativo.

La función de transferencia del controlador PID se define como:

$$C(s) = K \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) = K + \frac{K_I}{s} + K_D s \quad (12)$$

Donde:

K = Constante proporcional

K_I = Constante integral

K_D = Constante derivativa

El controlador PID se puede representar en un diagrama de bloques como se muestra en la siguiente *Figura 8* donde se observa su funcionamiento interno.

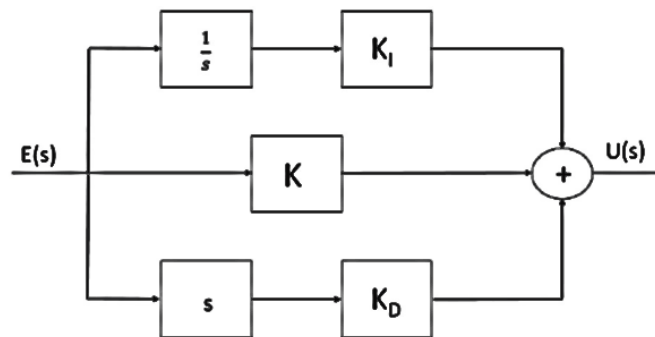


Figura 8. Diagrama de bloques de un controlador PID.

Fuente: A. Aramburú [13]

La señal de error entra a los tres elementos y la señal de salida es de comando que suma los efectos de los tres componentes.

Según S. Venegas [4], un método fundamental para la sintonización de reguladores PID (Proporcional Integral Derivativo), es el propuesto por Ziegler y Nichols en el año 1942 cuyo nombre más conocido es el método de la oscilación sostenida, el cual es un algoritmo basado en la respuesta en frecuencia del proceso donde sus características a determinar son:

- ✓ **Ganancia proporcional crítica (K_c)**, siendo la ganancia de un controlador solo proporcional, que provoca que el sistema sea oscilatorio.
- ✓ **Periodo de oscilación sostenida (T_c)**, siendo el periodo de oscilación que se consigue con la ganancia crítica.

▪ Autosintonización de controladores PID

Asignar los parámetros al controlador PID en algunas ocasiones puede ser una tarea compleja por lo que muchos fabricantes han facilitado al comprador un procedimiento sencillo que es automatizar la fase de diseño de los parámetros del PID. Según A. Aramburú [13] el método tiene dos fases, la primera es buscar información del proceso y en base a un algoritmo se asignan los valores al controlador y la segunda fase se regula estos valores. Además, este método debe realizarse cuando el proceso se encuentra en estado estacionario.

Basado en los estudios [13], se realizó un algoritmo de Autosintonización basado en la teoría de interacción adaptativa donde se realiza un descenso gradual de los parámetros que el algoritmo no requiere de información del sistema haciéndolo aplicable para cualquier sistema.

Este algoritmo descompone el sistema en 4 subsistemas, los cuales son el proceso, el proporcional, el integrador y el derivativo donde los parámetros del controlador se consideran como la conexión entre estos subsistemas. En la *Figura 9* se observa en un diagrama de bloques como se descompone el sistema.

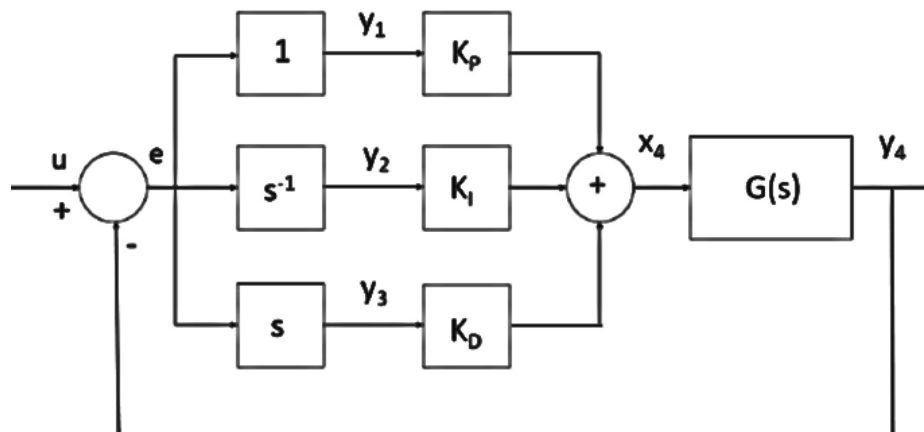


Figura 9. Diagrama de bloques de un controlador PID.

Fuente: A. Aramburú [13]

Donde los parámetros se pueden definir mediante las siguientes ecuaciones

$$Kp = -\gamma e \gamma_1 \quad (13)$$

$$Ki = -\gamma e \gamma_2 \quad (14)$$

$$Kd = -\gamma e \gamma_3 \quad (15)$$

Donde γ es la constante de aprendizaje que tendrá el controlador y esto en un diagrama de bloques se representaría de la siguiente manera.

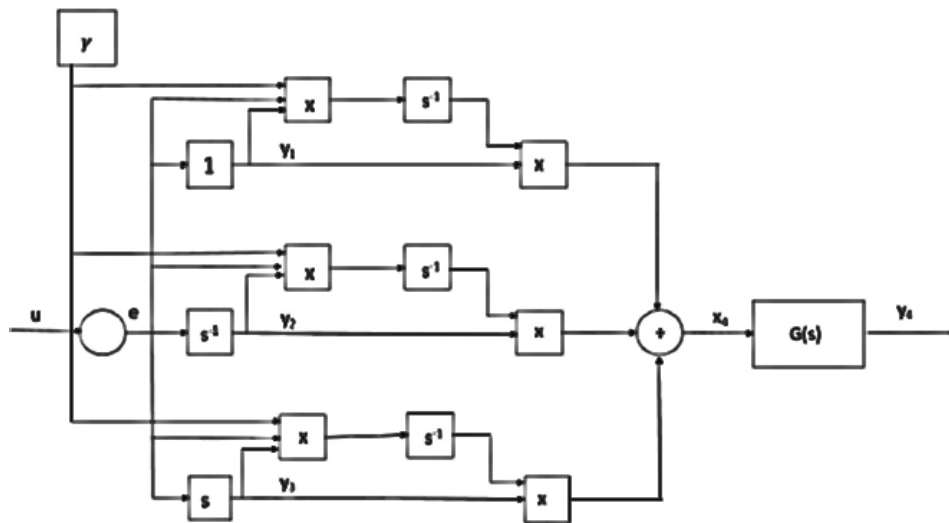


Figura 10. Diagrama de bloques de un controlador PID adaptativo.

Fuente: A. Aramburú [13]

▪ MATLAB - SIMULINK

Actualmente existen herramientas computacionales para modelar, simular y analizar sistemas dinámicos. Una de estas herramientas es SIMULINK que es una *toolbox* de MATLAB la cual soporta sistemas lineales y no lineales donde puedes construir modelos mediante diagrama de bloques con una interfaz gráfica. Este programa se utilizara para el modelado para facilitar el desarrollo de la función de transferencia ya que los procesos tienen múltiples entradas y salidas. [14]

2.3. Hipótesis

¿Será factible diseñar un sistema de control PID adaptativo de temperatura en cubos de mango para reducir el consumo eléctrico de un túnel continuo IQF en la empresa Procesadora Perú S.A.C.?

La temperatura del mango a la salida del túnel IQF se mantendrá constante debido al controlador PID adaptativo que controla las revoluciones de los motores de los ventiladores. El diseño del sistema de control hará que la empresa reduzca el consumo eléctrico de sus equipos manteniendo la calidad del producto que procesa.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1. Enfoque y diseño

El enfoque de esta investigación será cuantitativo porque se utilizará datos concretos con un proceso deductivo, secuencial y probatorio de manera objetiva. Además, se tiene los siguientes criterios:

- ✓ **De acuerdo al fin que se persigue**, será aplicada porque en ella se muestra la aplicación de los conocimientos teóricos sobre el control de sistemas de refrigeración.
- ✓ **De acuerdo al diseño de investigación**, será descriptiva porque en ella se describe las características de cada uno de los componentes del sistema para poder realizar su control.
- ✓ **De acuerdo a la técnica de constatación**, será experimental porque el sistema de control estará hecho para las condiciones encontradas dentro de la empresa y no existirá un sistema de control igual a este.

3.2. Sujetos de la investigación

El siguiente trabajo de investigación se realizara dentro del área de congelado de la empresa Procesadora Perú S.A.C. en Chiclayo, Lambayeque y se llevara a cabo durante el periodo de un año, este será 2019. Donde el sujeto de estudio será el sistema de refrigeración del túnel continuo IQF.

La variable independiente dentro de este trabajo de investigación será:

Diseño de un sistema de control PID adaptativo de temperatura en cubos de mango en el túnel IQF

Así mismo, las variables dependientes serán:

Tabla 1. Operaciones con variables dependientes

Variable	Logros	Indicadores
Carga térmica del producto	Medir la temperatura a la entrada y salida del túnel IQF	✓ Temperatura del producto
Reducción de energía eléctrica	Determinar la situación actual del sistema	✓ Recopilación de información
	Modelamiento del sistema	✓ Ahorro de energía eléctrica

3.3. Métodos y procedimientos

El método de este trabajo será descriptivo, ya que se describirá el proceso de congelamiento del producto para poder modelar el sistema y poder realizar el control del mismo. A continuación, se describe los procedimientos que se hará en cada objetivo específico:

- ✓ **Primero Objetivo**, se determinará la situación actual del sistema de congelado usando el método de recopilación de información en la empresa desde las líneas de producción, el consumo energético y todo lo relacionado con el sistema de congelado del túnel IQF como planos y especificaciones técnicas de cada equipo. Además, se utilizara la búsqueda bibliográfica para determinar de forma teórica algunos parámetros de los equipos que la empresa no cuenta.
- ✓ **Segundo objetivo**, para poder modelar el sistema se utilizar el método gráfico de modelamiento con el uso de la herramienta computacional Simulink. Realizando el modelamiento de cada proceso por separado para luego formar un sistema con varias entradas y salidas.
- ✓ **Tercer objetivo**, para realizar el sistema de control se utilizará el método de control automático PID partiendo de las características que deberá satisfacer el sistema controlado y se simulará recreando ciertas condiciones para ver el comportamiento del sistema.

- ✓ **Cuarto objetivo**, para determinar la reducción de consumo eléctrico se utilizara los datos obtenidos en la simulación y se usará el método de evaluación económica utilizando el VAN y TIR para que la empresa pueda decidir o no la implementación de este sistema.

3.4. Técnicas e instrumentos

Las técnicas e instrumentos serán:

- ✓ **Microsoft Excel**, para realizar cálculos y gráficos.
- ✓ **EES**, para realizar el análisis termodinámico y obtener las gráficas del refrigerante.
- ✓ **Matlab y Simulink**, para el modelamiento matemático del proceso.

CAPÍTULO IV

SITUACIÓN ACTUAL DEL TÚNEL IQF

4.1. Descripción de la empresa

Procesadora Perú S.A.C. (PPSAC) es una empresa ubicada en el parque industrial de la ciudad de Chiclayo, Lambayeque; la cual desarrolla productos agro-industriales mediante la mejora continua de sus procesos cuidando las necesidades de sus clientes, colaboradores y entorno. Su visión es ser reconocida por sus grupos de interés como una empresa competitiva que satisface las necesidades del mercado mundial de alimentos a través de la gestión de calidad.

Desde el 22 de Setiembre de 1999 procesan alimentos congelados con una línea de frío, que tiene como sistema principal un túnel continuo IQF que llega a temperaturas menores a -24°C , con una producción de 1200 Kg/h y capacidad de almacenaje de hasta 160 toneladas para su posterior exportación. Los principales productos que procesa son:

- | | |
|---------------------|------------------|
| ✓ Palta | ✓ Banano |
| ✓ Arándanos azules | ✓ Cubos de Mango |
| ✓ Pulpa de maracuyá | ✓ Frijol de palo |

Así mismo cuenta con un Control de Procesos basado en el estudio de Análisis de Riesgos y Puntos Críticos de Control (HACCP) con la finalidad de garantizar un producto de calidad para el mercado internacional. Además, cuenta con un certificado en seguridad alimentaria BRC la cual facilita la estandarización de la calidad, inocuidad, la seguridad y los criterios operativos donde uno de sus objetivos es la disminución de costos de producción. [15]

El producto de estudio que se ha escogido es el mango debido a que es uno de los productos con mayor volumen y de mayor Brix (sólidos totales) haciendo que este se congele más lento.

A continuación, se muestra en la *Figura 6* un plano parcial de la empresa con el área de congelado para poder entender el proceso productivo. El plano general se muestra en el *Plano 1*.

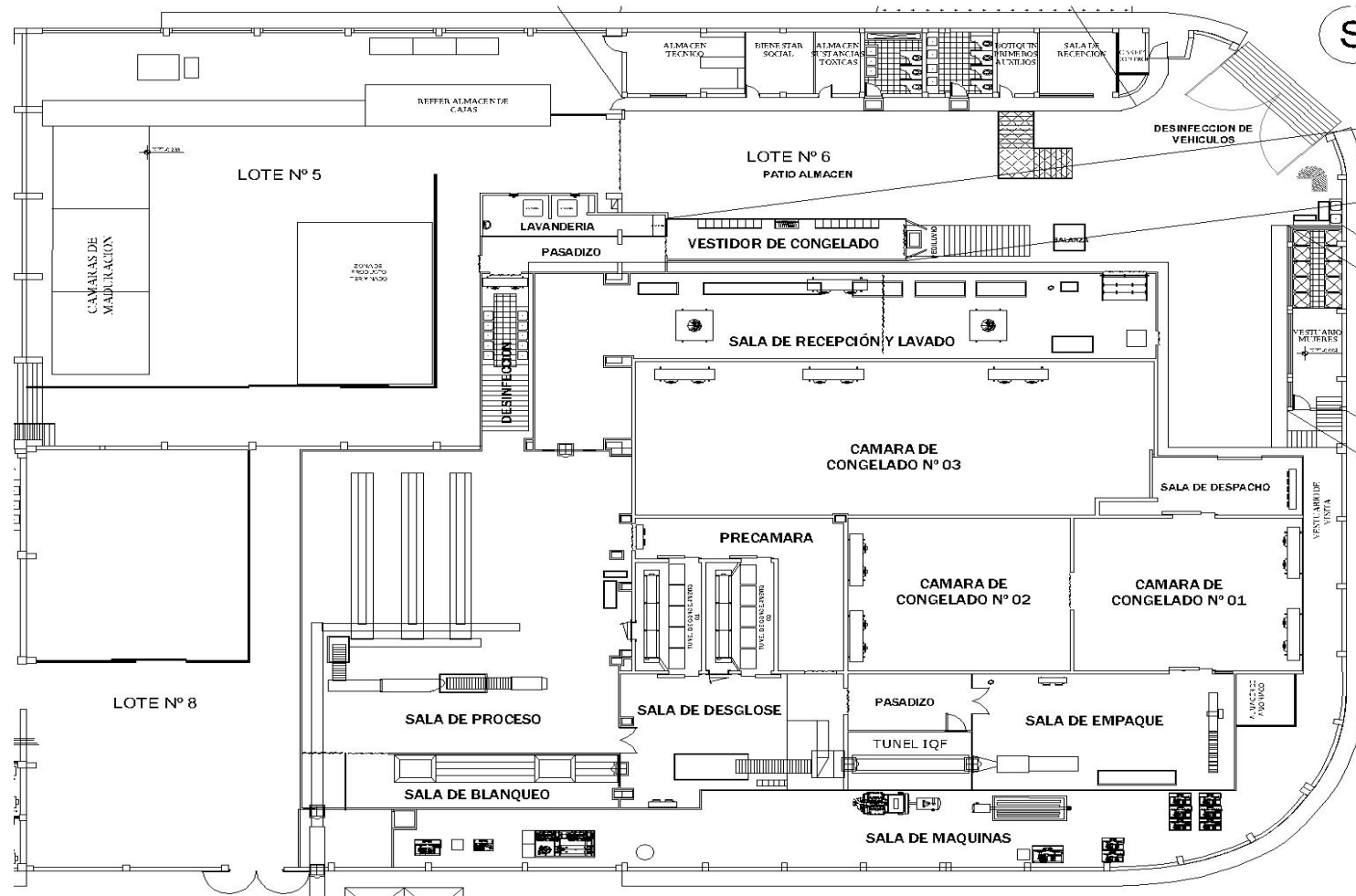


Figura 11. Plano Parcial de área de congelado.

Fuente: PPSAC

4.1.1. Proceso productivo

El producto que se usará para este trabajo será el mango. Para ello, en un diagrama de flujo, se muestra las etapas del proceso productivo en la línea de congelado que tiene la empresa.

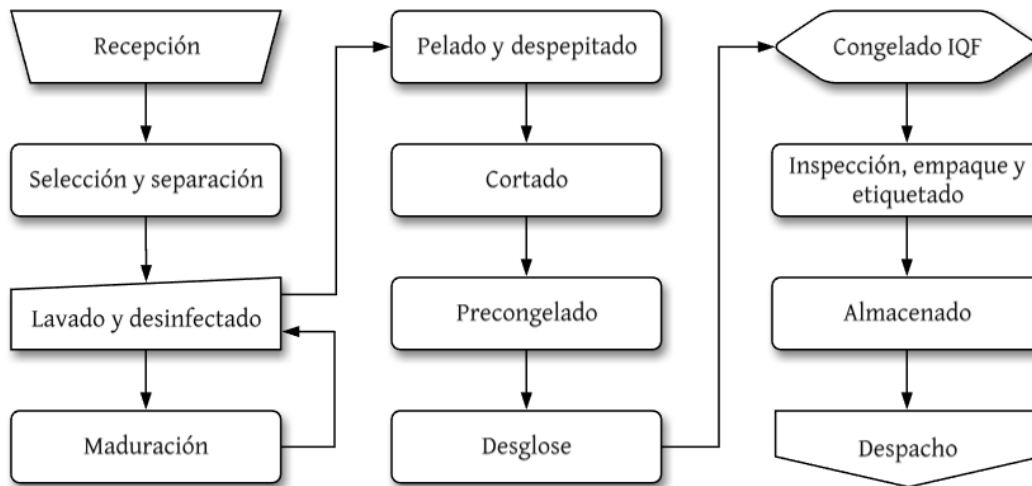


Figura 12. Proceso Productivo de la empresa PPSAC.

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se hablará a detalle de cada etapa de la línea de producción:

- **Recepción:**

La planta recibe, en el patio del Lote N°6 como se muestra en la *Figura 6*, el producto a temperatura ambiente sin madurar el cual está en cestas caladas con capacidad de 30 Kg puestas sobre un pallet para ser transportado por un montacargas hacia las siguientes etapas.

- **Selección y separación**

El producto recibido es seleccionado y separado según su nivel de maduración para determinar que producto será procesado primero y cuánto tiempo deberán estar en los maduradores del Lote N°5.

- **Lavado y desinfectado**

En esta etapa el producto es llevado por el vehículo montacargas hacia el Lote N°8 donde se encuentran los equipos que lavan y desinfectan la materia prima antes de ir a la etapa de maduración y a la etapa de pelado y despepitado ubicado en la Sala de Proceso.

- **Maduración**

En la etapa de maduración las cestas son transportadas por el montacargas hacia las cuatro cámaras de maduración que tienen control de temperaturas cada una por separado dejándose madurar un periodo de tiempo según el producto y su nivel de maduración en condiciones de temperatura de 20 °C y se aplica gas acetil dentro de la cámara. Luego es llevada nuevamente al lavado y desinfectado para pasar a la Sala de Proceso.

- **Pelado y despepitado**

En esta etapa el proceso es manual, el producto entra por tres líneas con fajas transportadoras donde el operario pela y extrae la pepa si lo tuviera, desechándose la cascara a través de otra línea que la lleva hasta el exterior.

- **Cortado**

Una vez el producto este pelado y despepitado, pasa por unos equipos con cuchillas rotativas que lo cortan a una dimensión determinada la cual será determinada por su presentación final. En esta sala, debido a la gran cantidad de operarios trabajando se encuentra a una temperatura aproximada de 10 °C teniendo equipos de refrigeración.

- **Precongelado**

Cuando el producto ya está cortado, es llevado por el personal a las cámaras de precongelado donde se encuentran los dos túneles estáticos que son cuartos pequeños donde se almacena el producto cortado por un periodo de tiempo hasta que la temperatura disminuye a -5 °C.

- **Desglose**

Se lleva el producto precongelado hacia la Sala de Desglose donde se separa manualmente debido a la congelación estática que se le ha hecho, produciendo que el producto se pegase. Esta sala está a 6 °C.

- **Congelado IQF**

Luego de desglosar el producto entra al túnel continuo IQF por medio de una faja transportadora que atraviesa todo el túnel hasta la sala de empaque. Dentro del túnel el producto se lleva a -25 °C en 8,1 min.

- **Inspección, empaque y etiquetado**

En la sala de Empaque el producto ya congelado es empacado en cajas y etiquetado; pero antes de pasar al almacenado es inspeccionado por un detector de metales para cumplir las normas de calidad que la empresa ofrece.

- **Almacenado**

El área de congelado cuenta con tres cámaras de frío donde se almacena el producto terminado. Donde la temperatura dentro de ellas debe estar a -26 °C para mantener el producto congelado hasta que se cumpla la cantidad necesaria para ser vendido.

- **Despacho**

Una vez sea completada la capacidad de un contenedor, el producto es despachado a un camión con contenedores que también tienen un sistema de refrigeración para mantener la temperatura mientras el producto es transportado hacia el puerto y sea exportado.

4.1.2. Análisis de las fuentes de energía del túnel IQF

▪ Energía eléctrica

La empresa PPSAC tiene un contrato de cliente libre no regulado con la compañía eléctrica Electronorte S.A. teniendo una tarifa promedio por su consumo eléctrico (*Anexo 7*) de 0,10 Soles/KWh teniendo una potencia contratada de 700 KW con una tensión de 10 KV, además la tarifa por la potencia reactiva pasada del límite de 30% es de 0,05 soles/KWh. Lo bueno de ser un cliente libre es que no se te cobra un adicional por el consumo de energía en horas punta por lo que los equipos pueden trabajar todo el día.

En el año 2018, la energía consumida fue de 3 110 837 KWh teniendo un costo de S/. 797 213,40. Si se sabe que el túnel IQF trabaja un promedio de 20 horas al día en un periodo de 10 meses al año, se puede determinar el consumo eléctrico de este. A continuación, se muestra en la *Tabla 2* el consumo eléctrico de cada equipo del túnel IQF para poder estimar el porcentaje de energía consumida en la empresa.

Tabla 2. Consumo de energía anual del túnel IQF.

Cant.	Equipos	Potencia		Operación		Energía
		hp	kW	h/día	h/año	kWh/año
1	Motor del Compresor	150	111,86	20	6 000	671 130,00
3	Ventilador del túnel	45	33,56	20	6 000	201 339,00
1	Ventilador del Condensador	10	7,46	20	6 000	44 742,00
1	Bomba del Condensador	3	2,24	5	1 500	3 355,65
1	Secador de Cadena	7.5	5,59	20	6 000	33 556,50
1	Motor de la Cadena	1	0,75	20	6 000	4 474,20
2	Motor del Thumper	1	0,75	20	6 000	4 474,20
1	Bomba de Aceite	0.5	0,37	2	600	223,71
Total		218	162,56			963 295,26

Fuente: Elaboración propia

Conociendo la potencia y operación de cada equipo, que más adelante se hablará a detalle, podemos obtener la energía consumida en un año, en este caso el 2018, teniendo una energía de 963 295,26 KWh que es el 31% de la energía consumida total y que multiplicándola por la tarifa tendríamos un costo de S/. 96 329,50 nuevos soles. Por lo que al aplicar el sistema de control reduciría este porcentaje.

▪ Consumo de amoniaco

El principal proveedor de gas industrial, en este caso el amoniaco, es la empresa PRAXAIR. El sistema de refrigeración del túnel IQF consume aproximadamente una botella por año la cual tiene un peso neto de 68 Kg y un costo de \$US 850,80 lo cual tiene un equivalente a S/. 2 833,20 nuevos soles por año.

4.2. Parámetros del Túnel continuo IQF

El dimensionamiento del túnel fue hecho especialmente para el congelado de frijol de palo. El tiempo de operación de este sistema es en todo el año, teniendo más producción cuando los productos se encuentran en temporada de cosecha. A continuación, se muestra los parámetros del túnel.

Tabla 3. Parámetros del túnel IQF.

Modelo del túnel	<i>LU-CAL IQF 415-S</i>		
Tiempo de operación		20	h/día
Producción promedio	(M)	1200	kg/h
Temperatura dentro del túnel	(T_m)	-28	°C
Volumen interno		89,91	m ³
Humedad relativa promedio		80	%
Tiempo del producto dentro del túnel	(t)	8,1	min

Fuente: PPSAC.

El material de las paredes del túnel es de poliuretano recubierto con planchas de acero inoxidable AISI 304 por ambos lados.

Tabla 4. Datos de la pared del túnel IQF.

Espesor total por pared		4	in
Capa interna	<i>Poliuretano</i>		
Espesor		0,0956	m
Conductividad térmica		0,0278	W/(m*K)
Capa externa por ambas caras	<i>Acero inoxidable</i>		
Espesor		0,003	m
Conductividad térmica		16	W/(m*K)

Fuente: PPSAC.

Los equipos auxiliares que se encuentran dentro del túnel son los thumpers que se encargan de hacer saltar el producto para que al aire pase por toda su superficie y las luminarias que cuando está en operación están apagadas. Afuera del túnel se encuentra el motor que se encarga de mover la faja de cadenas que transporta al producto dentro del túnel.

Tabla 5. Equipos auxiliares dentro del túnel IQF.

Thumpers (x2)	1	hp
Luminarias (x8)	288	W

Fuente: PPSAC.

Tabla 6. Equipos auxiliares fuera del túnel IQF.

Motorreductor de cadena	1	hp
Revoluciones del motor sin reductor	1750	rpm
Revoluciones del motor con reductor	7,7	rpm
Longitud de la faja	6,25	m
Ancho de la faja	1,19	m

Fuente: PPSAC.

A continuación, se muestra los parámetros de los demás equipos:

- ✓ **Compresor:** Este equipo tiene un sistema de control de lazo abierto que regula la capacidad de compresión sin tener en cuenta la temperatura dentro del túnel de congelación, trabajando siempre a su máxima potencia.

Tabla 7. Parámetros del compresor.

Modelo	<i>SABROE M163 HM</i>		
Potencia del motor		150	hp
Tensión		440	V
Corriente		220	A
Revoluciones		3560	rpm
Arranque	<i>Estado solido</i>		

Fuente: PPSAC.

✓ **Condensador Evaporativo:**

Tabla 8. Parámetros del Condensador Evaporativo.

Modelo	<i>EVAPCO LSCV 135</i>		
Potencia de motor de los ventiladores		10	hp
Revoluciones del motor		3600	rpm
Diámetro de ventilador		40	cm
Bomba		3	hp
Volumen de la bandeja		1	m ³
Temperatura del agua		5	°C
Capacidad de absorción de calor		581	kW

Fuente: PPSAC.

- ✓ **Evaporador inundado:** Este se encuentra dentro del túnel IQF debajo de la faja transportadora de alimentos siendo de tubo descubierto y aleteado por donde pasa el aire desde los ventiladores teniendo las siguientes dimensiones.

Tabla 9. Parámetros del Evaporador Inundado.

Largo que ocupa dentro del túnel		4,8	m
Ancho que ocupa dentro del túnel		1,9	m
Alto que ocupa dentro del túnel		0,45	m
Volumen que ocupa dentro del túnel	(V_e)	2,54	m ³

Fuente: PPSAC.

- ✓ **Ventiladores centrífugos:** Estos succionan el aire por los dos lados del túnel para pasarlo por el evaporador y disminuya su temperatura para luego salir por debajo de la faja de cadena y absorber el calor del producto.

Tabla 10. Parámetros de los ventiladores centrífugos.

Modelo del motor	<i>Lincoln 254T TEFC</i>		
Cantidad		3	motores
Potencia nominal		15	hp
Revoluciones		1750	rpm
Diámetro del ventilador	(D_v)	0,5715	m
Ancho del ventilador	(B_v)	0,385	m

Fuente: PPSAC.

Para determinar a qué velocidad entra el aire al evaporador y a qué velocidad sale hacia el producto se realizó mediciones con un sensor de flujo de aire TM-411 en los tres ventiladores. En la siguiente *Tabla 11* se observa la velocidad promedio a la entrada y salida del evaporador.

Tabla 11. Datos medidos de los ventiladores centrífugos.

Salida	5,4 m/s	5,8 m/s	4,5 m/s
Evaporador	V1	V2	V3
Entrada	16,3 m/s	17,6 m/s	13,6 m/s

Fuente: Elaboración propia.

Por lo que para el análisis se considerara una velocidad de aire promedio entre los 3 ventiladores teniendo el siguiente cuadro.

Tabla 12. Parámetros promedio de los ventiladores centrífugos.

Presión estática	1008,1	hPa
Velocidad de aire promedio a la entrada	15,83	m/s
Velocidad de aire promedio a la salida	5,2	m/s
Coefficiente de pérdida de velocidad	0,33	

Fuente: Elaboración propia.

4.3. Parámetros del mango congelado

El mango es 93% agua por lo que al congelarse disminuye su densidad. El rango de temperatura a la que debe salir del túnel es de -24°C a -26°C si la temperatura fuese más alta o baja dañaría los tejidos orgánicos de este producto.



© CanStockPhoto.com - csp47852362

Figura 13. Presentación del cubo de mango.

Fuente: <https://www.canstockphoto.es/cubos-mango>

Tabla 13. Propiedades físicas del mango.

Producto	Mango		
Temperatura inicial	(T_{p1})	-5	°C
Temperatura final deseada	(T_{p2})	-25	°C
Calor de congelación		272,17	kJ/kg
Calor específico de refrigeración ($T > 0^{\circ}\text{C}$)		3,77	kJ/(kg*°C)
Calor específico de refrigeración ($T < 0^{\circ}\text{C}$)	(C_r)	1,993	kJ/(kg*°C)
Conductividad térmica	(k)	0,547	W/(m*K)
Temperatura de congelación		-1	°C
Presentación	Cubo de mango		
Tamaño del cubo		2,5	cm
Volumen del cubo		15,625	cm ³
Peso del cubo		12	g
Densidad del mango	(d_p)	768	kg/m ³

Fuente: Elaboración propia.

2.3.1. Determinación de la carga de fuga

Se determinará la carga de fuga según las ecuaciones del capítulo 2 para determinar la capacidad de transferencia de calor del evaporador.

✓ Carga de fuga:

Conductividad térmica total:

$$C = \frac{L}{k} = \frac{0,096}{0,28} + 2 \times \frac{0,003}{16} = 0,3418 \frac{m^2 * K}{W}$$

Variación de la temperatura:

Con salas interiores: $\Delta T_1 = 6 - (-28) = 34^{\circ}\text{C}$

Con el exterior: $\Delta T_2 = 25 - (-28) = 53^{\circ}\text{C}$

Área de las paredes en contacto			
Pared lateral mayor		26,0283	m ²
Pared lateral menor		14,3896	m ²
Techo del túnel		21,5845	m ²
Resistencia térmica			
Del poliuretano		3,4388	m ² *K/W
Del acero inoxidable		0,0002	m ² *K/W
Resistencia térmica total		3,4392	m ² *K/W
Variación de temperaturas			
Con salas interiores		34	°C
Con el exterior		53	°C

Carga de fuga:

$$Q_{cond} = \frac{(A_1 \times \Delta T_1) + (A_2 \times \Delta T_2) + 2 \times (A_3 \times \Delta T_1) + (A_4 \times \Delta T_3)}{C}$$

$$Q_{cond} = 9,29 \text{ KW}$$

✓ **Carga del producto:**

Para hallar este valor se utilizara el mango como producto donde su calor específico debajo de congelación se encuentra en el *Anexo 1*.

$$Q_{pr} = 1200 \frac{Kg}{h} \times \frac{1 h}{3600 s} \times 1,993 \frac{KJ}{Kg * ^\circ C} \times (-5 - (-25))^\circ C$$

$$Q_{pr} = 25,13 \text{ KW}$$

Si se le añade la carga producida por los equipos que sería de 27.4 kW y se añadiría un 15% adicional al total se tendría una capacidad frigorífica de:

$$Q_{frig} = 1.15 \times (Q_{cond} + Q_{pr} + Q_{equip})$$

$$Q_{frig} = 71,15 \text{ KW}$$

2.3.2. Análisis del ciclo de refrigeración

En el sistema real la presión y temperatura va variando, durante el día, según la carga térmica del producto y otros factores que se hablaron en el capítulo 2. El compresor tiene un sistema de medió digital lo cual se puede observar minuto a minuto el cambio de las presiones en la succión y la descarga donde el operador tiene un parte de control (*Anexo 8*) donde apunta esos valores en cada hora durante el día obteniendo el siguiente gráfico.

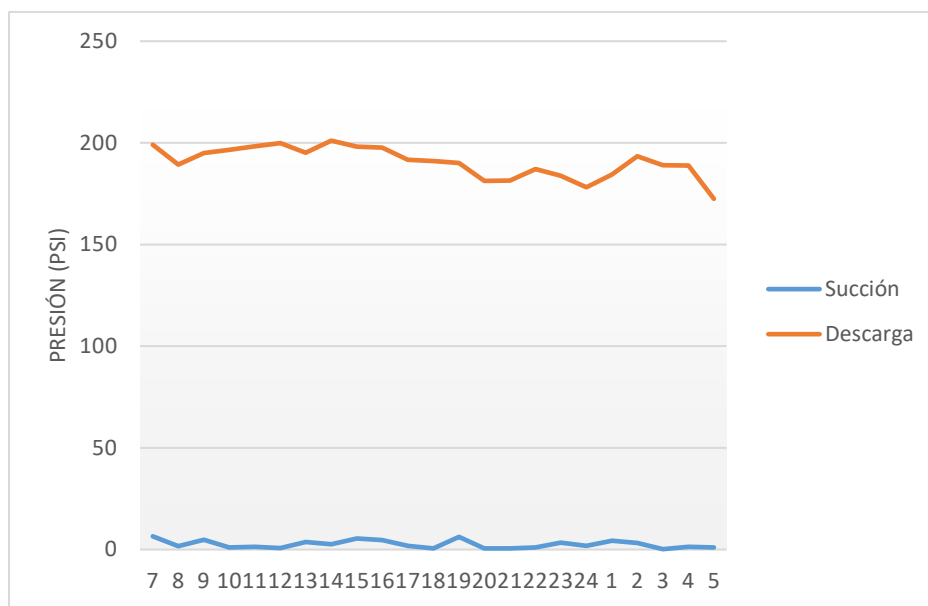


Figura 14. Variación de presiones durante el día con producción de mango.

Fuente: PPSAC

Para poder observar el ciclo termodinámico teórico y poder determinar algunos parámetros que se necesitarán para el análisis se extrae los valores promedio de la entrada y la salida, además se toma una calidad de 1 por ser solo vapor a la succión. Además, se sabe que en el estado 3 y 5 la calidad es de 0 por ser netamente líquido saturado.

Tabla 14. Condiciones de entrada y salida en el compresor.

Presión atmosférica	14.7	psi
Presión promedio del refrigerante a la succión	2.55	psig
Presión promedio del refrigerante a la descarga	190.74	psig

Fuente: Elaboración propia.

2.55	psig	→	118.92	kPa
190.74	psig	→	1416.5	kPa

Para realizar el ciclo de refrigeración bajo esas condiciones se utilizó el software EES que nos permite obtener los diagramas del ciclo, además que se utiliza las propiedades termodinámicas de amoníaco que se incluye en el software. Obteniendo así las propiedades termodinámicas en cada estado.

Sort	h_i	P_i	s_i	T_i	x_i
[1]	1423	118.9	6.067	243.1	1
[2]	1807	1416	6.067	427.1	1
[3]	1489	1416	5.191	309.8	1
[4]	374.1	1416	1.592	309.8	0
[5]	374.1	118.9	1.751	243.1	0
[6]	63.4	118.9	0.4722	243.1	0

Figura 15. Condiciones termodinámicas del ciclo.

Fuente: Elaboración propia con EES.

Conociendo las condiciones en cada estado se puede graficar en diagramas T-s y P-h el ciclo de refrigeración en el túnel IQF.

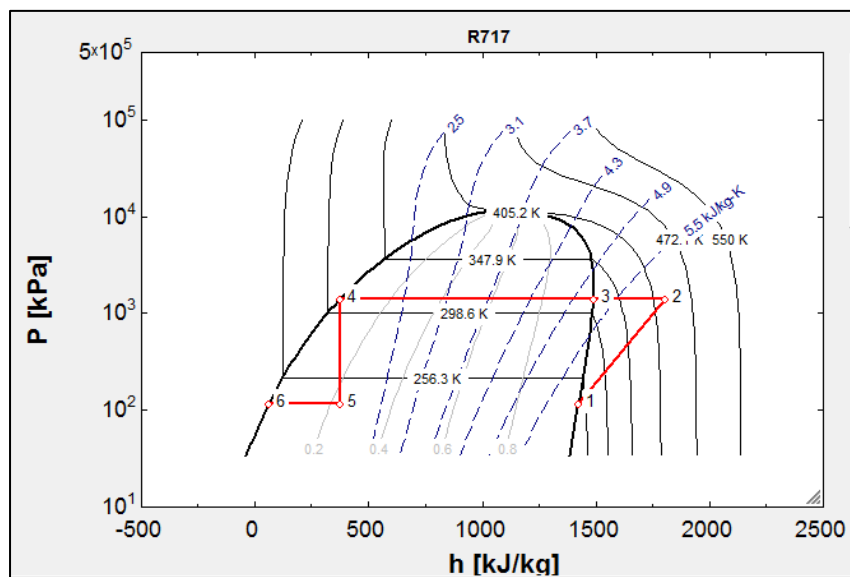


Figura 16. Diagrama P-h para el ciclo de refrigeración IQF.

Fuente: Elaboración propia con EES.

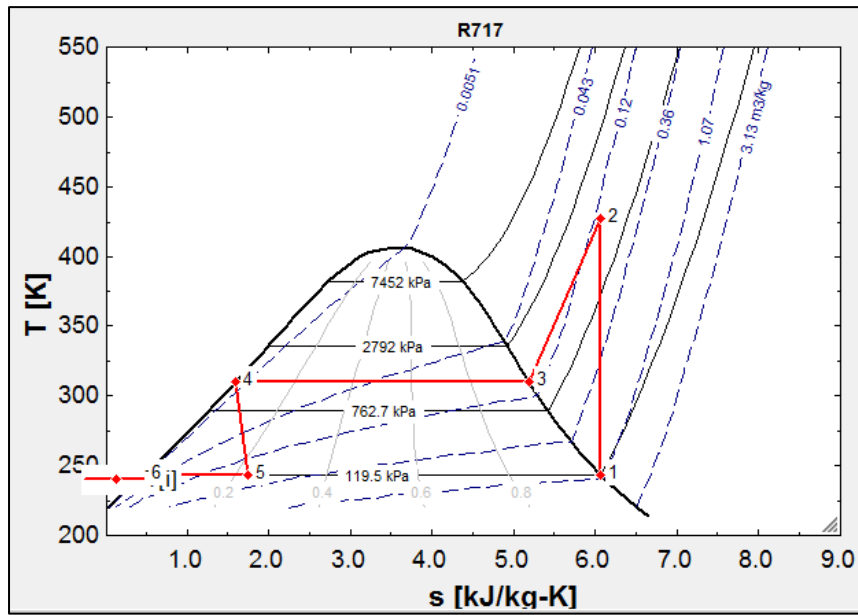


Figura 17. Diagrama T-s para el ciclo de refrigeración IQF.
Fuente: Elaboración propia con EES.

La temperatura en el evaporador es de $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ y se considera como la temperatura de pared del evaporador para los siguientes cálculos.

CAPÍTULO V

DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL PID DE CONGELADO

Para poder elaborar el sistema de control es necesario describir el comportamiento dinámico del sistema de congelado. Para el caso práctico el sistema será descrito de manera simplificada considerando los componentes más importantes. Además, se sabe que el comportamiento de este sistema es no lineal por lo que se utilizará la herramienta de Simulink de Matlab para modelar y simular este sistema con las ecuaciones que se plantearán en este capítulo.

5.1. Modelado del sistema de congelado

Para realizar el modelado se necesita simplificar algunos aspectos que no influyen significativamente o que son complejos de determinar. En la *Figura 18* se observa un esquema donde el sistema se divide en dos procesos, uno en el evaporador y otro en la faja transportadora.

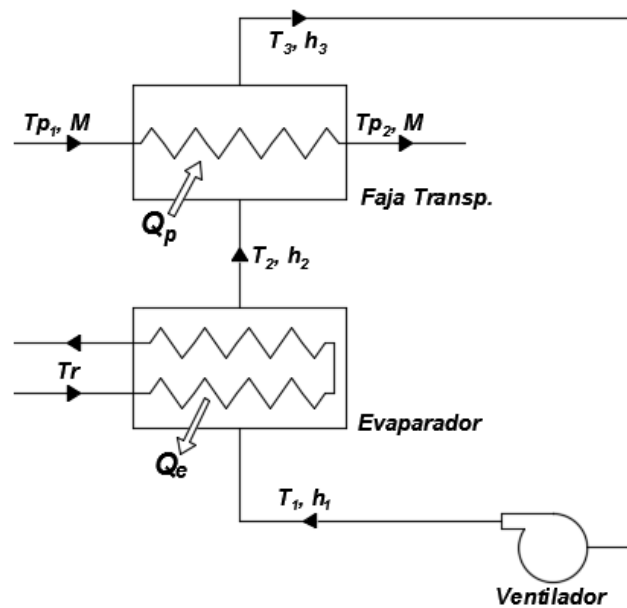


Figura 18. Esquema del sistema de refrigeración del túnel IQF.

Fuente: Elaboración propia.

El diagrama P&ID más detallado con los elementos que se usarán se encuentra en el *Plano 3*.

Donde se plantea las siguientes hipótesis generales:

- Todas las sustancias dentro y fuera del sistema tienen propiedades uniformes y homogéneas.
- Las pérdidas de presión causada por fricción sobre las paredes se consideran despreciables.
- Los equipos auxiliares se encargan de idealizar las condiciones de entrada a los equipos principales.
- Las propiedades del aire son valores promedio para el rango de temperaturas con las que se trabajará.
- El aire recircula dentro del túnel haciendo que las temperaturas 3 y 1 sean iguales.

Como el túnel trabaja a ciertas condiciones de temperatura, las propiedades del aire dependerán de esta como se observa en la *Tabla 15*.

Tabla 15. Propiedades del aire a diferentes temperaturas.

Temp.	Densidad	Cp	k	v	Pr
°C	kg/m ³	kJ/(kg*K)	W/(m*K)	10 ⁻⁵ *m ² /s	
-30	1,451	1,004	0,02134	1,087	0,7425
-20	1,394	1,005	0,02211	1,169	0,7408
-10	1,341	1,006	0,02288	1,252	0,7387
0	1,292	1,006	0,02364	1,338	0,7362
5	1,269	1,006	0,02401	1,382	0,7350
10	1,256	1,006	0,02439	1,426	0,7336
15	1,225	1,007	0,02476	1,470	0,7323
Valor prom.	1,318	1,006	0,02330	1,303	0,7370

Fuente: Y. Cengel [6]

Como se observa en la *Tabla 15* los valores de las propiedades cuando varia la temperatura no difieren en mucho por lo que se toma un valor promedio constante.

Tabla 16. Propiedades del aire promedio.

Rango de temperatura de trabajo	(-30 / 15) °C		
Densidad del aire	(d_a)	1,318	kg/m ³
Calor específico a presión cte	(C_p)	1,0057	kJ/(kg*K)
Calor específico a volumen cte	(C_v)	0,7184	kJ/(kg*K)
Conductividad térmica	(k)	0,0233	W/(m*K)
Viscosidad cinemática	(ν)	1,3034E-05	m ² /s
Número de Prandtl	(Pr)	0,7370	

Fuente: Y. Cengel [6]

5.1.1. Modelado del aire dentro del evaporador

Debido a que el compresor ya tiene un sistema de control para mantener la temperatura del evaporador constante variando el flujo de refrigerante solo se tomará en cuenta la transferencia de calor que dependerá únicamente de la temperatura de entrada del aire.

Se plantean las siguientes hipótesis:

- La temperatura de pared del evaporador es constante
- Solo hay transferencia de calor con el evaporador
- La variación de energía potencial dentro del volumen de control es depreciable.
- La pared del evaporador se considera altamente conductiva.
- Flujo másico en el volumen de control es constante

Como se estudió en el capítulo 2 en un volumen de control la variación de energía interna es igual a la diferencia entre la las energías de entrada y de salida por lo que se tiene lo siguiente.

$$\dot{m}_1 h_1 - \dot{m}_2 h_2 - Q_e = \frac{dU}{dt} \quad (16)$$

Según las hipótesis planteadas se tiene las siguientes igualdades

$$\begin{aligned} \dot{m}_1 &= \dot{m}_2 = \dot{m} \\ \dot{m} &= \rho f \\ T_r &= cte \end{aligned}$$

Por lo que se tiene la siguiente ecuación.

$$\rho C_p f(T_1 - T_2) - UA \left(\frac{T_1 + T_2}{2} - T_r \right) = m_e C_p \frac{dT_2}{dt} \quad (17)$$

Para disminuir los términos se considera las siguientes constantes.

$$\begin{aligned} K_1 &= \rho C_p \\ K_2 &= m_e C_p \end{aligned}$$

Reemplazando en la ecuación

$$K_1 f(T_1 - T_2) - UA \left(\frac{T_1 + T_2}{2} - T_r \right) = K_2 \frac{dT_2}{dt} \quad (18)$$

Para determinar m_e , la masa del aire dentro del volumen de control, se considera el volumen que ocupa el evaporador dentro del túnel multiplicado por un factor de espacio para no considerar el volumen del evaporador dentro del volumen de control. El volumen que ocupa el evaporador se planteó en el capítulo anterior utilizándolo para determinar la masa del aire se tiene:

$$\begin{aligned} m_e &= 0,6 \times V_e \times \rho \\ m_e &= 2,0113 \text{ Kg} \end{aligned}$$

La constante UA es el coeficiente de transferencia de calor hecha por el evaporador; sabiendo el calor aproximado que tiene que absorber y la temperatura promedio del aire se puede determinar el coeficiente de conducción total con la siguiente fórmula.

$$UA = \frac{\dot{Q}_{frig}}{T_{prom} - T_r}$$

Temperatura promedio del aire		249,15	K
Temperatura en el evaporador	(T_r)	243,1	K
Calor absorbido por el refrigerante		71,52	KW
Coeficiente de conducción total	(UA)	11,76	KW/K

Por lo que las constantes de la ecuación serian:

K1	1,3258
K2	1,4448

5.1.2. Modelado del aire en contacto con el producto

Las hipótesis que se plantean son:

- La variación de energía cinética y potencial dentro del volumen de control son depreciables.
- No existe trabajo en el fluido
- La transferencia de calor se da por convección
- Flujo másico en el volumen de control es constante

El planteamiento del modelo es igual que el modelo anterior pero el aire ahora gana energía por transferencia de calor debido al producto que se encuentra en la faja transportadora. Considerando la hipótesis planteada se tiene.

$$\begin{aligned}\dot{m}_2 &= \dot{m}_3 = \dot{m} \\ \dot{m} &= \rho f\end{aligned}$$

Modelo dinámico del aire en contacto con el producto.

$$\begin{aligned}\dot{m}_2 h_2 - \dot{m}_3 h_3 + hA\Delta T &= m_a C_p \frac{dT_3}{dt} \\ \rho C_p f (T_2 - T_3) + hA \left(\frac{T_{p1} + T_{p2}}{2} - \frac{T_2 + T_3}{2} \right) &= m_a C_p \frac{dT_3}{dt} \\ \rho C_p f (T_2 - T_3) + \frac{hA}{2} [(T_{p1} + T_{p2}) - (T_2 + T_3)] &= m_a C_p \frac{dT_3}{dt} \quad (19)\end{aligned}$$

Considerando las siguientes constantes

$$\begin{aligned}K_1 &= \rho C_p \\ K_3 &= m_a C_p\end{aligned}$$

Reemplazando las constantes en la ecuación

$$K_1 f (T_2 - T_3) + \frac{hA}{2} [(T_{p1} + T_{p2}) - (T_2 + T_3)] = K_3 \frac{dT_3}{dt} \quad (20)$$

La constante m_a será la misma que m_e debido a que la misma cantidad de aire enfriado en el evaporador ira hacia la faja donde se encuentra el producto. Siendo las constantes.

K1	1,3258
K3	1,4448

El coeficiente total de transferencia de calor por convección (hA) se determinará en la siguiente sección.

5.1.3. Modelado del producto en contacto con el aire

Se considera el producto refrigerado como un volumen de control planteando las siguientes hipótesis:

- El flujo másico de producto es constante
- El producto se considera homogéneo y temperatura uniforme
- El producto entra y sale del túnel con pérdidas de masa despreciables.

Considerando que:

$$\dot{m}_{p1} = \dot{m}_{p2} = M$$

Se hace el balance de energía de la misma forma que los modelos anteriores.

$$\dot{m}_{p1}h_{p1} - \dot{m}_{p2}h_{p2} - hA\Delta T = m_p C_r \frac{dT_3}{dt} \quad (21)$$

$$MC_{ref}(T_{p1} - T_{p2}) - hA \left(\frac{T_{p1} + T_{p2}}{2} - \frac{T_2 + T_3}{2} \right) = m_p C_{ref} \frac{dT_{p2}}{dt}$$

$$MC_{ref}(T_{p1} - T_{p2}) - \frac{hA}{2} [(T_{p1} + T_{p2}) - (T_2 + T_3)] = m_p C_{ref} \frac{dT_{p2}}{dt} \quad (22)$$

Considerando las siguientes constantes para reducir la ecuación.

$$K_p = MC_{ref}$$

$$K_r = m_p C_{ref}$$

Se tiene la siguiente ecuación

$$K_p(T_{p1} - T_{p2}) - \frac{hA}{2} [(T_{p1} + T_{p2}) - (T_2 + T_3)] = K_r \frac{dT_{p2}}{dt} \quad (23)$$

Para determinar m_p se considera el flujo másico del producto por el tiempo que dura dentro del túnel.

$$m_p = M * t = 1200 \frac{kg}{h} \times \frac{1 h}{3600 s} \times 486 s$$

$$m_p = 162 Kg$$

Siento las constantes

Kp	0,6643
Kr	322,866

Para determinar hA primero se determinara el área de contacto entre el producto y el aire.

Volumen del cubo de mango		15,63	cm ³
Longitud característica del cubo	(L _c)	2,50	cm
Área superficial del cubo		37,50	cm ²

Conociendo la cantidad de cubos dentro del túnel y multiplicándolo por un factor de aleatoriedad debido a que algunos cubos estarán pegados entre sí por lo que no habrá contacto con el aire se tiene lo siguiente

Volumen total de mango	(V _p)	0,21	m ³
Cantidad de cubos de mango		13500	cubos
Factor de aleatoriedad		0,70	
Área de contacto total	(A _{sp})	35,44	m ²

Para determinar el coeficiente de convección (h) se tendrá que determinar el número de Nusselt cuando el aire pase por una superficie cuadrada como lo indica en la *Figura 19*.

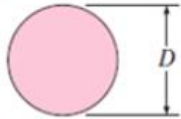

Sección transversal del cilindro	Fluido	Rango de Re	Número de Nusselt
Círculo 	Gas o líquido	0.4-4 4-40 40-4 000 4 000-40 000 40 000-400 000	$Nu = 0.989Re^{0.330} Pr^{1/3}$ $Nu = 0.911Re^{0.385} Pr^{1/3}$ $Nu = 0.683Re^{0.466} Pr^{1/3}$ $Nu = 0.193Re^{0.618} Pr^{1/3}$ $Nu = 0.027Re^{0.805} Pr^{1/3}$
Cuadrado 	Gas	5 000-100 000	$Nu = 0.102Re^{0.675} Pr^{1/3}$

Figura 19. Correlación empírica para el número de Nusselt.

Fuente: Y. Cengel [6].

Si se varía la velocidad el coeficiente de convección también variará como lo demuestra en la *Tabla 17*.

Tabla 17. Variación del coeficiente de transferencia de calor.

%V	V(m/s)	Re	Nu	h (W/(m ² *K))
1,0	5,23	1,0038E+04	46,29	43,15
0,9	4,71	9,0339E+03	43,12	40,19
0,8	4,19	8,0301E+03	39,82	37,12
0,7	3,66	7,0263E+03	36,39	33,92
0,6	3,14	6,0226E+03	32,79	30,57

Fuente: Elaboración propia

Se observa que la variación de h dependerá de la velocidad del aire ya que

$$Nu = \frac{hL}{k}$$

Por consiguiente, también se modelará la variación de h según el flujo aire que ingrese al producto.

5.1.4. Modelado del ventilador

Para determinar el flujo volumétrico de aire de los ventiladores se tiene la siguiente fórmula de turbomáquinas para un ventilador centrífugo.

$$f = n_v \pi B_v D_v V_n \quad (24)$$

Si se considera una relación proporcional con las revoluciones ya que se sabe cuánto es el valor de V_n y las revoluciones a las que va el ventilador cuando este alcanza el valor medido se tiene que

$$f = n_v \pi B_v D_v K_v N \quad (25)$$

Donde

$$K_v = \frac{V_n}{N} = \frac{15,83 \text{ m/s}}{1750 \text{ rpm}} = 0,009 \frac{\text{m}}{\text{s} * \text{rpm}}$$

Considerando una $n_v = 0,6$ y reduciendo la ecuación

$$f = R_v N$$

Se tiene que la constante R_v será $0,0038 \frac{\text{m}^3}{\text{s} * \text{rpm}}$

Según R. Dossat [7] la reducción de las revoluciones de un ventilador no debe pasar el 30% ya que se perdería su eficiencia volumétrica.

5.1.5. Modelamiento del sistema en Simulink

Conociendo las ecuaciones que representan el comportamiento de cada proceso se procede a graficar el diagrama de bloques para cada proceso y en su conjunto.

Para el evaporador se tuvo la siguiente ecuación.

$$K_1 f (T_1 - T_2) - UA \left(\frac{T_1 + T_2}{2} - T_r \right) = K_2 \frac{dT_2}{dt}$$

Que representa la variación entálpica del proceso menos la transferencia de calor debido al evaporador, esto será igual a la variación de energía interna dentro del volumen de control como se muestra en la siguiente ecuación.

$$\frac{dT_2}{dt} = \frac{1}{K_2} (dHe - TCe) \quad (26)$$

Donde en Simulink se representaría de la siguiente forma

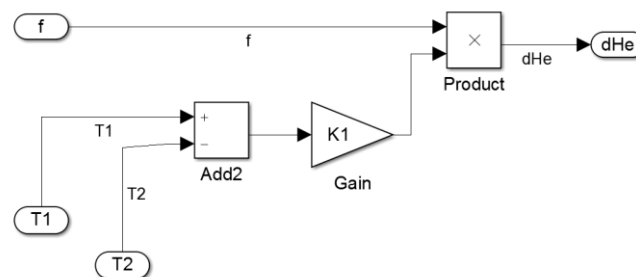


Figura 20. Diagrama de dHe .

Fuente: Elaboración propia en Simulink.

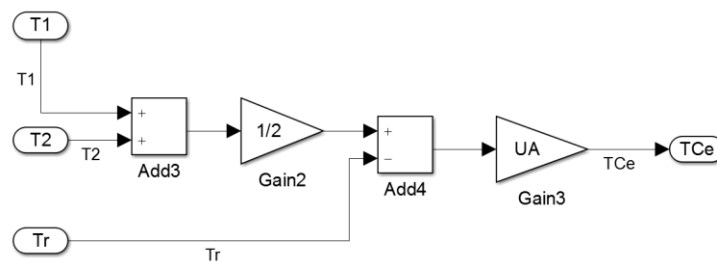


Figura 21. Diagrama de TCe .

Fuente: Elaboración propia en Simulink.

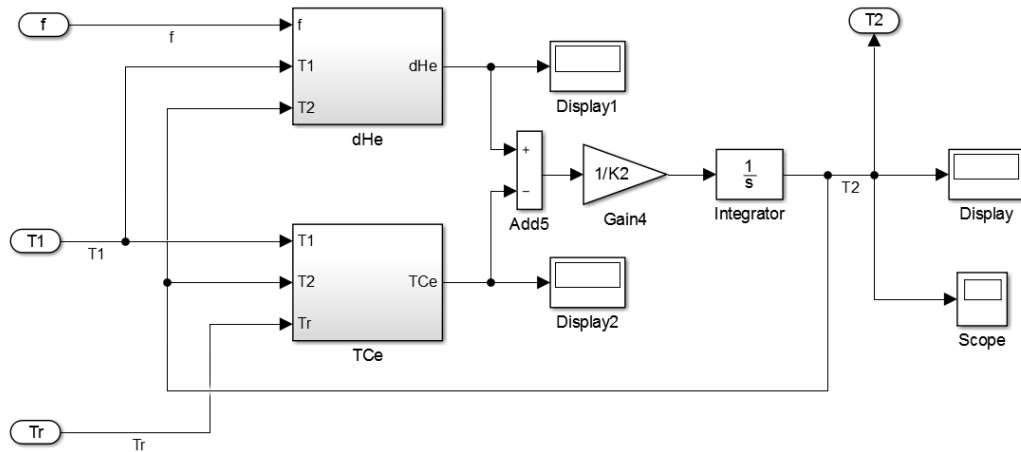


Figura 22. Diagrama del modelo del aire dentro del evaporador.

Fuente: Elaboración propia en Simulink.

Como se vio en la sección anterior el coeficiente de transferencia de calor dependerá la velocidad de aire por lo que se tiene lo siguiente.

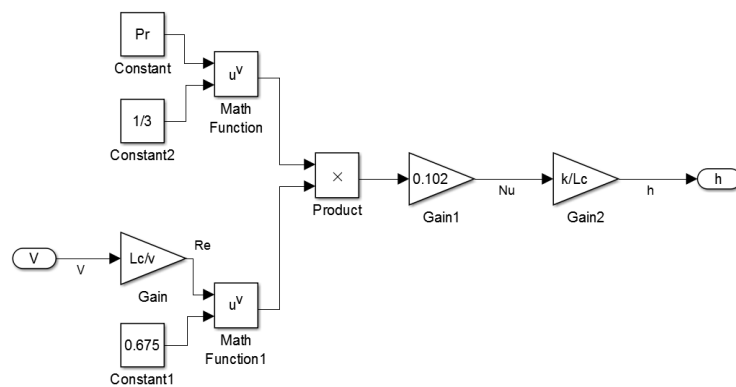


Figura 23. Diagrama del coeficiente de transferencia de calor.

Fuente: Elaboración propia en Simulink.

En la faja transportadora se tuvieron dos ecuaciones una para el aire y otra para el producto

$$K_1 f (T_2 - T_3) + \frac{hA}{2} [(T_{p1} + T_{p2}) - (T_2 + T_3)] = K_3 \frac{dT_3}{dt}$$

$$K_p (T_{p1} - T_{p2}) - \frac{hA}{2} [(T_{p1} + T_{p2}) - (T_2 + T_3)] = K_r \frac{dT_{p2}}{dt}$$

Estas ecuaciones también se pueden representar de la siguiente forma.

$$\frac{dT_3}{dt} = \frac{1}{K_3} (dH_a + TCF) \quad (27)$$

$$\frac{dT_{p2}}{dt} = \frac{1}{K_r} (dH_p - TCF) \quad (28)$$

Las dos ecuaciones están relacionadas entre sí en la transferencia de calor y esto influiría en el cambio de entalpía de cada sustancia. Por lo que se representa de la siguiente forma

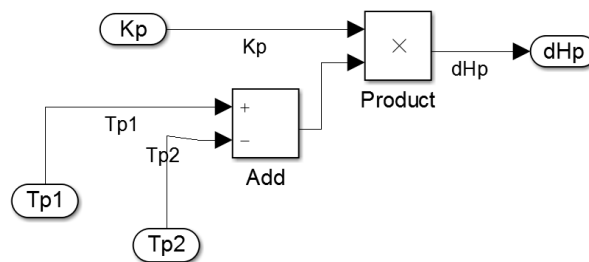


Figura 24. Diagrama de dH_p .

Fuente: Elaboración propia en Simulink.

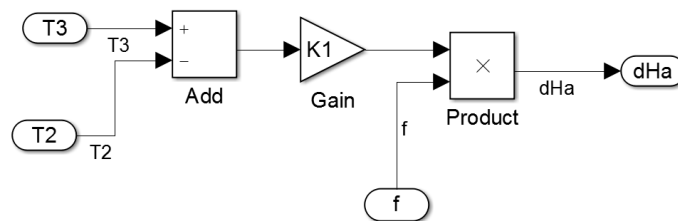


Figura 25. Diagrama de dH_a .

Fuente: Elaboración propia en Simulink.

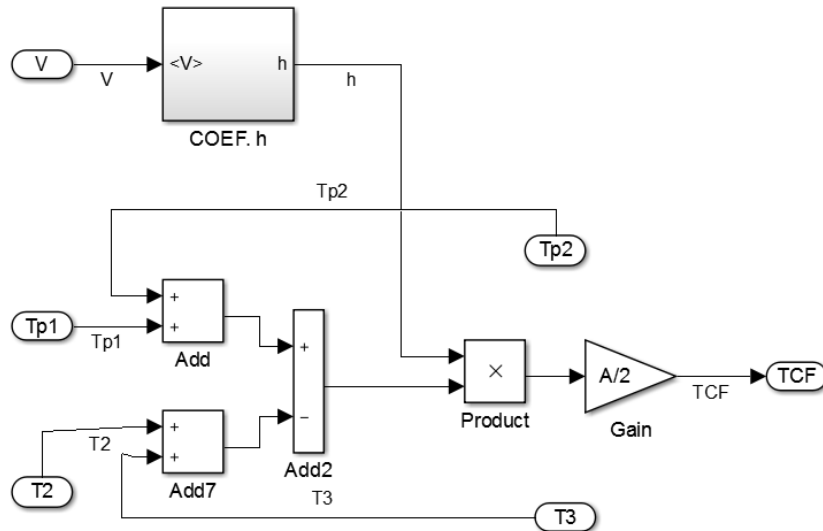


Figura 26. Diagrama de TCF.
Fuente: Elaboración propia en Simulink.

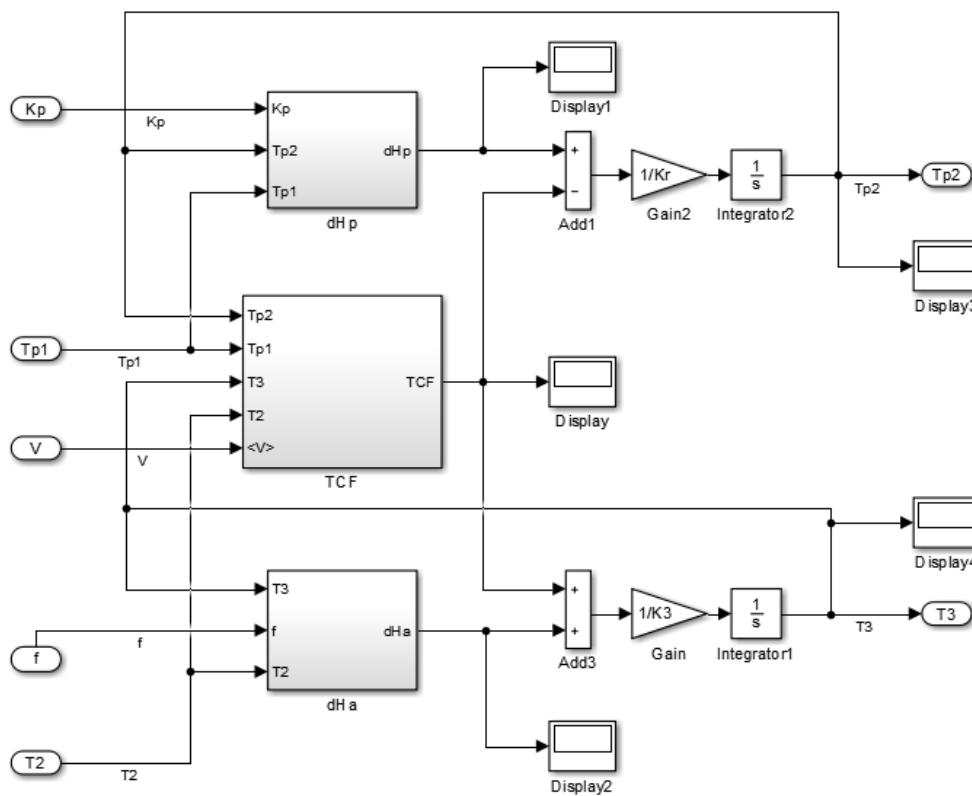


Figura 27. Diagrama del modelo del aire y producto en la faja transportadora.
Fuente: Elaboración propia en Simulink.

Como es un sistema de congelado continuo la variación de una de las entradas parte de un valor estacionario es por eso que a las entradas se le agrega un step para poder determinar en el tiempo que se desee el cambio.

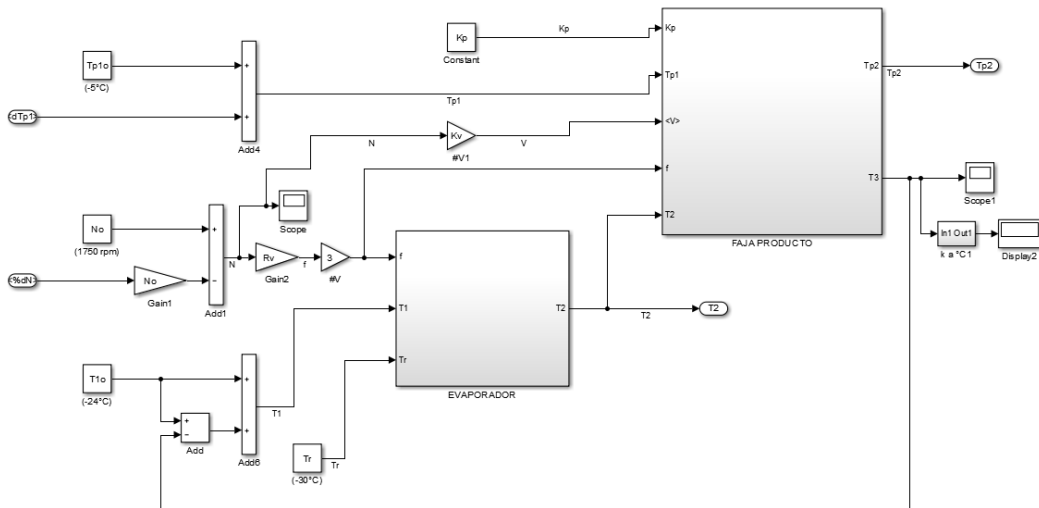


Figura 28. Diagrama del modelo del sistema de congelado IQF.

Fuente: Elaboración propia en Simulink.

5.2. Diseño de sistema de control PID adaptativo

En esta sección se diseñará un control PID adaptativo como se vio en el capítulo 2 para controlar la velocidad de giro de los ventiladores dentro del túnel IQF. Se tenían las siguientes ecuaciones

$$K_p = -\gamma\epsilon\gamma_1$$

$$K_i = -\gamma\epsilon\gamma_2$$

$$K_d = -\gamma\epsilon\gamma_3$$

El valor de γ determina la rapidez con la que el sistema alcanza el valor deseado o de consigna. Estas ecuaciones se representan en el siguiente diagrama hecho en simulink.

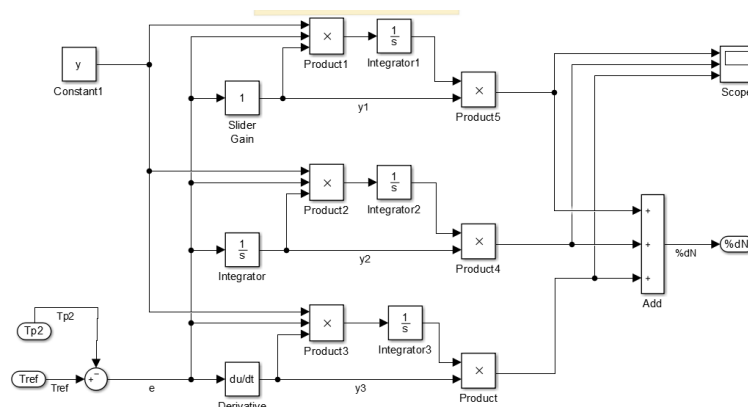


Figura 29. Diagrama del algoritmo del controlador PID.

Fuente: Elaboración propia en Simulink.

Como se observa en la *Figura 29* el proceso recibe la información de la temperatura de salida del producto (T_{p2}) y la diferencia con la temperatura de referencia (T_{ref}), este resultado llamado error (e) es llevado a los campos proporcional, integral y derivativo (y_1, y_2, y_3). Además, la constante de pandizaje (y) le da un valor base al algoritmo.

Estas tres variables se multiplican como se muestran en las ecuaciones 13, 14 y 15; obteniendo las 3 constantes que se necesita (K_p, K_i, K_d) luego de sumarlas se obtiene una ganancia a la entrada del sistema, que en este caso será las revoluciones de los ventiladores para corregir el error a la salida del sistema.

El valor negativo en las ecuaciones hace que si la temperatura de salida es menor a la de referencia reduzca la ganancia de las revoluciones, siendo el caso contrario, haria que aumentase la ganancia.

Uniendo todos los diagramas del sistema con el sistema de control se obtiene el siguiente diagrama.

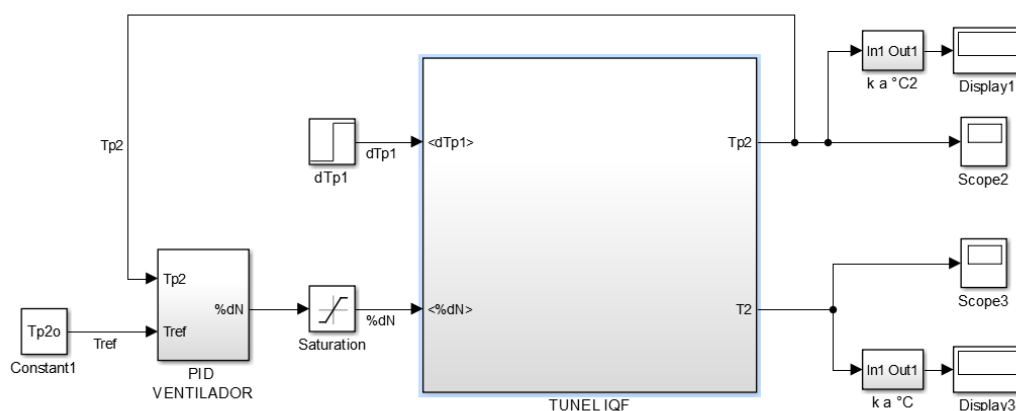


Figura 30. Diagrama del sistema de congelado con el controlador PID.

Fuente: Elaboración propia en Simulink.

En la *Figura 30* se observa que el controlador estará captando la señal de temperatura del producto a la salida del túnel IQF y según un setpoint que indique la temperatura deseada variará las revoluciones de los ventiladores.

5.3. Selección de los dispositivos

Habiendo diseñado la programación para el controlador PID se procede a seleccionar los equipos que se necesitarán para su implementación. En la *Figura 31* se muestra el diagrama P&ID señalando la instrumentación del sistema de control cumpliendo la norma ISA. (*Para más detalle Plano 3*)

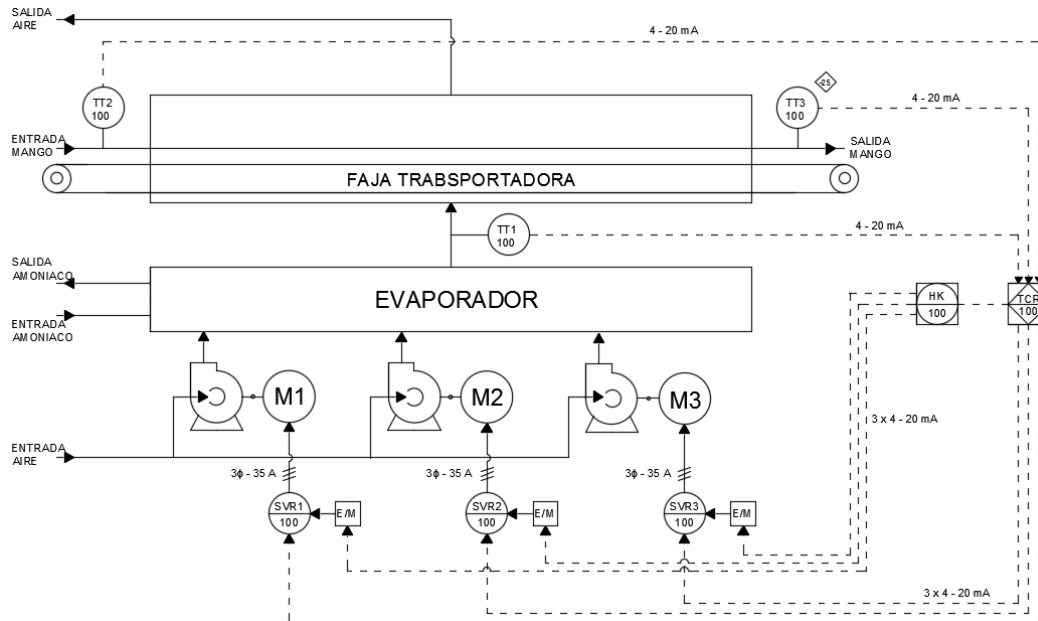


Figura 31. Diagrama P&ID del sistema de control de temperatura.

Fuente: Elaboración propia.

Como se ha explicado en los capítulos anteriores los motores (M1, M2 y M3) serán regulados con su respectivo variador de frecuencia (SVR) el cual se activan por un contactor (E/M) desde un panel de control (HK) y un PLC (TCR). Este controlador captará las señales enviadas por los sensores de temperatura (TT).

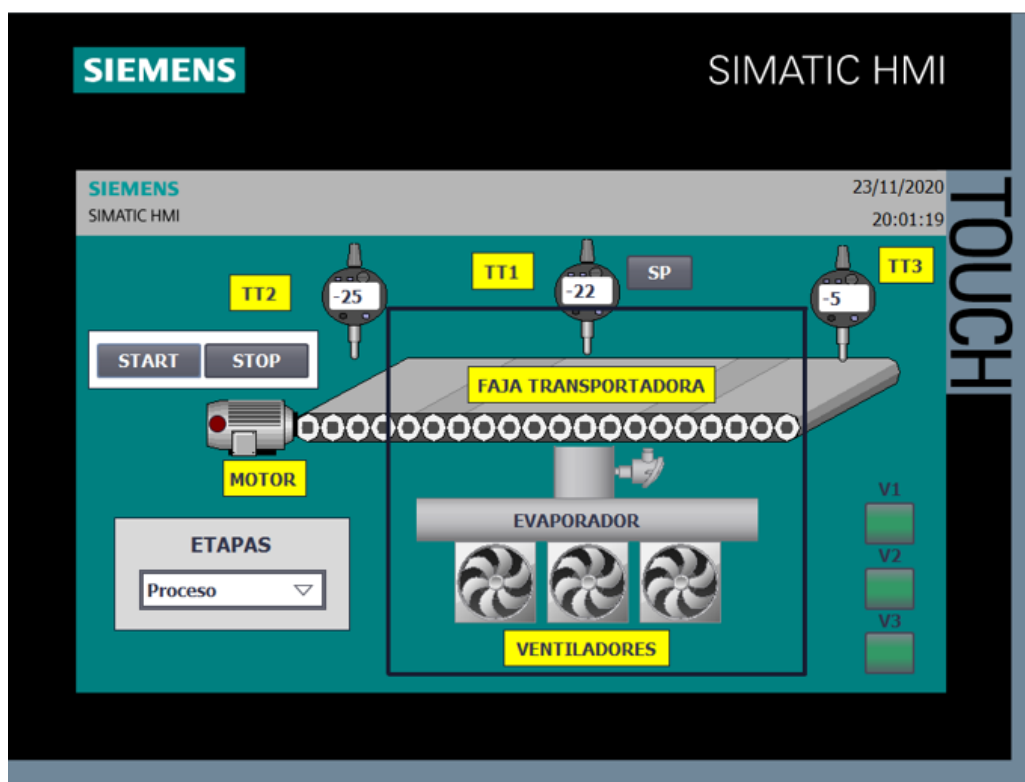
El sensor TT1 será de tipo RTD ya que este estará en contacto con el aire dentro del túnel. Por otro lado los sensores TT2 y TT3 serán de infrarrojo debido a que no pueden estar en contacto con el producto, ubicándose a la entrada y a la salida del túnel.

El diseño del circuito de fuerza y del circuito de control (*Plano 4*) fueron diseñados según el requerimiento del sistema.

En el sistema de control se consideró que:

- ✓ Alimentación a 380 VAC
- ✓ Contar con 3 salidas analógicas (AO) de 0 a 10 VDC para los variadores de frecuencia.
- ✓ Contar con 3 entradas analógicas (Q0) de 0 a 10 VDC para los sensores de temperatura.
- ✓ Contar con 5 salidas digitales (D0) para activar la puesta en marcha de los variadores de frecuencia.

Además, se diseñó una interfaz HMI en TiaPortal de cual el PLC tendrá una comunicación con la computadora del operador encargado donde se podrá visualizar las temperaturas y las acciones de mando. La programación se encuentra en el *Anexo 9*.



*Figura 32. Diseño panel HMI para control.
Fuente: Elaboración propia.*

Se usará el gabinete de control antiguo que ya esta acoplado a la pared del túnel IQF donde los equipos que se añadirán son los siguientes:

- **Variador de frecuencia**

El variador de frecuencia se escogió para los motores de 11 kW con una alimentación de 380 V siendo un Altivar 320.



Figura 33. Variador de frecuencia Altivar320.

Fuente: <https://es.wiautomation.com/schneider-electric/variadores-motores-proteccion-de-circuitos/ATV320D11N4B>

- **PLC**

Para el control del sistema se escogió un Siemens Simatic S7 1200 CPU 1214C con 14 entradas/salidas, 2 entradas analogicas y ampliable hasta con 2 módulos y puerto PROFINET.



Figura 34. PLC Siemens Simatic S7 1200 CPU 1214C.

Fuente: https://www.plc-city.com/shop/es/siemens-simatic-s7-1200-cpu-1214c/sie-6es7214-1bg40-0xb0-nss.html?SubmitCurrency=1&id_currency=1

- **Modulo de entrada analogica**

Para los sensores de temperatura se necesitará un modulo de entradas analógicas para el PLC.



Figura 35. PLC Modulo S7 1200 Analog Input 4AI.

Fuente: https://www.plc-city.com/shop/es/siemens-simatic-s7-1200-analog-input-modules/6es7231-4hd32-0xb0.html?SubmitCurrency=1&id_currency=1

- **Modulo de salida analogica**

Para el control de los variadores se necesitará un modulo de salidas analógicas para el PLC.



Figura 36. PLC Modulo S7 1200 Analog Output 4AO.

Fuente: https://www.plc-city.com/shop/es/siemens-simatic-s7-1200-analog-output-modules/6es7232-4hd32-0xb0.html?SubmitCurrency=1&id_currency=1

- **Sensor de temperatura RTD**

El sensor de temperatura de tipo RTD que se usará será un PT100 ya que es el indicado para medición en procesos industriales teniendo un rango amplio de temperaturas (-200 °C a 850 °C).



Figura 37. Sensor de temperatura RTD PT100.

Fuente: <http://www.cnheatingelement.com/temperature-sensor>.

- **Sensor de temperatura por infrarrojo**

Se seleccionó un PyroCouple ya que miden la temperatura de objetos en movimiento con un rango de temperaturas de -30 °C a 250 °C con un tiempo de respuesta de 240 ms.



Figura 38. Sensor de temperatura infrarrojo PyroCouple.

Fuente: https://srsl.com/SensoresTemp/Sensores_Infrarrojos/PyroCouple

- **Pantalla HMI**

Para visualizar el control del PLC se usará una pantalla HMI que esta conectada al PLC para el control de usuario.



Figura 39. Simatic HMI KTP400 Basic Panel.

Fuente: <https://es.wiautomation.com/siemens/hmi-pc-industriales/simatic-hmi/6AV2123-2DB03-0AX0>

CAPÍTULO VI

SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Habiendo modelado el sistema de congelado y diseñado el sistema de control PID adaptativo se analizará el comportamiento del sistema dinámico planteado en el capítulo anterior bajo la simulación de ciertos casos de estudio.

En la *Figura 40* se observa como la temperatura del producto, en este caso cubos de mango, disminuye en los 486 segundos que se encuentra dentro del túnel a condiciones estables como se plantearon anteriormente; llegando a una temperatura de 248 K (-25 °C) por lo que esta es la temperatura de salida a la que debe mantenerse.

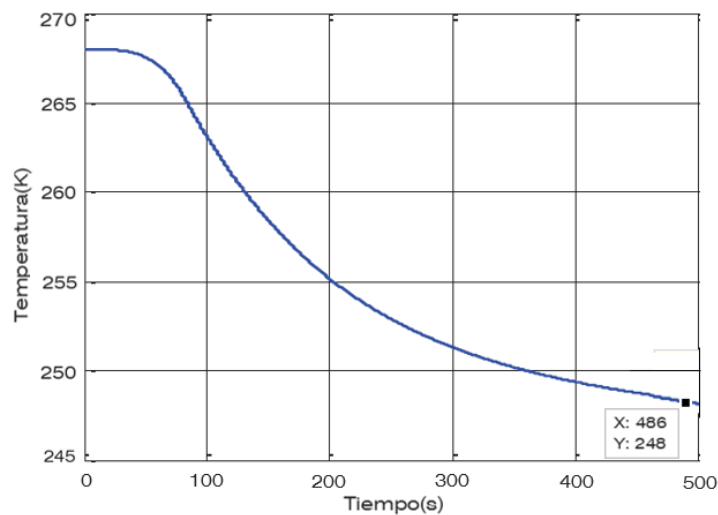


Figura 40. Variación de temperatura del mango dentro del túnel IQF
Fuente: Elaboración propia.

Así mismo en la *Figura 41* vemos la variación de la temperatura del túnel IQF, sabiendo que su condición de inicio es de 243 K (-30 °C) al entrar el mango empieza a subir su temperatura hasta los 248 K (-25 °C) que sería la condición de equilibrio dentro del sistema al cabo de 3208 s (53 min).

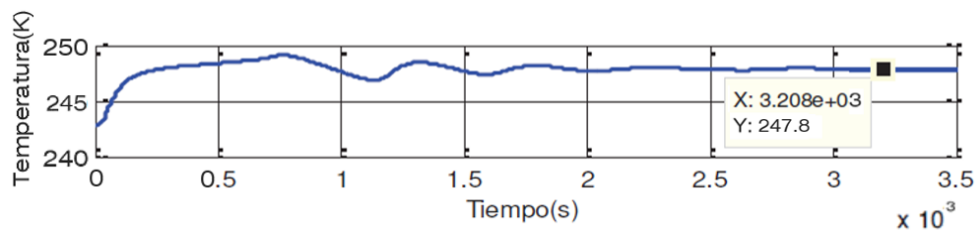


Figura 41. Temperatura (T_2) dentro del túnel IQF
Fuente: Elaboración propia.

Además en la *Figura 42* vemos como las revoluciones del ventilador disminuyen hasta 1490 rpm donde, al inicio, para llevar la carga a su valor deseado está al 100%; una vez el sistema empiece a equilibrarse las revoluciones bajan hasta un 85% como máximo.

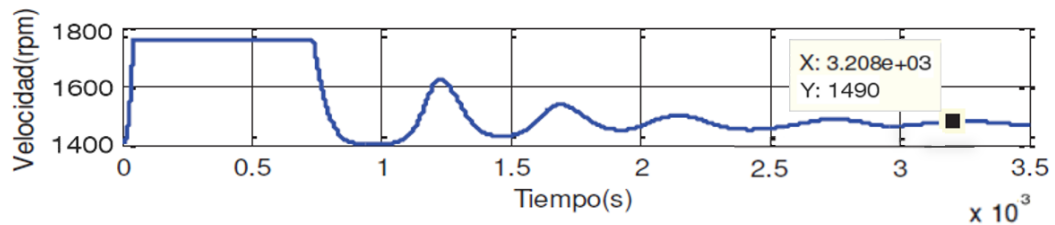


Figura 42. *Revoluciones del ventilador.*

Fuente: *Elaboración propia.*

A continuación se estudiará el comportamiento del sistema diseñado al variar las condiciones de entrada del producto en diferentes instantes de tiempo. Los tiempos de simulación serán grandes debido a como se explica en el *Capítulo 4* el producto viene de un proceso donde se lo lleva a una temperatura de 268 K (-5 °C) con 2 túneles estáticos por lo que entraría una gran cantidad de producto con la misma temperatura. Estos estudios determinarán la robustez del controlador.

6.1. Caso de estudio N° 1

Para este primer caso el tiempo de simulación es de 8000 segundos donde en el segundo 3600 se aumentará en 3 °C la temperatura inicial, por lo tanto, la temperatura de entrada del producto será de 271 K (-2 °C) y se mantendrá constante hasta el final de la simulación. Por lo que se tiene los siguientes resultados.

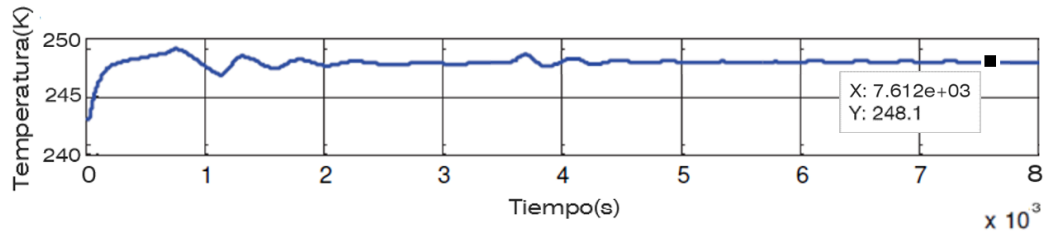


Figura 43. Temperatura (T_2) dentro del túnel IQF – Caso 1.

Fuente: Elaboración propia en MatLab.

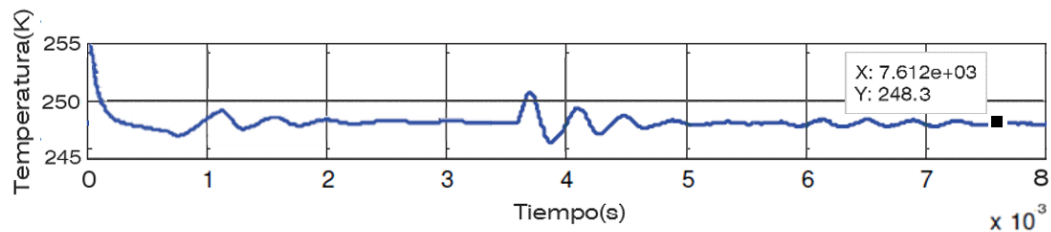


Figura 44. Temperatura (T_{p2}) la salida del túnel – Caso 1.

Fuente: Elaboración propia en MatLab.

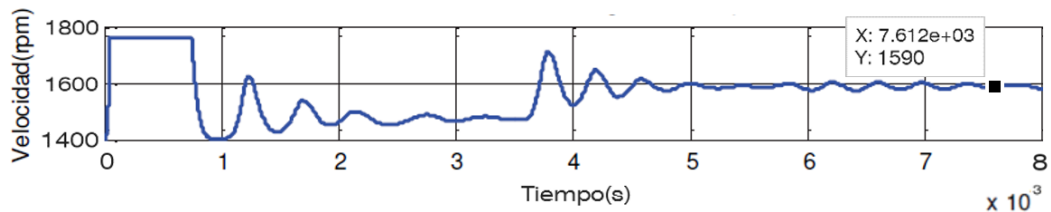


Figura 45. Revoluciones del ventilador – Caso 1.

Fuente: Elaboración propia en MatLab.

En la *Figura 43* se observa como al aumentar la temperatura de entrada del producto afecta a su temperatura de salida, pero debido al controlador PID que se ha diseñado, este después de algunas oscilaciones vuelve a su estado estable al aumentar las revoluciones del ventilador como se observa en la *Figura 45*.

Se observa también que cuando hay un aumento en la temperatura del producto a la entrada, el controlador hace elevar las revoluciones para que entre más flujo de aire y este pueda absorber el calor necesario hasta llevar al producto a su temperatura deseada, para ello las revoluciones aumentan a 1600 rpm siendo un 91% del máximo.

La temperatura del mago a la salida presenta unos picos u oscilaciones que forman parte del proceso de aprendizaje del controlador. Además, como el controlador PID es adaptativo este también variara cuando las condiciones de entrada del sistema varíen, teniendo los siguientes gráficos.

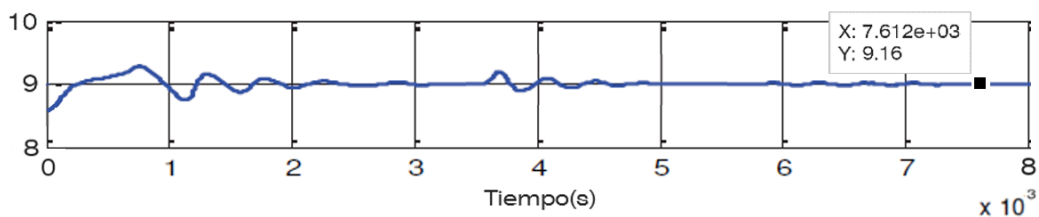


Figura 46. Parámetro K_p del PID – Caso 1
Fuente: Elaboración propia en MatLab.

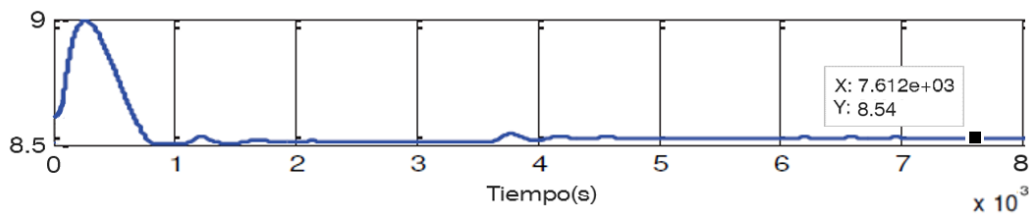


Figura 47. Parámetro K_i del PID – Caso 1
Fuente: Elaboración propia en MatLab.

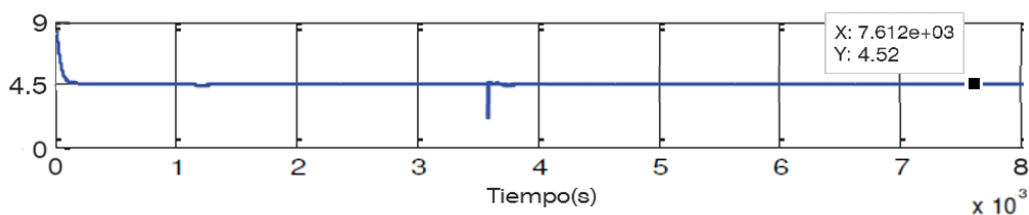


Figura 48. Parámetro K_d del PID – Caso 1.
Fuente: Elaboración propia en MatLab.

Como se sabe en el capítulo anterior se diseñó el algoritmo de control donde se colocó un parámetro de aprendizaje, este es el valor que se debe de colocar como valor inicial para los parámetros del PID.

Después de realizar unas cuantas pruebas el valor ideal para este parámetro dentro de este sistema es de 8,6; a partir de este valor los parámetros del PID irán variando hasta que el sistema entre en equilibrio.

En las *Figuras 46* se observa como el parámetro de K_p inicia aumentando debido a que el sistema debe vencer la inercia para llevar a las temperaturas del mango y del túnel hacia el equilibrio, una vez logra su objetivo se mantiene en 9,6 su valor.

En la *Figura 47* se observa como el parámetro K_i aumenta debido a que no tiene una información suficiente anterior para la integración, una vez tiene la información necesaria disminuye hasta un valor de 8,54.

En la *Figura 48* se observa como el parámetro K_d disminuye considerablemente debido a que el K_p y K_i hacen su trabajo, pero cuando hay el cambio de ingreso de temperatura este también varia reaccionando en su valor, pero como ese error también es corregido por los otros parámetros este vuelve a su valor constante de 4,52.

6.2. Caso de estudio N° 2

Para este segundo caso el tiempo de simulación será de 15 000 segundos debido a que se añadirán 3 variaciones al caso anterior. Las variaciones adicionales se harán en 7000 s, 9000 s, 12000 s disminuyendo en 2 °C a cada variación consecutivamente.

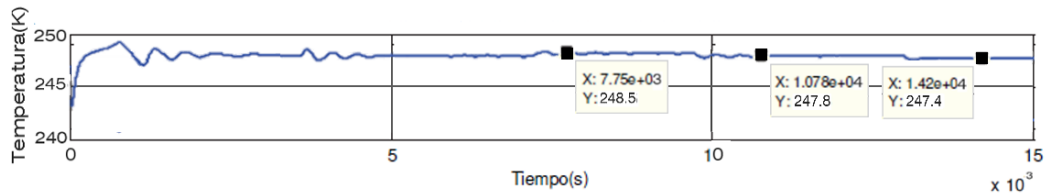


Figura 49. Temperatura (T_2) dentro del túnel IQF – Caso 2.

Fuente: Elaboración propia en MatLab.

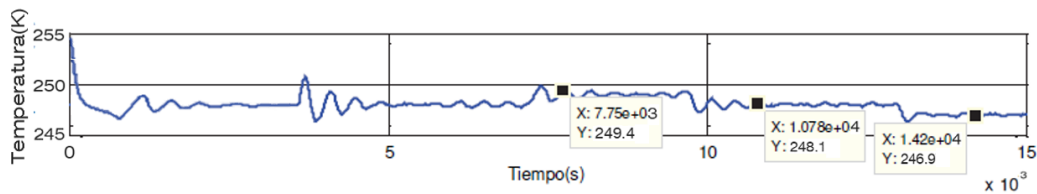


Figura 50. Temperatura (T_{p2}) la salida del túnel – Caso 2.

Fuente: Elaboración propia en MatLab.

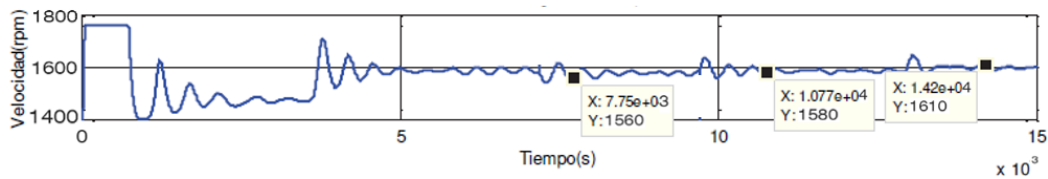


Figura 51. Revoluciones del ventilador – Caso 2.

Fuente: Elaboración propia en MatLab.

Al igual que el caso anterior se observa en la *Figura 49* que la temperatura del aire dentro del túnel IQF no varía significativamente teniendo 248,5 K (-24,7 °C); 247,8 K (-25,4°C) y 247,2 K (-26°C) en los marcadores seleccionados respectivamente por lo que hay una variación promedio de 0,7 K.

Se observa en la *Figura 50* como la temperatura de salida del producto trata de estabilizarse y cuando la temperatura de entrada al ser más baja que la de referencia la temperatura a la salida será igual de baja haciendo que el producto ahora necesite calor para llegar a su temperatura deseada pero esto es imposible para el modelo planteado. Si se tiene una temperatura de entrada de -6 °C, la salida será de 247,2 K (-26 °C).

En la *Figura 51* las revoluciones del ventilador también se ve afectado cuando la temperatura de entrada del producto es menor a la deseada pero este trata de mantener las revoluciones para ahora darle energía al producto pero esta energía que le da es muy pequeña. Las revoluciones se mantienen en 1600 rpm, siendo esto el 91% de las revoluciones máximas.

De igual forma como el caso anterior los parámetros del PID variarán, teniendo los siguientes gráficos.

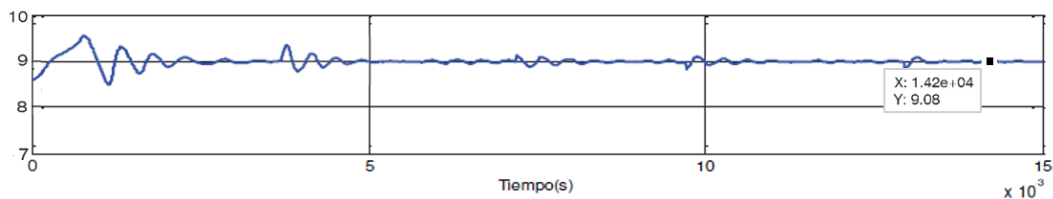


Figura 52. Parámetro K_p del PID – Caso 2.

Fuente: Elaboración propia en MatLab.

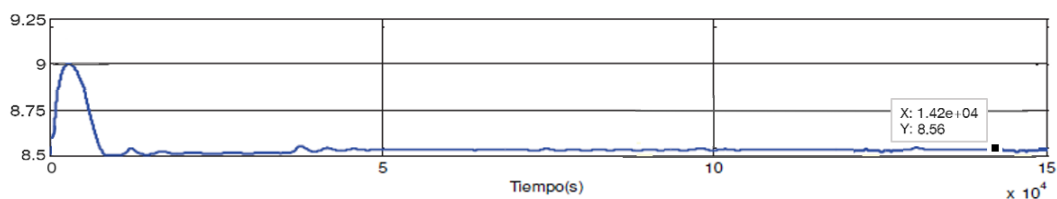


Figura 53. Parámetro K_i del PID – Caso 2.

Fuente: Elaboración propia en MatLab.

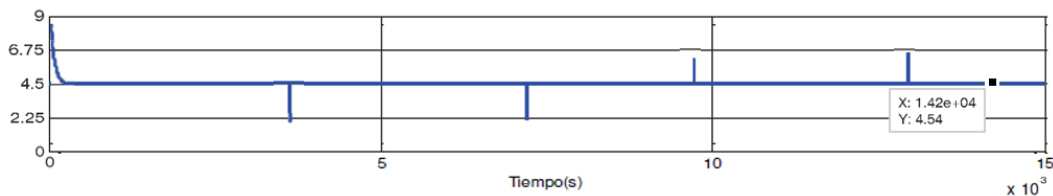


Figura 54. Parámetro K_d del PID – Caso 2.

Fuente: Elaboración propia en MatLab.

Teniendo el mismo parámetro de aprendizaje vemos como realizando estas variaciones los parámetros del PID no varían demasiado, siendo las variaciones más pronunciadas al encendido del controlador.

En la *Figura 52* vemos como el parámetro K_p tiene variaciones más pequeñas mientras más pequeña es la variación de entrada del producto respecto a su valor inicial de $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$; llegando a mantenerse en 9,08.

En la *Figura 53* vemos como el parámetro K_i igualmente tiene variaciones muy pequeñas, llegando a 8,56.

En la *Figura 54* vemos como el parámetro Kd disminuye si la temperatura de entrada es mayor a la inicial de $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, a la vez que aumenta si esta temperatura de entrada es menor; siendo de 4,54.

6.3. Reducción de consumo eléctrico

Como se observó en los resultados las revoluciones del motor se puede reducir hasta un 10% como mínimo para mantener las condiciones deseadas de temperatura. Conociendo que la producción de mango se da en las épocas de Diciembre hasta fines de Marzo. Los demás meses del año se procesa producto que se congelan más rápido por tener menos Brix por lo que las revoluciones del motor se pueden estimar en una reducción de un 15%. Además, sabiendo la tarifa de consumo eléctrico se tiene la *Tabla 18* donde se determina la energía ahorrada con el controlador PID y por ende el ahorro económico.

Tabla 18. Ahorro energético y económico anual.

	<i>Mango</i>	<i>Otros</i>	
Tiempo de operación	16	25	sem/año
Tiempo de operación diario	20	20	h/día
Tiempo de operación total	1 920	3 000	h/año
Potencia de los motores	33,57	33,57	kW
Porcentaje de ahorro de motores	10	15	%
Potencia ahorrada	3,357	5,0355	kW
Energía ahorrada anual	6 445,44	15 106.5	kWh
Tarifa por consumo energético	0,1	0,1	Soles/kWh
Energía consumida anual del túnel IQF	963 295	963 295	kWh/año
Porcentaje de ahorro energético	0,67	1,57	%
Ahorro económico	644,54	1 510,65	Soles/año

Por lo que se puede ver en la *Tabla 18* si se utilizara este sistema de control solo en los meses de producción de mango el consumo de energía eléctrica se reduciría en un 0,67 % teniendo un ahorro económico de 644,54 Soles/año.

Por otro lado, este sistema también se podrá utilizar cuando se procesen los demás productos haciendo que este ahorro energético aumente a un 2,24 % teniendo un ahorro económico de 2 155,19 Soles/año.

6.4. Análisis económico

Como se presentó en el *Capítulo 5* para el sistema de control se tendrá que adquirir equipo adicional al sistema de control manual que ya se tiene con lo cual requiere de la siguiente inversión.

Tabla 19. Presupuesto de los equipos adicionales a implementar.

Item	Descripción	Costo (S/.)
TT1	Sensor de temperatura PT100	554,55
TT2	Sensor de temp. Infrarrojo PyroCouple	870,25
TT3	Sensor de temp. Infrarrojo PyroCouple	870,25
SVR1	Variador de frecuencia Altivar 320	4 693,19
SVR2	Variador de frecuencia Altivar 320	4 693,19
SVR3	Variador de frecuencia Altivar 320	4 693,19
TCR	PLC Siemens Simatic S7 1200	1 732,25
MAI	Modulo PLC 4 AI	1 028,07
MAO	Modulo PLC 4 AO	1 733,54
HMI	Pantalla HMI Basic Panel	1 546,94
AD	Accesorios auxiliares	2 000,00
CE	Costo de envio	2 000,00
	Total	26 415,42

Se consideró el costo de los accesorios adicionales a los conductores y ferretería que se necesite. Además, no se toma en cuenta el costo de operación debido a que existen técnicos fijos que pueden realizar la instalación en la empresa. Siendo una inversión de S/. 26 500, si se es conservador.

Para el análisis económico se debe de realizar el flujo de caja donde se observa los ingresos y egresos que tendrá este proyecto.

▪ Ingresos

Uno de los ingresos es el ahorro económico por ahorro de energía que se tuvo en la sección anterior. Además, debido a que el sistema trabajará a mejores condiciones el tiempo de operación podrá aumentar hasta unos 30 minutos por día aproximadamente debido a:

- ✓ Disminución del tiempo de descongelamiento
- ✓ Disminución del tiempo de apagado y encendido del sistema de refrigeración.

Por lo que habrá ingresos por producción adicional, obteniendo la siguiente tabla.

Tabla 20. Ganancia por producción adicional.

	<i>Mango</i>	<i>Otros</i>	
Ganancia del producto por kg	0,10	0,08	Soles/kg
Producción por hora	1 200	1 200	kg/h
Ganancia del producto por hora	120	96	Soles/h
Tiempo de producción adicional	0,50	0,50	h
Ganacia anual adicional por producción	4 800	6 000	Soles/año
Ganacia anual adicional por producción total	10 800	Soles/año	

Obteniendo una ganancia adicional de 10 800 Soles/año. Teniendo unos ingresos totales anuales de 12 955,19 Soles/año.

▪ Egresos

Los egresos a considerar son el costo de mantenimiento anual (10 % inversión total) y una depreciación anual si los activos tienen una vida útil de 10 años considerando que se podrá recuperar un 30% de la inversión al final de su ciclo.

Tabla 21. Egresos anuales por mantenimiento y depreciación.

Costo de inversión	26 500	Soles
Costo de mantenimiento anual	2 650	Soles/año
Vida util de los activos	10	años
Valor de rescate del activo	7 950	Soles
Depreciación lineal anual	1 855	Soles/año

Al aumentar la producción también genera un costo de la energía consumida por los demás equipos que forman parte del sistema.

Tabla 22. Egresos anuales por producción adicional.

	<i>Mango</i>	<i>Otros</i>	
Potencia de los demas equipos	151,00	151,00	kW
Energia consumida por operación adicional	105,71	104,03	kWh
Energia consumida adicional al año	10 148,45	15 605,18	kWh/año
Costo de la energia adicional	1 014,84	1 560,52	Soles/año

Por lo que habrá un costo de la energía adicional total de 2 575,36 Soles/año; obteniendo unos egresos totales de 7 080,36 Soles/año.

Se realiza un flujo de caja para observar cómo serán los ingresos y egresos en los 10 años de duración de los activos.

Tabla 23. Flujo de caja neto.

Año	Ingresos	Egresos	Flujo neto	F. N. Acum.
0			-26 415,42	-26 415,42
1	12 955,19	7 080,36	5 874,83	-20 540,59
2	12 955,19	7 080,36	5 874,83	-14 665,76
3	12 955,19	7 080,36	5 874,83	-8 790,92
4	12 955,19	7 080,36	5 874,83	-2 916,09
5	12 955,19	7 080,36	5 874,83	2 958,74
6	12 955,19	7 080,36	5 874,83	8 833,57
7	12 955,19	7 080,36	5 874,83	14 708,40
8	12 955,19	7 080,36	5 874,83	20 583,23
9	12 955,19	7 080,36	5 874,83	26 458,07
10	12 955,19	7 080,36	5 874,83	32 332,90

Para calcular la viabilidad del proyecto se hallaron los parámetros económicos de Valor Actual Neto (VAN) utilizando el costo de oportunidad de capital (COK) de 8,39% de inversión en el banco según la SBS [16]. El COK se usa como aquel coste ficticio que no se realizará para priorizar la inversión en el proyecto.

Además se halló la Tasa Interna de Retorno (TIR) para tener una comparación con el COK y saber si el proyecto es viable.

Tabla 24. VAN y TIR del proyecto.

VAN	12 321,04	Soles
TIR	18	%

Se obtuvo un VAN positivo y TIR mayor al costo de oportunidad de capital; por lo que la implementación de este sistema de control es viable y la recuperación de la inversión será en 4 años.

CONCLUSIONES

- Se determinó la situación actual del sistema de congelado del túnel continuo IQF en la empresa Procesadora Perú S.A.C. la cual cuenta con un sistema de refrigeración por compresión de vapor, donde todos los equipos involucrados consumen un 31% de la energía total de la empresa. Este sistema tiene tres ventiladores de 11 kW cada uno que trabajan a su máxima potencia y se encargan de movilizar el aire que absorberá el calor del producto. El producto entra a $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ con ligeras variaciones y se requirió que salga a una temperatura constante de $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Se modeló matemáticamente el proceso de congelado en el túnel continuo IQF dividiendo el sistema en dos procesos bien marcados; uno, la disminución de energía del aire en el evaporador y otro, donde el aire absorbía el calor del producto. Se elaboró los diagramas de bloques para su simulación en la herramienta Simulink de MatLab ya que el comportamiento dinámico del sistema es no lineal.
- Se diseñó el sistema de control de temperatura de cubos de mango utilizando un controlador PID adaptativo el cual mediante un algoritmo modifica los parámetros K_p , K_i y K_d según el sistema lo requiera. Además, se simularon casos de estudio donde se variaba la temperatura de entrada del producto haciendo que el controlador variase las revoluciones del ventilador llegando a una revolución estable de 1600 rpm.
- Se determinó la reducción del consumo eléctrico al utilizar el controlador PID diseñado, el cual según los casos de estudio las revoluciones del ventilador podrían bajar hasta un 10% como mínimo haciendo que se tenga un ahorro económico de S/. 2 155,19 al año. Además, se realizó el estudio económico con una inversión de S/. 26 500 obteniendo un VAN de S/. 12 321 y un TIR de 18% haciendo que la implementación de este sistema de control PID sea viable.

RECOMENDACIONES

- El modelado del sistema puede ser más preciso si se considera algunas condiciones que fueron despreciadas para simplificar el mismo obteniendo así resultados más detallados
- El sistema de control sería más completo si también se tomara en cuenta el compresor del sistema de refrigeración ya que este determina las condiciones de temperatura del aire dentro del túnel.
- Se debe analizar como actuaría el sistema de control diseñado con los demás productos para determinar de forma más precisa cuanto sería el ahorro del consumo eléctrico anual.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] F. Ordoñez, «Consideraciones para el mantenimiento preventivo de túneles de congelado en espiral usando amoníaco como refrigerante,» Tesis de Fin de Grado, USAC, Guatemala, 2013.
- [2] W. Guzmán, «Diseño de planta piloto de refrigeración industrial y de estrategia de control,» Tesis de Fin de Grado, UDEP, Piura, 2018.
- [3] J. Alonso, «Modelado y control multivariable de un sistema de refrigeración por compresión de vapor,» Tesis de Fin de Máster, US, Sevilla, 2014.
- [4] S. Venegas, «Diseño e implementación de un control en cascada para la optimización del consumo de energía eléctrica de compresores de pistón para amoníaco en proceso de refrigeración de envasado de bebidas gasificadas,» Tesis de Fin de Grado, UCSM, Arequipa, 2017.
- [5] A. Chancusig y H. Darío, «Diseño e implementación de un sistema automático para reducir el tiempo de enfriamiento en la línea de producción del chocolate en la micro-empresa de los Hermanos Monje ubicados en el cantón Pujili en el periodo 2014-2015,» Tesis de Fin de Grado, UTC, Latacunga, Ecuador, 2015.
- [6] Y. Cengel y M. Boles, Termodinámica, México: McGraw-Hill, 2015.
- [7] R. J. Dossat, Principios de Refrigeración, México: CECSA, 1991.
- [8] J. Holman, Transferencia de Calor, Madrid: McGraw-Hill, 1999.
- [9] W. Stoecker, Industrial Refrigeration Handbook, New York: McGraw-Hill, 1998.
- [10] G. E. Ramos, «Diseño de un congelador continuo individual IQF con una capacidad de 200 Kg/hr de Espárragos,» Tesis de Fin de Grado, PUCP, Lima, 2013.
- [11] K. Ogata, Ingeniería de Control Moderna, Madrid: Pearson, 2010.
- [12] R. Hernández, Introducción a los Sistemas de Control: Conceptos, aplicaciones y simulación con Matlab, México: Pearson, 2010.
- [13] A. Aramburú, «Diseño y simulación de control avanzado para un sistema de refrigeración aplicado a la industria agroalimentaria,» Univ. de Piura, Piura, 2017.
- [14] MathWorks, «Simulink: Simulación y diseño basado en modelos,» [En línea]. Available: <https://la.mathworks.com/products/simulink.html>. [Último acceso: 2019].
- [15] Lloyd's Register Quality Assurance, «BRC/IOP Global Food Packaging,» LRQA España, [En línea]. Available: <http://www.lrqa.es/certificaciones/brc-packaging-norma-seguridad-alimentaria/>. [Último acceso: Mayo 2019].
- [16] B. Pichincha, «Super Intendencia de Banca, Seguros y AFP,» 2022. [En línea]. Available: <https://www.sbs.gob.pe/app/pp/EstadisticasSAEEPPortal/Paginas/TIActivaTipoCreditoEmpresa.aspx?tip=B>.
- [17] C. Orrego, Procesamiento de alimentos, Colombia: UNAL, 2003.
- [18] M. Hadzich, Termodinámica: Problemas y Aplicaciones en Ingeniería, Lima: PUCP, 2006.
- [19] IDAE, «Soluciones con Aislamiento de Poliuretano,» Guía Técnica, Madrid, 2007.
- [20] Carbone-Stainless Steel, «Propiedades del Acero Inoxidable serie 300,» Ficha Técnica, Boston, 2019.

[21] E. Torrela, «Compresores de Tornillo,» 2019.

[22] IES Estelas de Cantabria, «Psicrometría del aire,» España, 2019.

ANEXOS

Anexo 1. Calor específico de los productos.

Alimento	% agua	Calor específico (KJ/Kg°C)	
		Debajo punto	Encima punto de congelación (0-100°)
Atún	70	1.720	3.180
Pescado frito ²	60		3.012
Pescado fresco ²	80		3.598
Pescado seco, salado ²	16 a 20		1.715 a 1.841
Tocino fresco ²	57		2.010
Carne de cerdo grasa ²	39		2.594
Carne de cerdo magra ²	57		3.054
Carne de res, grasa	51	1.470	2.887
Carne de res, magra ²	72		3.431
Salchicha frankfurt	60	2.35	3.73
Pollo fresco	74	1.55	3.31
Aguacate	94	2.05	3.81
Ciruela ²	77		3.52
Limón	89.3	1.93	3.85
Manzana	84	1.85	3.6
Mango	93	1.993	3.77
Naranja	87.2	1.93	3.77
Pera	83.5	1.99	3.60
Plátano	74.8	1.76	3.35
Alcachofa ²	90		3.891
Apio	93.7	2.01	3.98
Cebolla ²	80 a 90		3.598 a 3.891
Cebolla seca ²	3.3		1.966
Hongos frescos ²	90		3.933
Hongos secos	30		2.343
Lechuga ²	94.0	2.01	4.02
Papa	75		3.515
Papa cocida ²	80		3.640
Papa seca ²	6.1		1.715
Repollo	92.4	1.97	3.94
Repollo seco ²	5.4		2.176
Tomate	94	2.01	3.98
Zanahoria	88.2	1.9	3.7

Fuente: C. Orrego, 2003 [17, p. 63]

Anexo 2. Hoja de datos de seguridad del Amoniac.

1. Producto Químico e Identificación de la Compañía					
Nombre del Producto: Amoniac, anhidro			Nombre Comercial: Amoniac		
Nombre Químico: Amoniac			Sinónimos: Amoniac Gas, Esencia de Carbonato Amoniac		
Fórmula: NH ₃			Familia Química: Aminas		
Teléfono: 0-800-444-7729 (PRAX)			Nombre de la Compañía: Praxair Argentina S.R.L. Saavedra 2953 El Talar - Pacheco C.P. B1618ACF Buenos Aires - Argentina		
* Llame a los números de emergencia las 24 horas del día sólo en caso de derrames, fugas, fuego, exposición o accidentes que involucren este producto. Para obtener información de rutina, comuníquese con su proveedor, representante de ventas de Praxair, o llame al 0-800-444-PRAX (0-800-444-7729).					
2. Composición/Información de los Ingredientes					
Para obtener información acerca de mezclas personalizadas de este producto, solicite una Hoja de Datos de Seguridad de Producto (MSDS) de cada componente. Consulte la Sección 16 para obtener información importante acerca de las mezclas.					
INGREDIENTE	NÚMERO CAS	CONCENTRACIÓN	PEL DE OSHA	TLV-TWA DE ACGIH (1999)	NÚMERO DE LA ONU
Amoniac	7664-41-7	>99%*	50 ppm	25 ppm (35 ppm, 15 min, TLV STEL)	UN 1005
* El simbolo > significa "mayor que"; el simbolo < significa "menor que".					
3. Identificación de Riesgos					
 GENERALIDADES SOBRE EMERGENCIAS  <p>¡PELIGRO! Líquido y gas corrosivo bajo presión. Dañino si se inhala. Ocasiona quemaduras en los ojos, piel y tracto respiratorio. Puede causar daños renales y al sistema respiratorio. Puede ignitr.</p> <p>Los rescatistas podrían tener que utilizar dispositivos de respiración autónomos y ropa protectora Olor: Picante, Irritante</p> <p>Por políticas de Seguridad internas PRAXAIR ARGENTINA S.R.L. prohíbe el trasvase productos entre cilindros de gases permanentes.</p>					
CLASIFICACIÓN NFPA 3 PELIGRO GRAVE, CORROSIVO O TOXICO. EVITE INHALACIÓN O CONTACTO 1 DEBE SER PRECALENTADO PARA QUEMARSE 0 NO REACCIONA					
					
VALOR LÍMITE UMBRAL: TLV-TWA, 25 ppm; 35 ppm, 15 min STEL (ACGIH 1999). El TLV-TWAs debe utilizarse a manera de guía para el control de riesgos para la salud y no como líneas definitorias entre concentraciones seguras y peligrosas.					

Fuente: PRAXAIR, 2009.

Anexo 3. Recibo del consumo eléctrico Enero-2019.

Recibo N° 251-37581654
Chiclayo/Chiclayo

Recibo por Consumo del 01/01/2019 al 31/01/2019

Cliente	PROCESADORA PERU S.A.C.		
R.U.C.	20117751954		
Dirección	Pq PARQUE INDUSTRIAL 0049 Urb. LA PRADERA - Chiclayo, Chiclayo -		
Referencia	Pq PARQUE INDUSTRIAL 0049 Urb. LA PRADERA		
Ruta	1300-10078-145		
Tarifa	MT1	Serie Medidor	00000007646482 - Electrón.
Medición	Medía Tension	N° Hilos Medidor	3
Tensión y SED	10 kV / E-202263	Modalidad	Potencia Variable
Sist. Eléctrico	S201 Chiclayo (ST2)	Inicio Contrato	31/01/2018
Tipo Suministro	Trifásica-Aérea(C5.4)	Termino Contrato	20/06/2018

Enero-2019

CÓDIGO 25904724

Promedio Máxima Demanda		Potencia Contratada	
Fuera Punta	Punta	Fuera Punta	Punta
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Calificación		No Aplica	Horas Punta 0

Magnitud Leída	Lectura Anterior	Lectura Actual	Diferencia	Demanda	Concepto	Consumo	Precio Unitario	Total
Energía Activa Total (kWh)	0.0000	0.0000	0.0000	360.469.0500	Generación-Potencia en Hp	630.7300	22.4200	14140.93
Energía Activa Hora Punta (kWh)	0.0000	0.0000	0.0000	66.227.8400	Gener-Energía Activa Fp	292241.2100	0.1000	29224.12
Energía Activa Fuera Punta (kWh)	0.0000	0.0000	0.0000	292.241.2100	Gener-Energía Activa Hp	68227.8400	0.1000	6822.78
Energía Reactiva (kVarh)	0.0000	0.0000	0.0000	245.524.1200	Cargo mensual de Comercialización	721.3400	1.5600	1125.30
Potencia Hora Punta (kW)	0.0000	0.0000	0.0000	716.9200	Energía Reactiva Inductiva	137383.4000	0.0420	5770.10
Potencia Fuera Punta (kW)	0.0000	0.0000	0.0000	721.3400	Peaje de Conexión Sistema Principal	630.7300	35.6600	22504.39
Factor Calificación : No Aplica Fac.Medic. 363.6364					Cargo Fijo		0.0000	50.59
					Cargo por Reposición y Mantenimiento de la Conexión			16.05
					Pot.Usos Redes Distrib.HP	712.0000	11.5300	8209.32
					Exc.Pot.Usos Redes Dist.FP	13.1600	11.7600	154.80
					Peaje Transmisión Secundaria	360469.0500	0.0215	7750.08
					Alumbrado Público (Alicuota : S/ 0.3923)			1569.20
					Interés Compensatorio	0.0000	0.0000	400.85
					SUB TOTAL			97738.51
					Imp. Gral. a las Ventas			17592.93
					FISE - Ley 29852	360469.0500	1.0089	3636.77
					Interés Moratorio	0.0000	0.0000	21.60
					Aporte Ley Nro. 26749	360469.0500	0.0084	3027.94
					TOTAL RECIBO DE ENERO-2019			122017.75
					Deuda Anterior (1 Mes.)			30000.00

Importe 2 Últimos Meses Facturados
Nov - 2018 S/ 67143.85 Dic - 2018 S/ 61054.18

HISTORICO DE CONSUMOS Y DEMANDAS													
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene
EAFF kWh	274140	265152	241801	167216	143801	206371	205274	203566	238505	231333	139526	153316	202941
EAHP kWh	65496	61341	53616	42898	59561	52042	42263	59929	47115	43761	26769	33944	66226
PFP kW	737.7700	643.6500	528.6500	563.1900	576.5300	687.7900	696.2600	716.9400	726.1600	726.1600	711.4600	676.1300	721.3400
PHP kW	721.3300	697.5600	629.4300	560.6700	564.1100	670.1500	696.6700	707.0700	692.2600	692.0000	675.6300	663.1800	716.6200

Emisión	05/02/2019	Vencimiento	22/02/2019		TOTAL	S/****152,017.75
---------	------------	-------------	------------	--	--------------	-------------------------

Su AMT es : A2005 - C-216 de SE de Potencia : SECHO 10 KV

Son : CIENTO CINCUENTA Y DOS MIL DIECISIETE Y 75/100 SOLES
(*) El importe en letras hace referencia al total del recibo del mes de Enero-2019 Comprobante emitido según RS-007-99 SUNAT Cap. I. Art. 4, Inciso 6.1.d.

Si realiza el pago vía transferencia bancaria debe enviar un correo a: pagosensa@distriuz.com.pe Revise el estado de cuenta de su recibo en:
<http://www.distriuz.com.pe/ConsultaRecibos/ConsultaRecibo.aspx?empresa=2>



Fecha Corte:23/02/2019


Si paga hasta la fecha de vencimiento evitará el corte, gastos y molestias innecesarias.

Facturación Enero-2019
PROCESADORA PERU S.A.C.
Suministro 25904724
Dirección Pq PARQUE INDUSTRIAL 0049 Urb.
Ruta 1300-10078-145


Recibo N° 251-37581654
Chiclayo/Chiclayo
TOTAL A PAGAR S/ **152,017.75**

Anexo 4. Motor Lincoln del ventilador centrífugo del túnel IQF.



15HP LINCOLN 1750RPM 254T TEFC 3PH MOTOR LM24208					
Volts	230	Volts	460	Volts	190-208/380-415
F.L. Amps	37.5	F.L. Amps	18.8	F.L. Amps	46-44/23-22
S. F Amps	46	S. F Amps	23	S. F Amps	51.5-49/25.7-24.6
RPM	1800	Hertz	60/50		
HP	15	Duty	CONTINUOUS	TYPE	TFS
KW	11.19				
Frame	254T	Serv. Factor	1.25	Phase	3
Max Amb	40	Design	B	Code	G
Insul Class	F	Protection	NOT	Therm.Prot.	
Eff 100%	92.4	Eff 75%		PF	81
UL	V-INS. CONST UL REC	CSA	Yes	Bearing OPE	210
CC Number	CC004A	CE	Yes	Bearing PE	309
Load Type		Inverter Type	NONE	Speed Range	NONE
Motor Wt.	380 LB	Enclosure	TEFC	Lubrication	STANDARD
Nameplate		Mounting	RIGID	Rotation	REV



Fuente: PPSAC, 2019.

Anexo 5. Luminaria del túnel IQF

	Marca	Philips Herméticos
	Material	Policarbonato
	Medidas	120 x 15 x 6 cm
	Potencia	2 x 36 W
	Voltaje	220 V
	Frecuencia	50 - 60 Hz
	Color	Blanco
	Uso	Ideal para exteriores o ambientes húmedos
	Luminosidad	865 lm

Fuente: PPSAC, 2019.

Anexo 6. Especificaciones del compresor de tornillo.

Sabroe SAB 163 HM MK2

Compressors


Specifications

No.	2400
Brand	Sabroe
Type	SAB 163 HM MK2
Refrigerant	NH 3 (ammonia)
kW at -10°C/+40°C	438,7
kW at -20°C/+40°C	292,6
kW at -30°C/+40°C	183,8
kW at -40°C/+40°C	105,8
Electromotor kW	110 kW

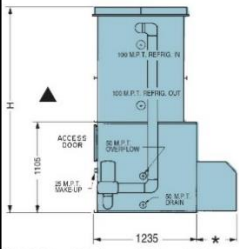



Fuente: PPSAC, 2019.

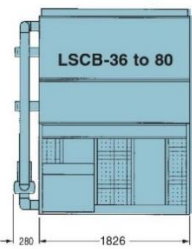
Anexo 7. Especificaciones del Condensador Evaporativo.



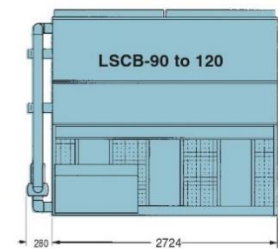
Engineering Dimensions & Data Centrifugal Fan Models LSCB 36 to 385



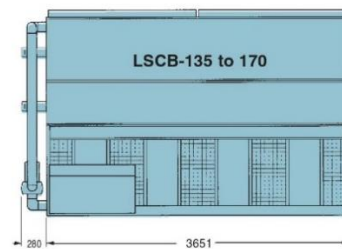
1108
ACCESS DOOR
1235
280



1826
280

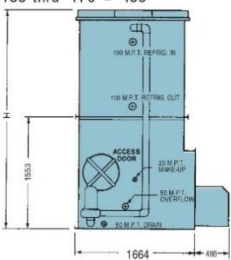


2724
280

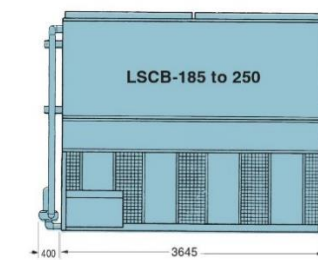


3651
280

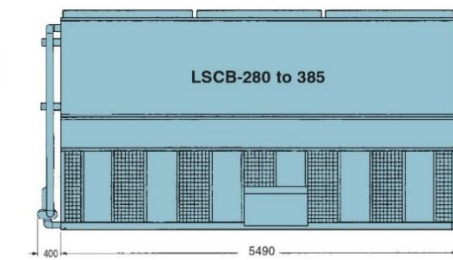
* LSCB- 36 thru 120 = 384
LSCB- 135 thru 170 = 486



1553
ACCESS DOOR
1664
400



3645
400



5490
400

▲ NOTE: Coil connection(s) and other unit dimensions may vary to match application requirements and/or shipping regulations. Consult the EVAPCO plant or certified drawings for detailed information.

TABLE 6 Engineering Data

UNIT NO.	FANS		WEIGHTS (KG)			R-717 Operating Charge	SPRAY PUMP		REMOTE SUMP		HEIGHT (mm)	
	kW	m ³ /s	Shipping	Operating	Heaviest Section †		kW	l/s	Liters Req'd**	Conn. Size		
LSCB-36	41	2.2	1005	1440	1005*	17	0.55	7.6	303	100	2048	
	48	4.0	1035	1465	1035*	17	0.55	7.6	303	100	2048	
	54	2.2	4.7	1230	1610	1230*	26	0.55	7.6	303	100	2238
	65	4.0	5.6	1265	1645	1265*	26	0.55	7.6	303	100	2238
	70	5.5	5.5	1405	1795	925	35	0.55	7.6	303	100	2429
	75	4.0	6.1	1445	1835	925	35	0.55	7.6	303	100	2429
	80	4.0	5.4	1550	1950	1100	44	0.55	7.6	303	100	2619
	80	5.5	6.0	1620	2020	1100	44	0.55	7.6	303	100	2619
LSCB-90	100	4.0	1985	2585	1360	52	0.75	11.4	454	150	2429	
	110	5.5	2050	2650	1360	52	0.75	11.4	454	150	2429	
	120	7.5	9.1	2110	2710	1360	52	0.75	11.4	454	150	2429
	120	7.5	8.9	2290	2900	1630	65	0.75	11.4	454	150	2619
LSCB-135	150	7.5	11.2	2595	3440	1795	70	1.1	15.5	643	150	2429
	155	11.0	12.6	2650	3495	1795	70	1.1	15.5	643	150	2429
	170	7.5	11.0	2950	3815	2155	87	1.1	15.5	643	150	2619
	170	11.0	12.3	3015	3885	2155	87	1.1	15.5	643	150	2619
LSCB-185	200	7.5	15.5	3590	4645	2480	100	1.5	21.8	871	200	2979
	210	11.0	16.8	3655	4715	2480	100	1.5	21.8	871	200	2979
	225	15.0	17.7	3715	4770	2480	100	1.5	21.8	871	200	2979
	240	11.0	16.4	4115	5205	2985	125	1.5	21.8	871	200	3194
	250	15.0	17.6	4175	5260	2985	125	1.5	21.8	871	200	3194
	250	15.0	17.4	4630	5745	3495	150	1.5	21.8	871	200	3410
LSCB-280	300	11.0	22.3	5475	6865	3780	150	2.2	32.5	1287	200	2979
	315	15.0	24.5	5535	6920	3780	150	2.2	32.5	1287	200	2979
	335	18.5	26.2	5625	7015	3780	150	2.2	32.5	1287	200	2979
	355	15.0	23.8	6245	7665	4530	186	2.2	32.5	1287	200	3194
	370	18.5	25.6	6335	7755	4530	186	2.2	32.5	1287	200	3194
	385	22.0	27.2	6405	7825	4530	186	2.2	32.5	1287	200	3194
	385	22.0	26.7	7070	8530	5290	225	2.2	32.5	1287	200	3410

* Unit ships in one piece.
 ** Liters shown is water in suspension in unit and piping. Allow for additional water in bottom of remote sump to cover pump suction and strainer during operation. (300 mm would normally be sufficient.)
 † Heaviest section is the coil section.
 Refrigerant charge is shown for R-717. Multiply by 1.93 for R-22 and 1.98 for R-134a.
 Dimensions are subject to change. Do not use for pre-fabrication.

Fuente: PPSAC, 2019.

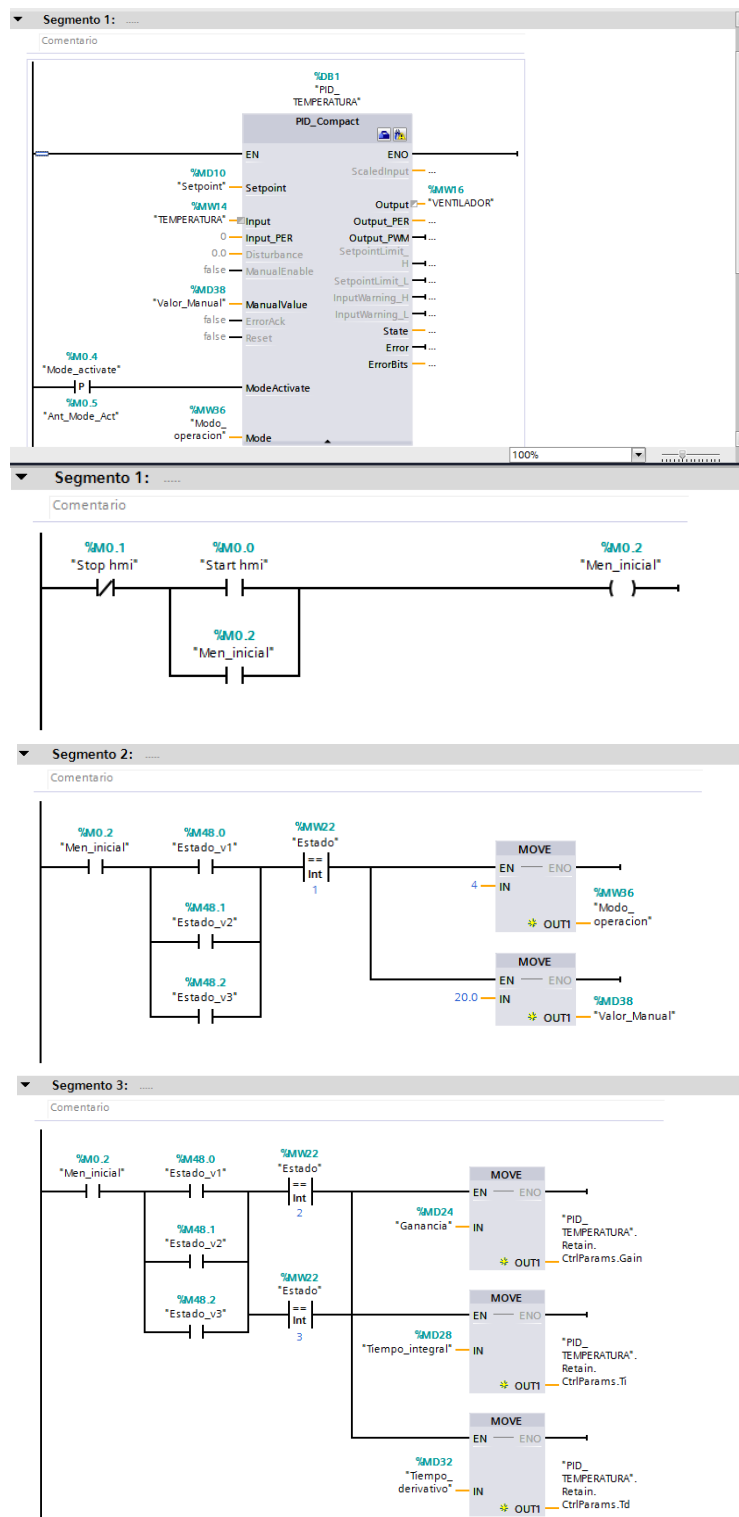
Anexo 8. Parte de control de las condiciones del compresor.

PROCESADORA PERU S.A.C.		PARTE CONTROL DE COMPRESOR TORNILLO SABROE									Código: GOP-R-MN-00-002 Versión: 01			
FECHA: 10 - 03 - 19		TURNO: A/B/C												
MODELO COMPRESOR: SAB - 163 HM														
Hora	Presiones del sistema					Temperaturas del sistema					Consumo Electrico	Valvula desluzante	Relacion de volumen	Observaciones
	Refrigerante			Aceite		Refrigerante			Aceite					
	Succion	Descarga	Economizador	Ingreso	Diferencial	Succion	Descarga	Economizador	Ingreso	Carter				
	(SP)	(DP)	(EP)	(OP)	(OF)	(ST)	(DT)	(ET)	(OT)	(OS)				
In Hg	Psig	Psig	Psig	Psid	° F	° F	° C	° F	° F	Amp.	%	(Vi)		
07:00	15	205	45	190	20	60	200	21	150	170	193	100	4	(DEFROST)
08:00	6.5	199.1	30	164.5	22.4	28.4	159.3	25	122.0	158.3	171.3	100	3.5	
09:00	1.6	189.3	39	159.3	22.7	32.6	174.5	22	116.4	177.5	168.6	100	3.2	
10:00	4.8	195.0	47	161.7	22.1	24.9	158.3	24	117.5	161.1	168.4	100	3.8	
11:00	1.0	196.5	28	166.5	22.4	27.0	159.6	23	120.4	156.0	178.0	98	4.2	
12:00	1.4	198.3	25	166.8	23.3	29.1	157.7	24	120.4	155.0	163.2	100	4.0	
13:00	0.7	199.9	30	169.7	23.5	27.5	162.9	28	122.4	159.4	176.7	95	4.5	
14:00	3.7	195.2	40	161.4	23.2	24.0	159.9	28	118.8	154.0	173.1	100	3.4	
15:00	2.6	201.1	28	168.8	24.2	24.4	161.0	24	122.4	159.3	157.4	100	3.9	
16:00	5.4	198.1	35	163.3	21.4	20.5	161.6	30	120.4	157.0	164.8	100	3.8	
17:00	4.7	197.6	35	163.6	18.3	19.9	161.9	32	120.7	157.3	150.6	100	3.7	
18:00	1.8	191.7	30	161.7	21.4	23.3	160.3	28	119.4	155.7	167.3	100	3.8	
19:00	0.5	191.1	28	161.7	27.6	26.7	153.4	25	120.1	156.9	145.8	100	3.5	
20:00	6.3	190.1	28	155.3	23.7	30.8	156.7	24	116.0	151.1	159.3	100	3.7	
21:00	0.6	181.3	26	157.2	21.6	26.3	156.7	25	114.5	151.1	162.1	80	3.5	
22:00	0.5	181.5	26	157.8	27.9	27.1	150.1	25	113.5	146.1	138.9	60	3.5	
23:00	7.0	187.1	28	158.6	27.9	28.7	148.0	24	114.8	147.2	131.5	87	4.5	
24:00	3.4	183.8	35	157.9	20.7	26.5	153.7	24	111.8	143.8	160.1	100	3.5	
01:00	1.9	178.2	34	150.9	22.5	31.5	138.0	26	111.2	141.8	157.4	100	3.6	
02:00	4.4	184.5	26	152.4	23.7	23.4	150.7	22	113.5	140.1	150.9	100	3.9	
03:00	3.3	193.5	31	167.6	27.6	20.3	160.0	24	119.1	156.2	167.6	100	3.7	
04:00	0.2	189.0	28	160.6	22.5	26.3	155.4	23	117.1	152.2	161.8	100	3.3	
05:00	1.4	188.9	27	159.7	19.8	22.5	155.7	26	116.7	152.7	160.9	100	3.8	
06:00	1.0	172.5	30	144.4	22.3	13.9	155.6	24	115.6	156.0	150.3	100	3.6	

Elaborado Por: CESAR/LUIS/JOSE V° B° de Mantenimiento: [Signature]

Fuente: PPSAC, 2019.

Anexo 9. Programación en TiaPortal.



Fuente: Elaboración propia.

Anexo 10. Programación de la simulación en Matlab.

```

clc
clear all
close all
%% Diseño de sistema de control de temperatura

%Constantes del modelo
K1=1.3258;
K2=1.4448;
K3=1.4448;
UA=11.76;
A=37.5;
Kp=0.6643;
Kr=322.87;
Lc=0.25
k=0.55
Rv=0.0038;

%Parámetros en equilibrio

Tp1o=268;
Tp2o=248;
T1o=247;
No=1750;

%% Proceso de simulación

%% Caso 1

tsim=8000;           %Tiempo de simulación
t1=3600;             %Tiempo donde Tp1 varia
dTp1=3;              %Variación de Tp1

%% Caso 2

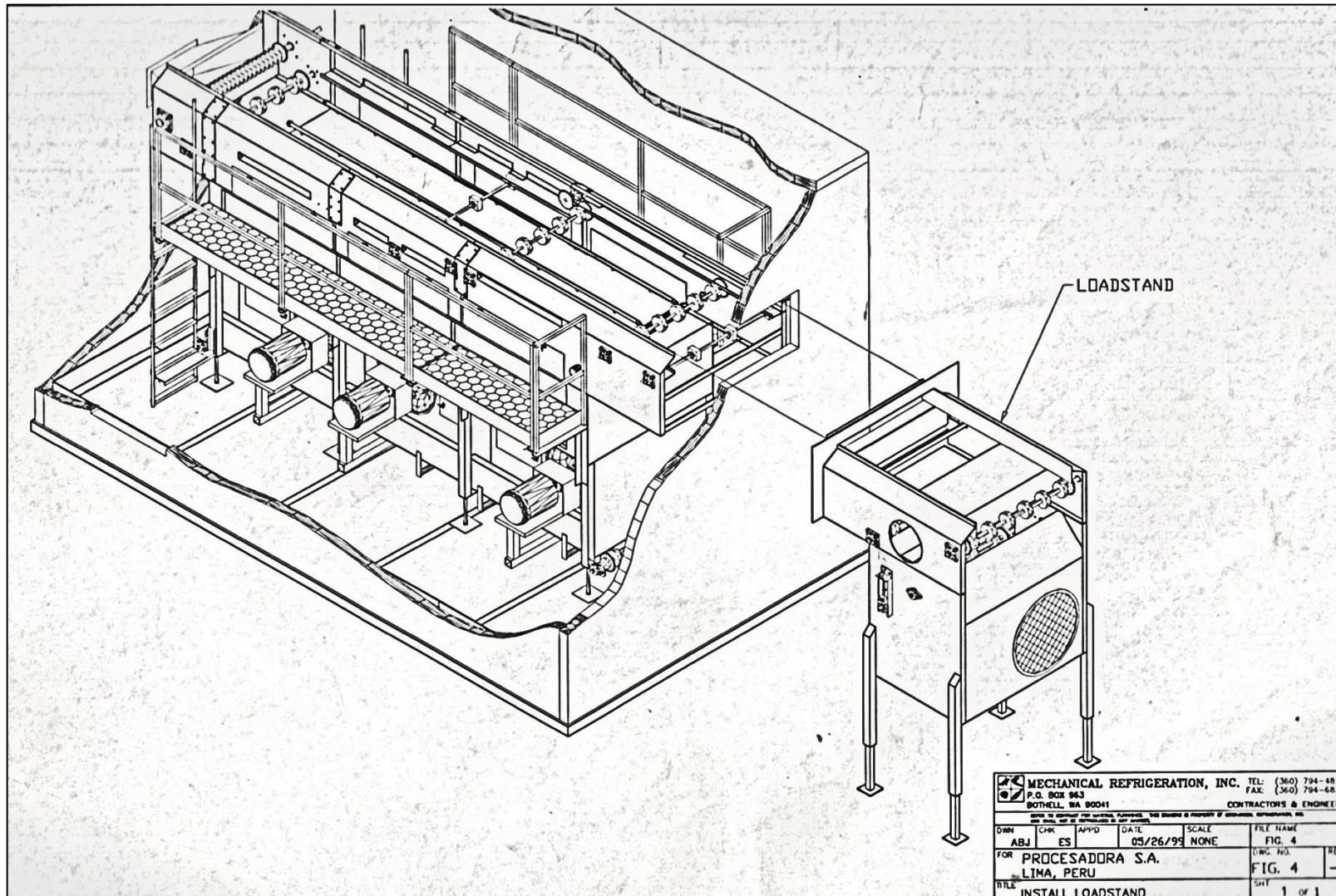
tsim=15000;          %Tiempo de simulación
t1=3600;             %Tiempo 1 donde Tp1 varia
t1=7000;             %Tiempo 2 donde Tp1 varia
t1=9000;             %Tiempo 3 donde Tp1 varia
t1=12000;            %Tiempo 4 donde Tp1 varia
dTp11=3;             %Variación de Tp1 en tiempo 1
dTp12=1;             %Variación de Tp1 en tiempo 1
dTp13=-1;           %Variación de Tp1 en tiempo 1
dTp14=-3;            %Variación de Tp1 en tiempo 1

clc

```

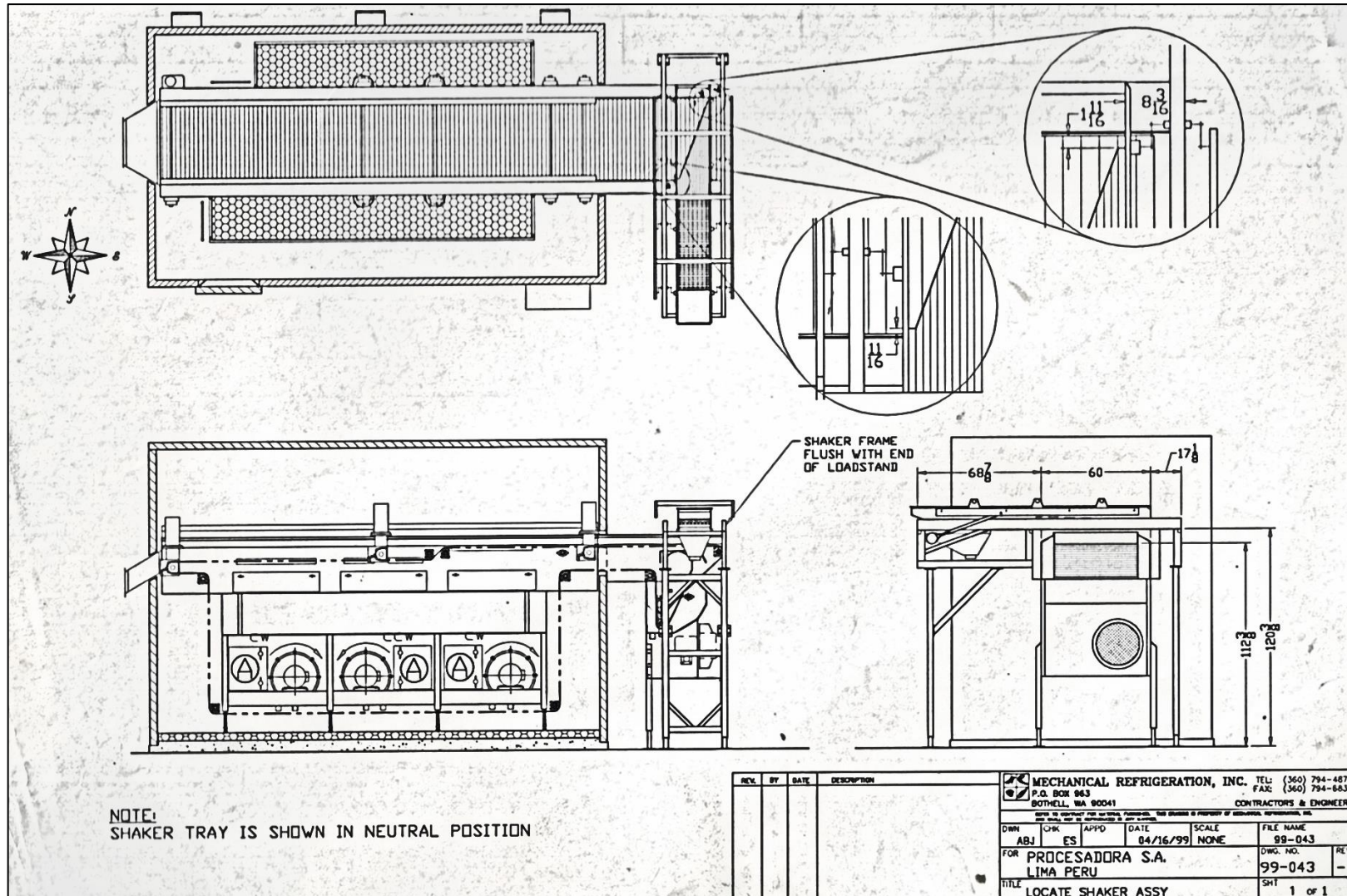
Fuente: *Elaboración propia.*

Anexo 11. Vista general seccionada del Túnel IQF.



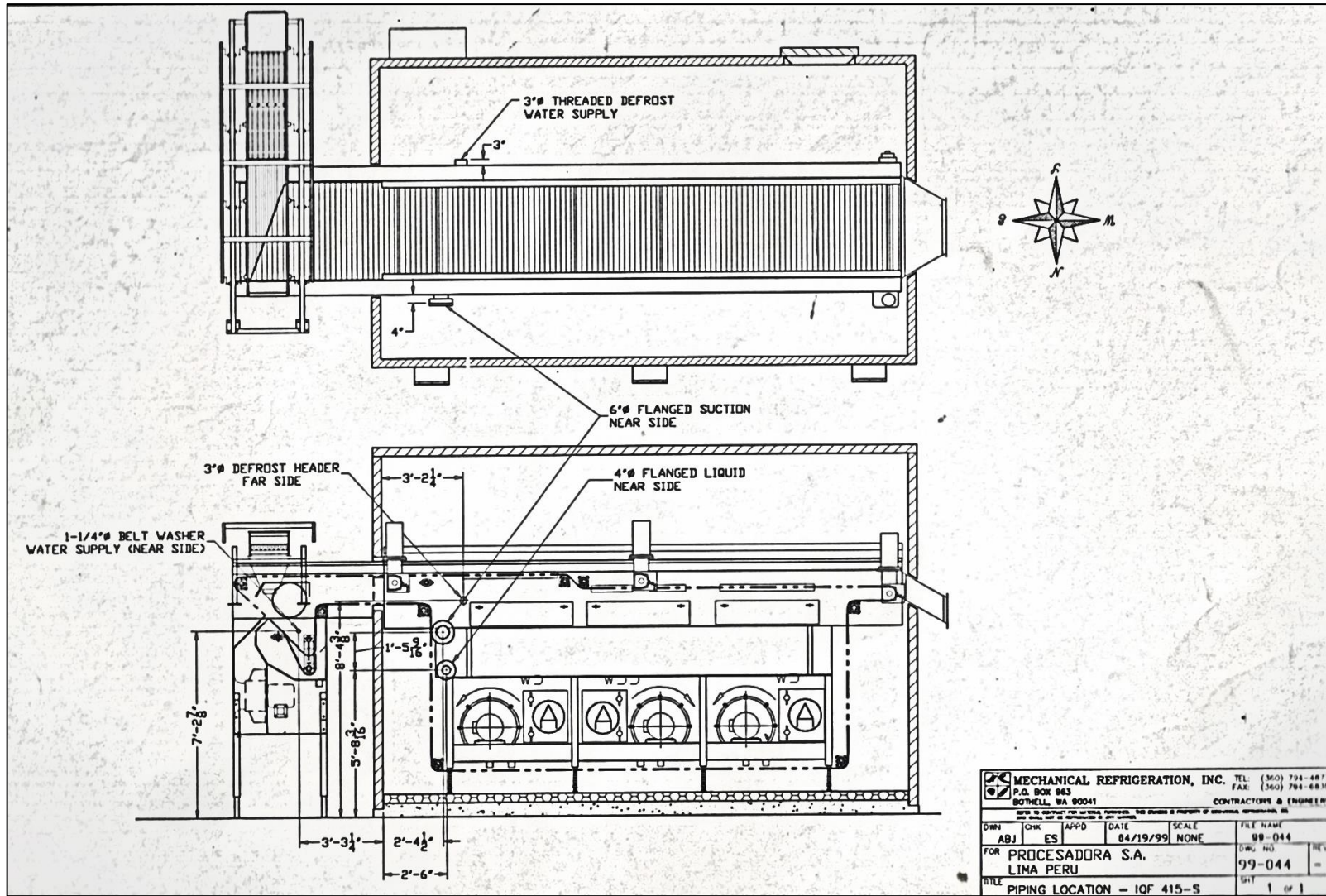
Fuente: PPSAC, 2019.

Anexo 12. Dimensiones del agitador de cadena del túnel IQF.



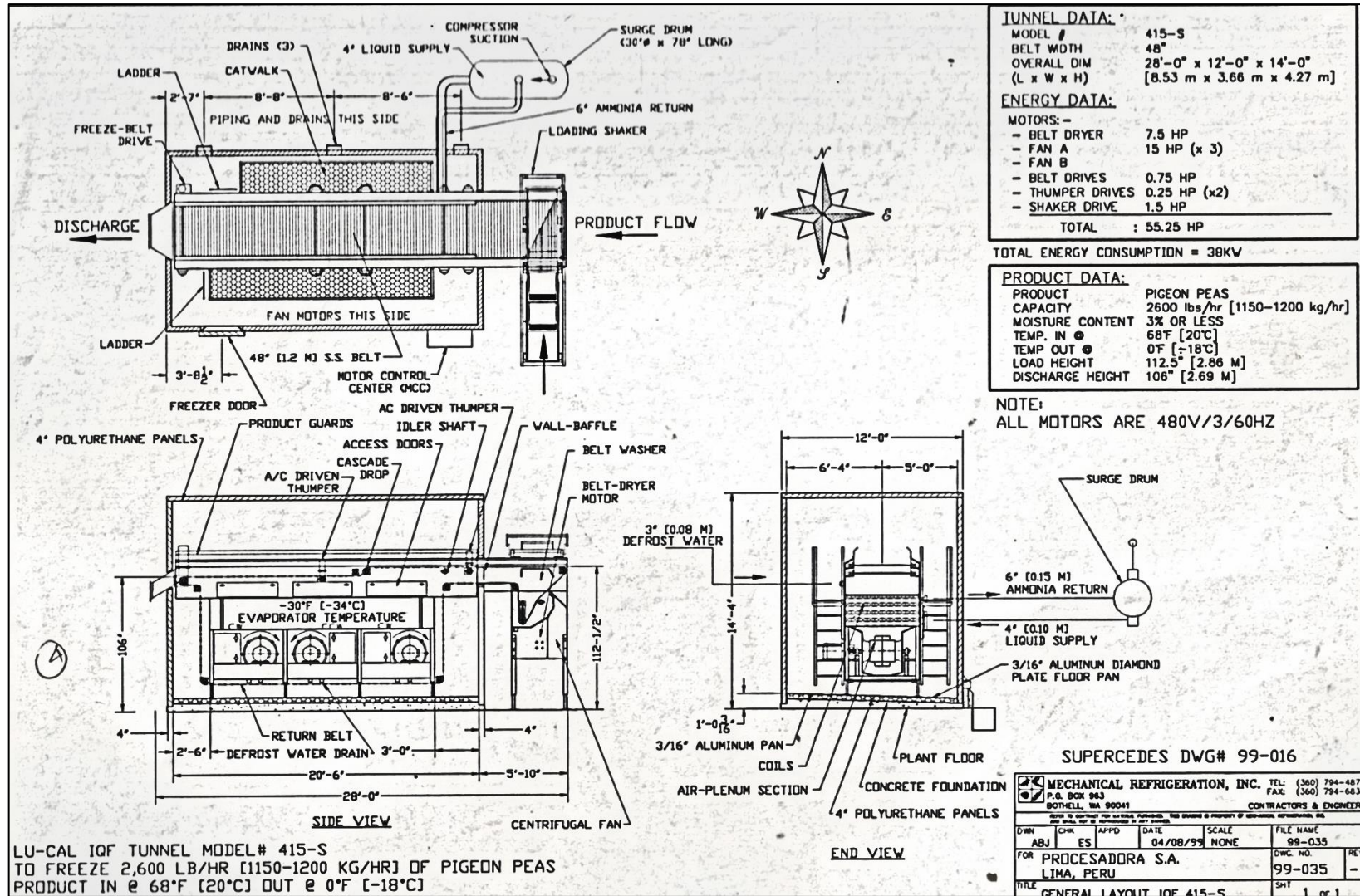
Fuente: PPSAC, 2019.

Anexo 13. Localización de las tuberías del sistema dentro del túnel IQF.



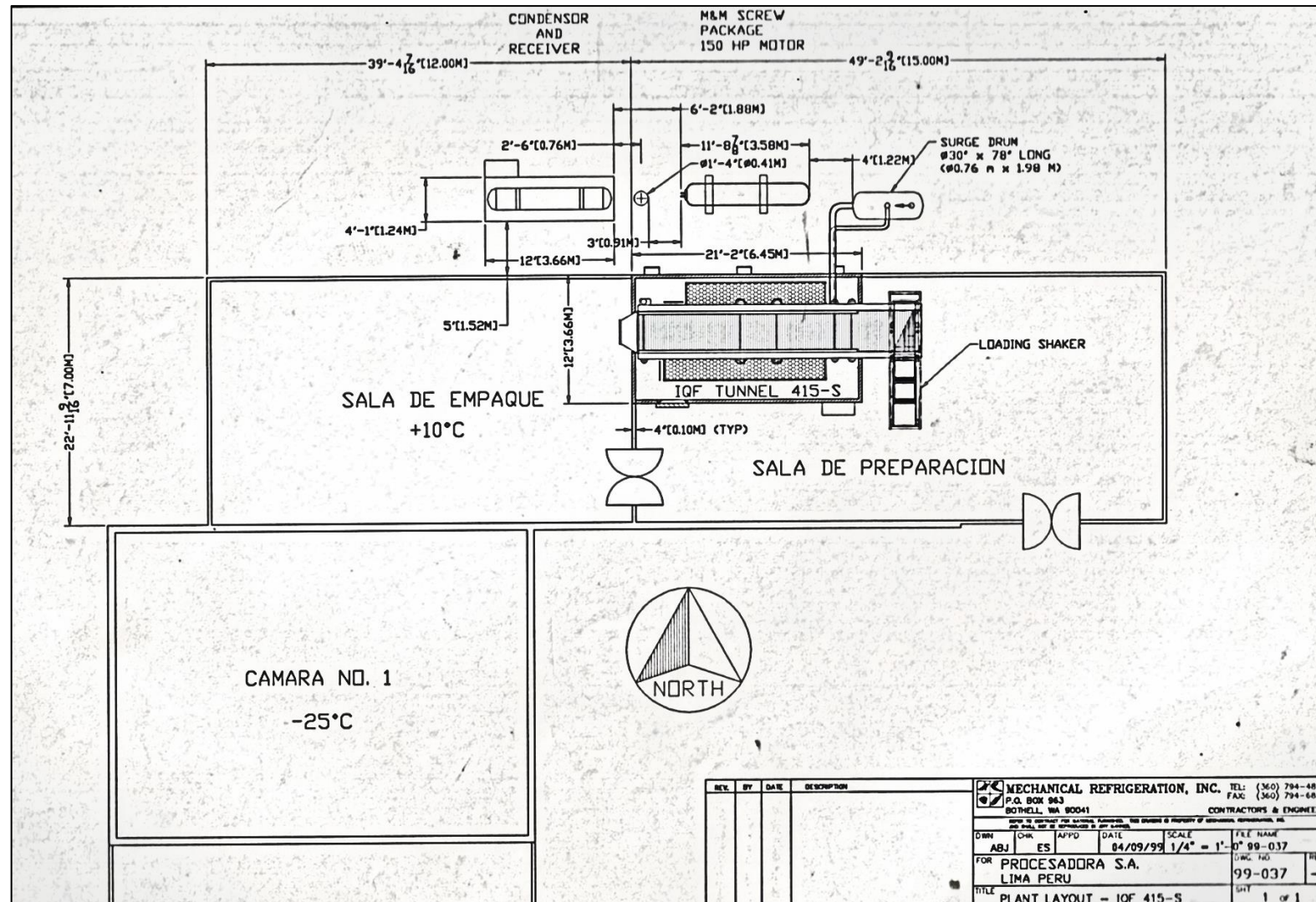
Fuente: PPSAC, 2019.

Anexo 14. Diseño general del túnel IQF.



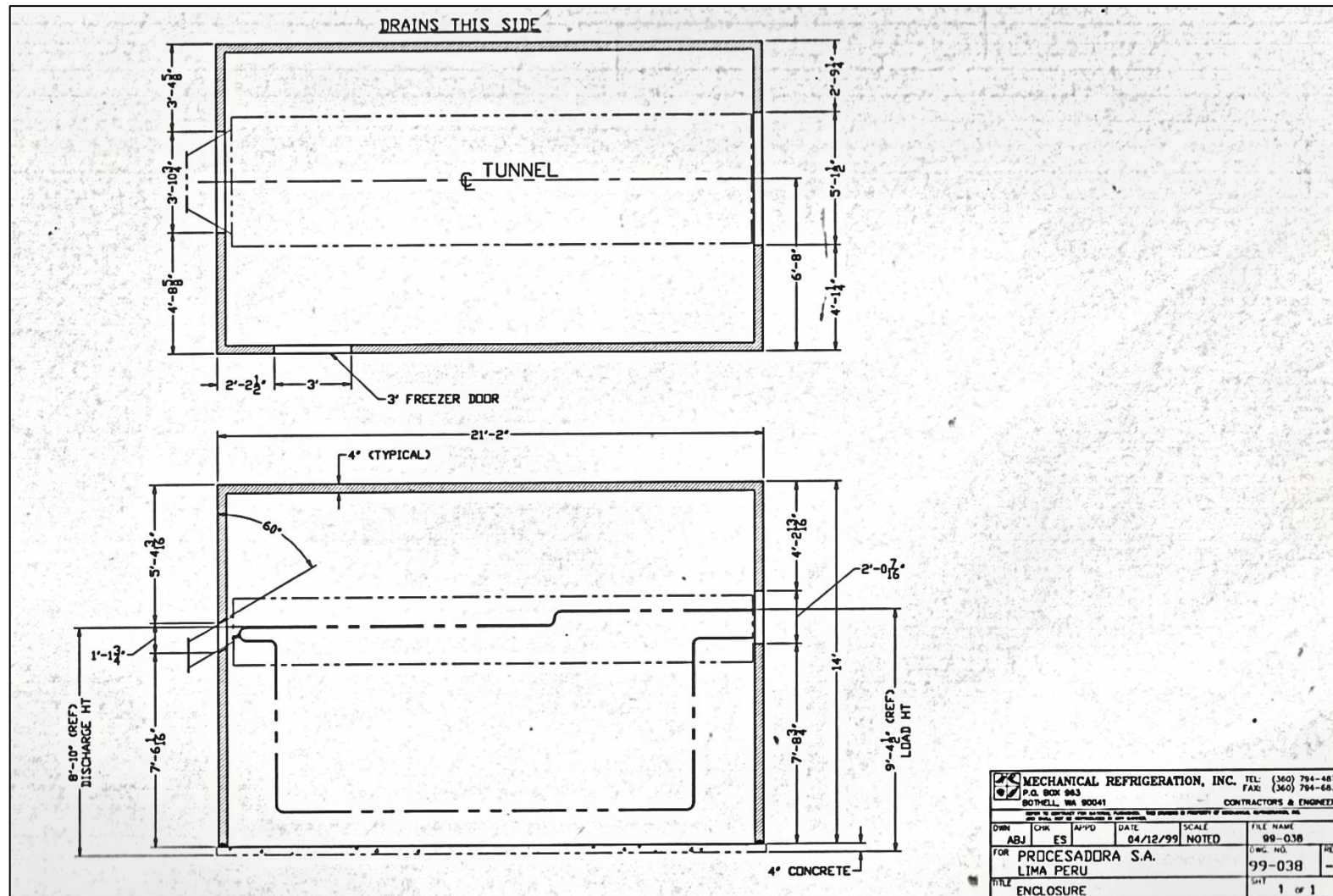
Fuente: PPSAC, 2019.

Anexo 15. Distribución del túnel IQF en la planta.



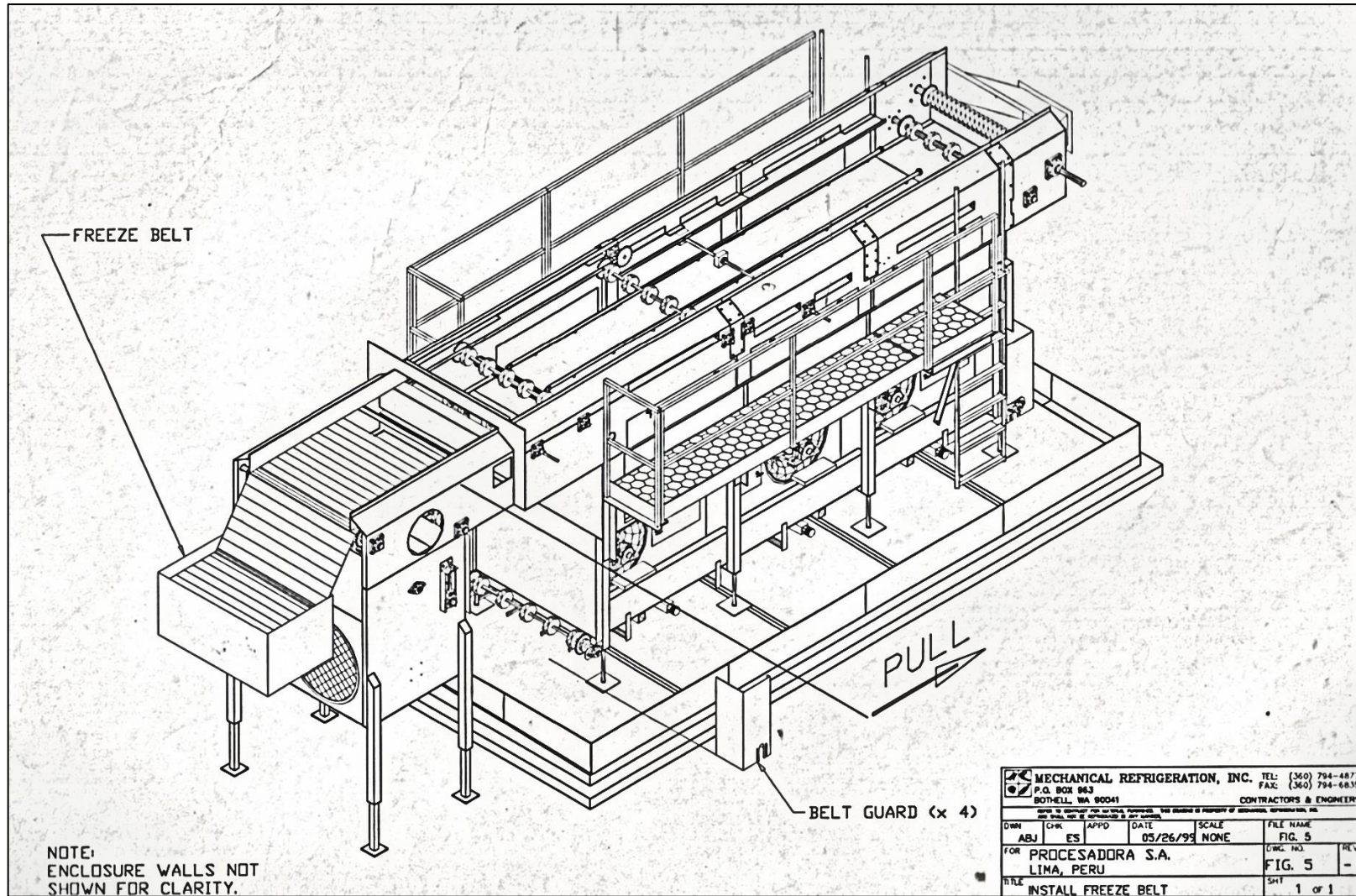
Fuente: PPSAC, 2019.

Anexo 16. Dimensiones del cuarto del túnel IQF.



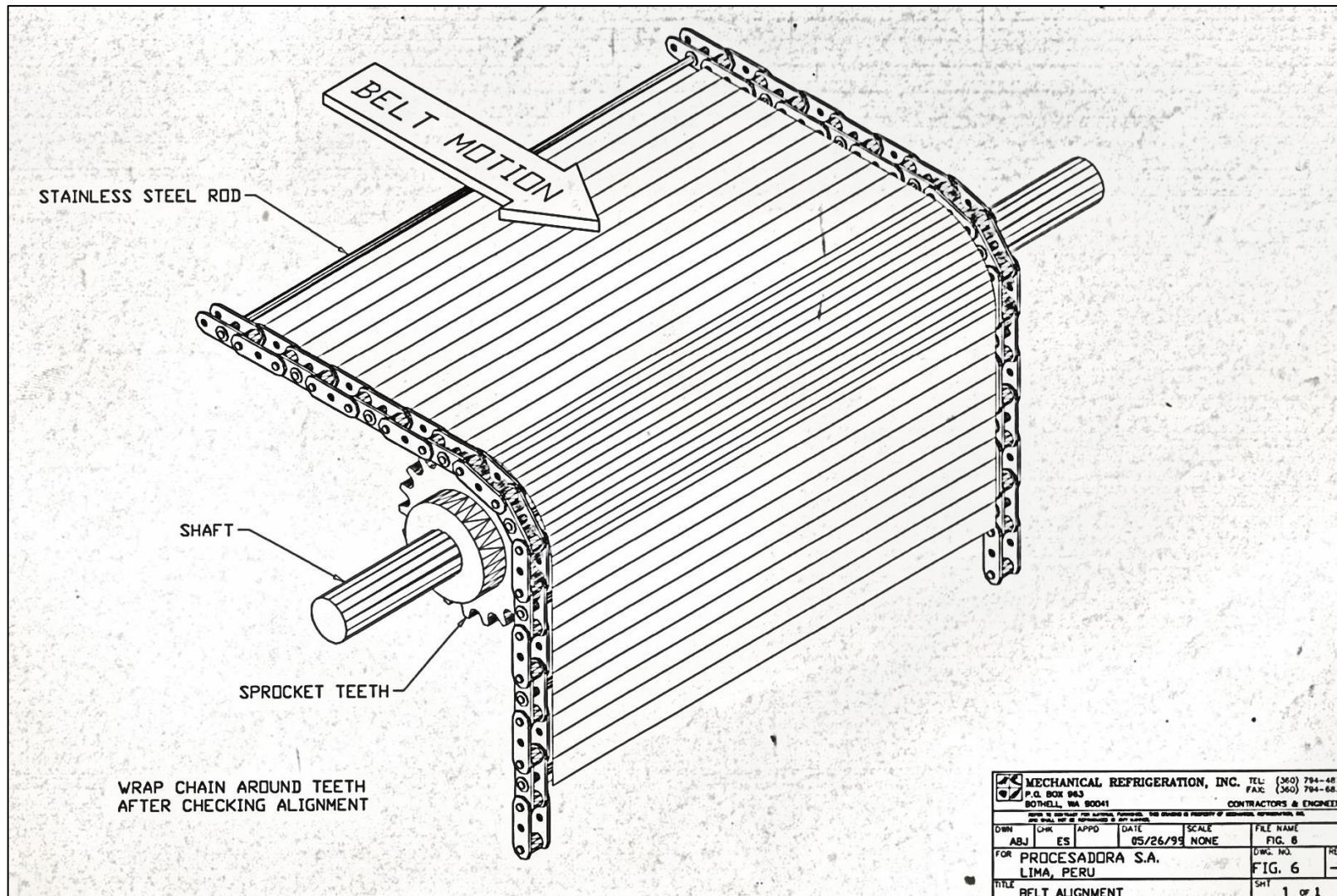
Fuente: PPSAC, 2019.

Anexo 17. Vista isométrica del sistema interior de la faja del túnel IQF.



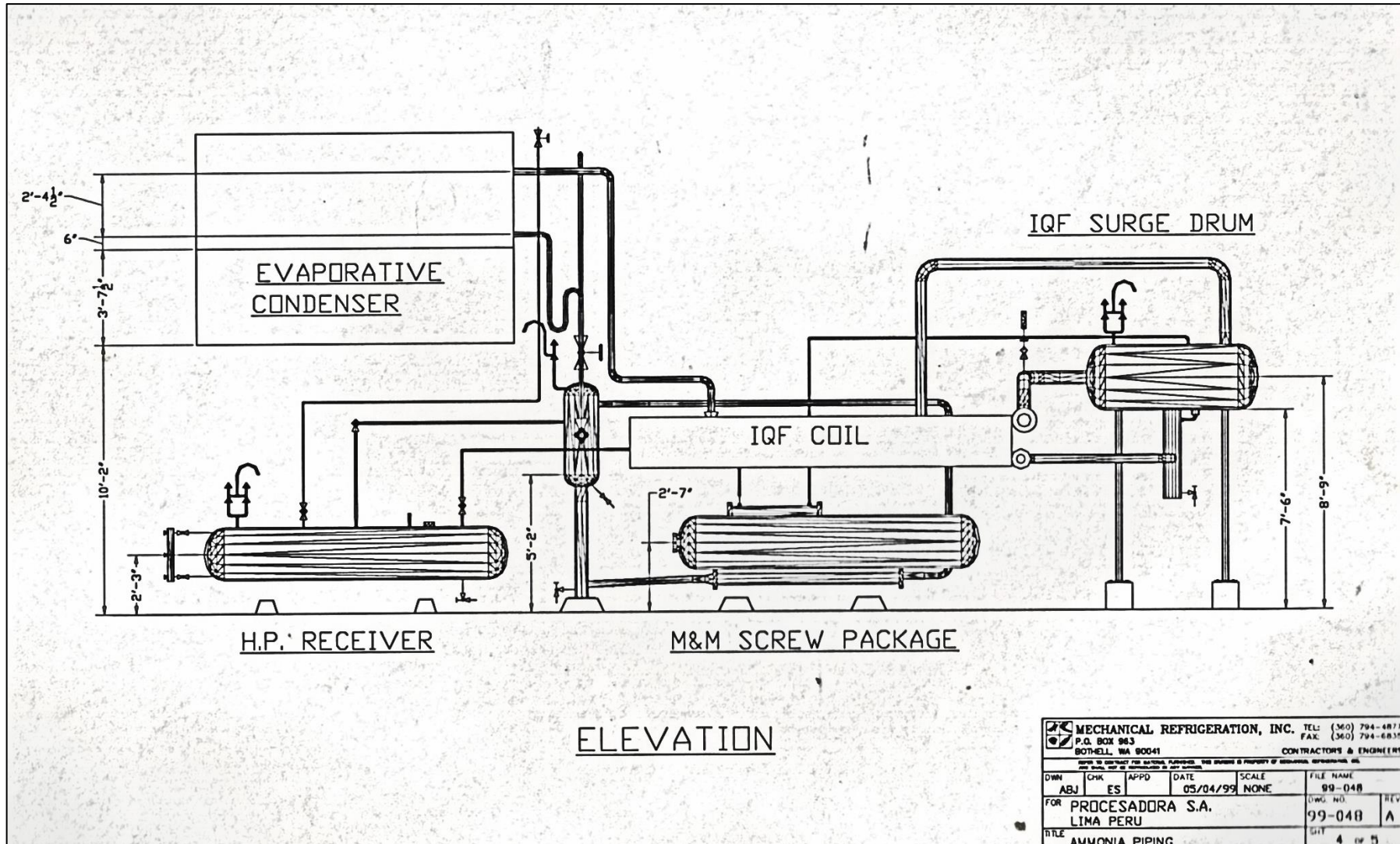
Fuente: PPSAC, 2019.

Anexo 18. Especificación de la faja por cadena.



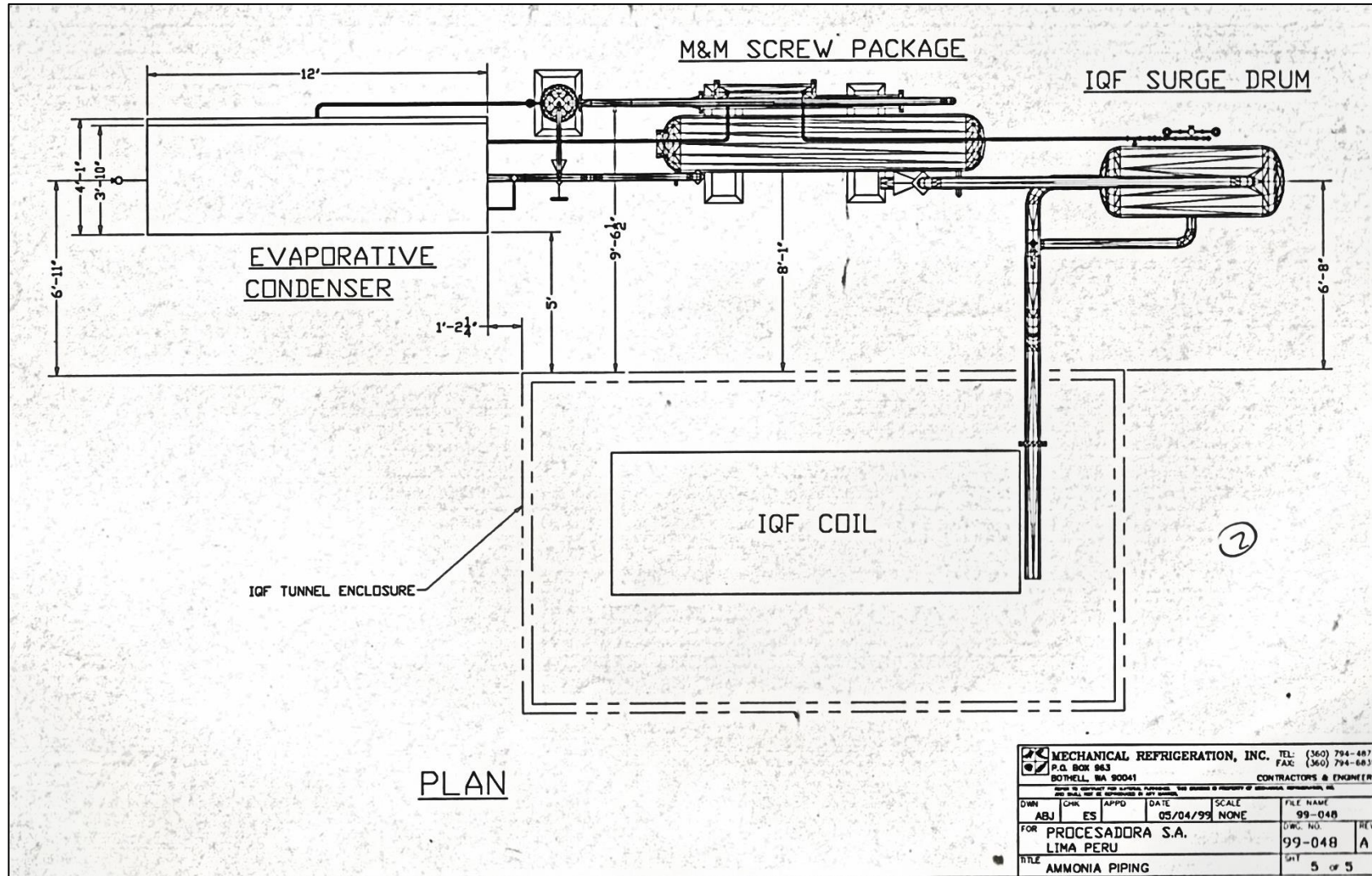
Fuente: PPSAC, 2019.

Anexo 19. Disposición de tuberías y tanques para la circulación de Amoniaco (Vista Frontal).



Fuente: PPSAC, 2019.

Anexo 20. Disposición de tuberías y tanques para la circulación de Amoniaco (Vista Superior).



		MECHANICAL REFRIGERATION, INC. TEL: (360) 794-4877 P.O. BOX 963 FAX: (360) 794-6835 BOOTHILL, WA 98041		CONTRACTORS & ENGINEERS	
<small>Not to contract for services, equipment, and materials in perpetuity of mechanical, electrical, etc. and shall not be responsible to any owner.</small>					
DWN	CHK	APPD	DATE	SCALE	FILE NAME
ABJ	ES		05/04/99	NONE	99-048
FOR PROCESADORA S.A. LIMA PERU					DWG. NO. 99-048
TITLE AMMONIA PIPING					REV. A
					SHIT 5 of 5

Fuente: PPSAC, 2019.

PLANOS

Plano 1. Plano General de Planta Procesadora Perú SAC. (Digital)

Plano 2. Sistema de Refrigeración Túnel IQF. (Digital)

Plano 3. Diagrama P&ID del controlador de temperatura de pulpa de mango.

Plano 4. Circuito de fuerza y control del sistema diseñado. (Digital)