

**ANÁLISIS DE LAS CARGAS TÉRMICAS Y SELECCIÓN DE EQUIPOS DE  
REFRIGERACIÓN PARA AUMENTAR LA CAPACIDAD DE ENFRIAMIENTO DE  
LECHE PARA LA PLANTA DE FRESKALECHE S.A.S. DE BUCARAMANGA.**

**EDGAR DAVID PINEDA ACEVEDO  
CARLOS ARTURO RODRIGUEZ PARDO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA**

**2017**

**ANÁLISIS DE LAS CARGAS TÉRMICAS Y SELECCIÓN DE EQUIPOS DE REFRIGERACIÓN PARA AUMENTAR LA CAPACIDAD DE ENFRIAMIENTO DE LECHE PARA LA PLANTA DE FRESKALECHE S.A.S. DE BUCARAMANGA.**

**EDGAR DAVID PINEDA ACEVEDO  
CARLOS ARTURO RODRIGUEZ PARDO**

**Trabajo de grado para optar por el  
TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO**

**Profesor  
OMAR ARMANDO GELVEZ AROCHA  
Ingeniero Mecánico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA**

**2017**

## DEDICATORIA

Dedico este proyecto a DIOS

A mi padre Edgar Pineda, a mi madre Nohora Acevedo, a Mi hermano Andres Felipe y Mi hermana Lina Patricia, más que mío este logro es de ustedes. Gracias por apoyarme durante todo este proceso.

También a todas las personas que aportaron de una u otra forma en la finalización de esta etapa.

Edgar David Pineda Acevedo

## DEDICATORIA

Dedico este proyecto a todas aquellas personas que hicieron parte de mi crecimiento tanto personal como profesional, a todas aquellas personas que me guiaron en la culminación de mi meta y todas aquellas personas que no permitieron rendirme y me alentaron a seguir adelante sin importar las dificultades...

Carlos Arturo Rodríguez Pardo

## AGRADECIMIENTOS

A nuestras familias por brindarnos apoyo a pesar de las adversidades.

Al ingeniero Fredy Rueda de Freskaleche por ofrecernos la oportunidad y brindarnos la confianza de realizar nuestro proyecto y a su vez guiarnos en el proceso de elaboración del mismo.

Al Ingeniero Omar Gelvez por su dedicación, su interés y su orientación profesional en el desarrollo del proyecto.

A la familia Freskaleche por su apoyo incondicional y su gentileza.

## CONTENIDO

|   |    |
|---|----|
| INTRODUCCIÓN .....  | 15 |
| 1. ESPECIFICACIONES DEL PROYECTO .....                                  | 18 |
| 1.1 LOCALIZACIÓN .....  | 18 |
| 1.2 RESEÑA HISTORICA.....   | 19 |
| 1.3 POLITICAS INTEGRADA DE GESTIÓN .....                                | 21 |
| 1.4 MISIÓN .....  | 22 |
| 1.5 VISIÓN.....   | 22 |
| 1.6 CERFICACIONES .....   | 22 |
| 1.7 ESTRUCTURA ORGANIZACIONAL .....                                     | 23 |
| 1.8 PORTAFOLIO DE PRODUCTOS.....  | 24 |
| 1.9 PROCESO PRODUCTIVO .....  | 25 |
| 1.9.1 Descripción de los procesos en la planta de leches .....          | 25 |
| 1.9.2 Descripción de los procesos en la planta de derivados .....       | 27 |
| 1.10 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....                                    | 29 |
| 1.11 OBJETIVO GENERAL.....  | 31 |
| 1.12 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....   | 31 |
| 1.13 JUSTIFICACIÓN.....   | 31 |
| 2. SISTEMA DE REFRIGERACIÓN DE AGUA HELADA POR BANCOS DE HIELO.....     | 33 |
| 2.1 QUE ES UN BANCO DE HIELO.....                                       | 33 |
| 2.2 DESCRIPCIÓN DE LOS COMPONENTES DEL SISTEMA DE BANCOS DE HIELO ..... | 34 |
| 2.2.1 Compresores. ....   | 36 |
| 2.2.2 Condensador evaporativo .....                                     | 36 |
| 2.2.3 Tanque recibidor de amoniaco.....                                 | 36 |
| 2.2.4 Evaporador. ....  | 36 |
| 2.3 SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA FRÍA.....                           | 38 |
| 2.3.1 Sistema de bombeo. ....   | 40 |

|       |   |     |
|-------|---|-----|
| 3.    | CÁLCULO DE LAS CARGAS TÉRMICAS ACTUALES DE LOS PROCESOS POR HORAS .....                                 | 42  |
| 3.1   | OBTENCIÓN DE LOS FLUJOS MÁSICOS DE LAS BOMBAS .....   | 42  |
| 3.1.1 | Ejemplificación de obtención de caudal de la bomba principal de derivados.....                          | 46  |
| 3.2   | OBTENCIÓN DE TEMPERATURAS SUPERFICIALES DE TUBOS A LA SALIDA Y ENTRADA DE LOS INTERCAMBIADORES .....    | 50  |
| 3.3   | ANÁLISIS DE TRANSFERENCIA DE CALOR PARA OBTENER TEMPERATURAS INTERNAS DE TUBOS .....                    | 54  |
| 3.3.1 | Ejemplo análisis de transferencia de calor para temperatura de salida del intercambiador de Yogurt..... | 59  |
| 3.4   | OBTENCIÓN DE CARGAS TÉRMICAS POR HORAS.....   | 66  |
| 3.4.1 | Ejemplo de cálculo de carga de Intercambiador de Yogurt a las 18:00 hs ...                              | 69  |
| 3.4.2 | Ejemplo de carga térmica para las 18:00 hs. ....  | 70  |
| 4.    | CALCULO DE LA CAPACIDAD DE REFRIGERACIÓN .....  | 72  |
| 4.1   | MASA DE REFRIGERANTE DEL SISTEMA.....   | 72  |
| 4.1.1 | Calculo de masa de refrigerante. ....   | 74  |
| 4.2   | DESEMPEÑO TEÓRICO DEL CICLO TERMODINÁMICO. ....   | 79  |
| 4.3   | POTENCIA ELÉCTRICA REAL. ....   | 85  |
| 4.4   | ANÁLISIS DE LA CAPACIDAD DE REFRIGERACIÓN.....  | 87  |
| 5.    | DISEÑO DEL NUEVO SISTEMA DE REFRIGERACIÓN .....   | 90  |
| 5.1   | FUNCIONAMIENTO DE SISTEMA DE ENFRIAMIENTO DE AGUA-CHILLER.....  | 93  |
| 5.2   | PLANTEAMIENTO DEL NUEVO SISTEMA .....   | 94  |
| 5.2.1 | Selección de Chiller. ....  | 98  |
| 6.    | VIABILIDAD ECONÓMICA DEL DISEÑO PROPUESTO .....   | 100 |
| 6.1   | ANÁLISIS ECONÓMICO DEL ACTUAL SISTEMA (BANCOS DE HIELO) CON LAS CARGAS DE DISEÑO .....                  | 101 |
| 6.2   | ANÁLISIS ECONÓMICO DEL NUEVO SISTEMA CON LAS CARGAS DE DISEÑO. ....                                     | 102 |
| 6.3   | ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS DOS SISTEMAS .....  | 104 |
| 7.    | RECOMENDACIONES .....   | 106 |
| 8.    | CONCLUSIONES .....  | 107 |

BIBLIOGRAFIA.....109  
ANEXOS.....110

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1. Fachada principal Planta Freskaleche Bucaramanga.....                                       | 18 |
| Figura 2. Agencias de Distribución Freskaleche.....   | 19 |
| Figura 3. Logo Freskaleche .....  | 19 |
| Figura 4. Certificaciones .....   | 23 |
| Figura 5. Estructura Organizacional.....  | 24 |
| Figura 6. Proceso de Recibo de Leche.....   | 25 |
| Figura 7. Proceso de Pasteurización.....  | 26 |
| Figura 8. Esquema por Bancos de Hielo. ....   | 33 |
| Figura 9. Ciclo de Refrigeración por Bancos de Hielo de la Planta Freskaleche S.A.S Bucaramanga ..... | 34 |
| Figura 10. Sistema de Tuberías.....   | 38 |
| Figura 11. Esquematación de cada línea .....  | 40 |
| Figura 12. Esquema de bombeo de la planta .....   | 43 |
| Figura 13. Curva de rendimiento bomba principal de derivados.....                                     | 46 |
| Figura 14. Parametrización de la bomba principal de derivados.....                                    | 47 |
| Figura 15. Termómetro Digital .....   | 50 |
| Figura 16. Termómetro infrarrojo Fluke 62 .....   | 51 |
| Figura 17. Diagrama de Resistencias de Transferencia de calor.....                                    | 54 |
| Figura 18. Diagrama de flujos de Transferencia de calor. ....   | 54 |
| Figura 19. Perfil de cargas Actuales .....  | 71 |
| Figura 20. Ciclo de Compresión real PV de un Compresor Reciprocante .....                             | 73 |
| Figura 21. Ciclo de refrigeración del actual sistema .....  | 79 |
| Figura 22. Capacidad del Sistema vs Perfil de Cargas.....   | 88 |
| Figura 23. Potencia Ideal vs Potencia Real .....  | 89 |
| Figura 24. Funcionamiento sistema de enfriamiento Chiller .....                                       | 94 |
| Figura 25. Diseño del Nuevo sistema .....   | 97 |
| Figura 26. Comparación entre cargas de sistemas de alto carga con sistemas ....                       | 98 |
| Figura 27. Características del Chiller seleccionado. ....   | 99 |

## LISTA DE TABLAS

|   |     |
|---|-----|
| Tabla 1. Componentes sistema de refrigeración Freskaleche S.A.S. ....   | 35  |
| Tabla 2. Datos técnicos compresores. ....   | 36  |
| Tabla 3. Características Bancos de Hielo ....   | 37  |
| Tabla 4. Especificación de cada línea de agua fría. ....  | 39  |
| Tabla 5. Características de las bombas ....   | 41  |
| Tabla 6. Datos de trabajo de las bombas ....  | 45  |
| Tabla 7. Puntos de parametrización de la bomba principal de derivados ....                                      | 47  |
| Tabla 8. Caudales de bombas de la planta. ....  | 49  |
| Tabla 9. Flujo Másico de las Bombas ....  | 50  |
| Tabla 10. Temperaturas superficiales. ....  | 53  |
| Tabla 11. Tabla de datos ambientales y estructurales. ....  | 59  |
| Tabla 12. Temperaturas del Agua. ....   | 65  |
| Tabla 13. Horario de Funcionamiento de procesos ....  | 67  |
| Tabla 14. Horario de Funcionamiento de las Bombas de Agua Fría. ....  | 68  |
| Tabla 15. Cargas Térmicas Actuales por Hora ....  | 71  |
| Tabla 16. Modelos de los Compresores Instalados ....  | 74  |
| Tabla 17. Datos Medidos Para las 18 horas ....  | 75  |
| Tabla 18. Volumen Físico de los Compresores ....  | 76  |
| Tabla 19. Masa de refrigerante total por Hora ....  | 78  |
| Tabla 20. Recopilación de Datos del Ciclo Real de Compresión. ....  | 80  |
| Tabla 21. Datos Tomados para ejemplificar el cálculo del ciclo termodinámico. ...                               | 81  |
| Tabla 22. Generalización de datos teóricos y reales de cargas. ....   | 84  |
| Tabla 23. Consumo Eléctrico de los motores de los compresores ....  | 85  |
| Tabla 24. Tabla comparativa (Estado Real e ideal) ....  | 87  |
| Tabla 25. Requerimientos del nuevo sistema. ....  | 90  |
| Tabla 26. Características de los productos de cada proceso. ....  | 91  |
| Tabla 27. Carga requerida para cada proceso ....  | 92  |
| Tabla 28. Cargas térmicas en los procesos de alta y baja a lo largo del día ....                                | 96  |
| Tabla 29. Cargas ideales requeridas en el nuevo sistema. ....   | 100 |
| Tabla 30. Seguimiento del consumo energético del Chiller con las cargas<br>requeridas en el nuevo sistema. .... | 103 |

## LISTA DE ANEXOS

|   |     |
|---|-----|
| Anexo A. Curva de eficiencia bomba auxiliar derivados-20H-6W IHM .....    | 109 |
| Anexo B. Curva de eficiencia bomba auxiliar leche-30H-10Tw IHM .....      | 110 |
| Anexo C. Curva de eficiencia bomba de Tanque 0-20H-6W IHM.....            | 111 |
| Anexo D. Curva de eficiencia bomba principal derivados-20H-7,5Tw IHM..... | 112 |
| Anexo E. Curva de eficiencia bomba principal leche-30A-15W IHM.....       | 113 |
| Anexo F. Curva de eficiencia bomba Tangelo 6,6 Hp Barnes .....            | 114 |
| Anexo G. Interpolación de bombas.....                                     | 115 |
| Anexo H. Calculo de caudales de bombas .....                              | 121 |
| Anexo I. Análisis temperatura de tubería. ....                            | 125 |
| Anexo J. Calculo de cargas por hora .....                                 | 127 |
| Anexo K. Análisis desempeño teórico ciclo termodinámico. ....             | 141 |
| Anexo L. Calculo de cargas nuevo diseño. ....                             | 144 |
| Anexo M. Diagramas AutoCAD.....   | 149 |

## RESUMEN

**TÍTULO:** ANÁLISIS DE LAS CARGAS TÉRMICAS Y SELECCIÓN DE EQUIPOS DE REFRIGERACIÓN PARA AUMENTAR LA CAPACIDAD DE ENFRIAMIENTO DE LECHE PARA LA PLANTA DE FRESKALECHE S.A.S. DE BUCARAMANGA \*

**AUTORES:** EDGAR DAVID PINEDA ACEVEDO\*\*  
CARLOS ARTURO RODRIGUEZ PARDO\*\*

**PALABRAS CLAVE:** SISTEMA DE REFRIGERACIÓN DE AGUA, INTERCAMBIADORES DE CALOR, CICLO TERMODINÁMICO, CAPACIDAD DE ENFRIAMIENTO, BANCOS DE HIELO.

### DESCRIPCIÓN:

Este proyecto se enfoca en el análisis energético del sistema de enfriamiento de agua utilizado en la refrigeración de los distintos procesos para la producción de leche y derivados llevados a cabo en la planta de Freskaleche S.A.S Bucaramanga. Los objetivos también se centran en el planteamiento de un nuevo sistema que se integre de manera óptima en todos los procesos de la planta de leches y derivados.

Se realiza un levantamiento de información de los procesos desarrollados actualmente de la planta. A partir de la información recopilada se realiza un estudio de las cargas térmicas en los procesos en los que interviene el agua fría. Se analiza el funcionamiento del sistema de refrigeración (banco de hielo) para determinar la capacidad de disipar la carga térmica de los procesos y así determinar la eficiencia del sistema de refrigeración.

Con los resultados obtenidos en el análisis realizado se plantea un nuevo diseño del sistema de refrigeración para que funcione de manera adecuada con los actuales y futuros procesos de la planta, además se estudia su viabilidad económica respecto al ahorro en el consumo energético para su implementación.

Con el nuevo sistema se determinó que el ahorro energético llegó a ser del 54% por lo que se concluye que el proyecto tiene una amplia viabilidad.

---

\* Proyecto de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Omar Armando Gelvez Arocha.

## ABSTRACT

**TITLE:** ANALYSIS OF THE THERMAL LOADS AND SELECTION OF EQUIPMENTS OF REFRIGERATION TO INCREASE THE CAPACITY OF COOLING MILK FOR THE PLANT OF FRESKALECHE S.A.S. BUCARAMANGA \*

**AUTHORS:** EDGAR DAVID PINEDA ACEVEDO\*\*  
CARLOS ARTURO RODRIGUEZ PARDO\*\*

**KEY WORDS:** SYSTEM OF WATER REFRIGERATION, INTERCHANGERS OF HEAT, THERMODYNAMIC CYCLE, CAPACITY OF COOLING, ICE BANKS.

### DESCRIPTION:

This project focuses in the energetic analysis of the system of water cooling used in the refrigeration of the different processes for the production of milk and derivatives carried out in plant the Freskaleche S.A.S Bucaramanga. The aims also centre on the exposition of a new system that joins in an ideal way all the processes of the plant of milk and derivatives.

There is realized a raising of information of the processes developed nowadays of the plant. From the compiled information there is realized a study of the thermal loads in the processes in which it controls the cold water. There is analyzed the functioning of the system of refrigeration (ice bank) to determine the aptitude to remove the thermal load of the processes and this way to determine the efficiency of the system of refrigeration.

With the results obtained in the realized analysis there appears a new design of the system of refrigeration in order that it works of way adapted with the current and future processes of the plant, in addition his economic viability is studied with regard to the saving in the energetic consumption for his implementation.

With the new system I determine that the energetic saving I manage to be 54 % for what one concludes that the project has a wide viability.

---

\* Graduation Project

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Omar Armando Gelvez Arocha.

## INTRODUCCIÓN

Freskaleche es una empresa colombiana con gran experiencia en la producción y comercialización de productos lácteos procesados de altos estándares de calidad. Freskaleche nace a base de la cooperativa de productores de leche de Santander y Magdalena Medio (Cooproleche Ltda.) en el año de 1982 y para el año de 1989 se compra el primer pasteurizador de 4000 Litros con el que entra al mercado de la leche procesada y sus derivados. Hoy día recibe leche desde 8 centros de acopio convirtiéndose en la mayor pasteurizadora de la región además que cuenta con plantas en Bucaramanga y Aguachica.

La manipulación de la leche y sus derivados se suele hacer a bajas temperaturas para inhibir crecimiento de microorganismos patógenos, comúnmente esto se logra mediante agua fría que mantienen en un mínimo los contaminantes en caso de falla. En la planta de Freskaleche Bucaramanga se utiliza en la mayoría de casos un sistema de Banco de hielo para la obtención del agua fría, la eficiencia de esta cobra gran importancia para mantener el producto a bajas temperaturas (menor a 4°C según código sanitario) y seguir siendo competitivos debido a que un alto consumo de energía conllevaría un valor agregado para el producto.

El presente proyecto busca realizar un análisis térmico del funcionamiento actual del banco de hielo en la planta de Freskaleche Bucaramanga determinando su eficiencia frente a las necesidades de crecimiento, además un diseño que permita una mayor producción y un consumo mínimo de energía. Se tendrá que analizar la viabilidad de la instalación de este nuevo sistema.

## 1. ESPECIFICACIONES DEL PROYECTO

### 1.1 LOCALIZACIÓN

La planta principal de la compañía está ubicada en el parque industrial de Bucaramanga Km. 3 vía Palenque-Chimita, departamento de Santander, Colombia.

**Figura 1.** Fachada principal Planta Freskaleche Bucaramanga.



Teléfonos de contacto: PBX (7)6761761-FAX (7)6761919-FRESKALECHELINEA: 018000 917032

Además de su planta principal la empresa cuenta con cinco agencias en el país las cuales quedan ubicadas en:

- Barrancabermeja: Calle 40 A N° 62-27 Barrio El Campestre. Teléfonos: 620 5564 - 620 6550
- Cúcuta: Av. 4 N7n-75. Zona industrial Cúcuta. Teléfono: 679 1128

- Barranquilla: Km 2 vía Galapa, Polígono, Parque Industrial Galapark. Bodega N° 1.
- Santa Marta: Avenida Libertador N° 23 - 16. Teléfono 434 9176
- Aguachica: Km 7 Vía Bucaramanga. Teléfono 313 423 5269

**Figura 2.** Agencias de Distribución Freskaleche.



Fuente: Freskaleche S.A.S.

## 1.2 RESEÑA HISTORICA

FRESKALECHE S.A.S. es una empresa colombiana ubicada en el departamento de Santander, cuenta con una gran experiencia y trayectoria en el desarrollo, producción y comercialización de productos lácteos y alimentos procesados de altos estándares de calidad.

**Figura 3.** Logo Freskaleche



Fuente: [www.freskaleche.com.co](http://www.freskaleche.com.co)

FRESKALECHE S.A.S. desciende de COOPROLECHE LTDA, Cooperativa de Productores de Leche de Santander y el Magdalena Medio que se fundó en 1982, nació como una inquietud de ganaderos del Sur del Cesar, Sur de Bolívar, Norte de Santander y Santander; la idea era conseguir mercado y mejores precios para la leche cruda, en 1989 se compra un pasteurizador y el 1 de marzo de ese año salen al público con los primeros 4000 litros de leche pasteurizada, crema de leche y cuajada. El intento no funcionó muy bien, ocasionando que muchos de los socios de COOPROLECHE LTDA optaran por retirarse, lo cual provoco una coyuntura que permitió a los socios consolidados plantear una reestructuración de la cooperativa, la cual dio origen a la Sociedad Anónima que hoy conocemos como FRESKALECHE S.A.S.<sup>1</sup>

El nombre lo deriva de una marca inglesa denominada FRESH MILK y fue idea del Dr. Humberto Polanía. Los colores institucionales al igual que el tricolor patrio, cada uno tiene su propio significado, el blanco es el color de nuestra materia prima principal, la leche; el azul porque para efectos de mercadeo denota frescura y el rojo por ser escogido por los clientes que más amamos, los niños.

FRESKALECHE S.A.S se alimenta de leche cruda desde ocho centros de acopio, cinco de ellos cooperativas mixtas en un formato, mediante el cual, los productores de leche son dueños del 50% de acciones y el otro 50% corresponde a la compañía, convirtiendo de esta manera a FRESKALECHE S.A.S. no solo en la principal pasteurizadora de la región, sino de paso en un pequeño grupo empresarial, dichos centros son: Lácteos la Esperanza, en La Esperanza, Norte de Santander; Lácteos Cimitarra, en Cimitarra; Lácteos Ágata, en Vélez; Lácteos Rovirenses en Málaga y Lácteos Tamacara, en el Socorro, también nos proveen los centros de acopio de Aguachica; Aprisa, en Sabana de Torres y Simijaca en Cundinamarca.

En marzo del 2015, después de 33 años de trabajo con su visión de expansión y fortalecimiento de la marca reconocida a nivel regional, la compañía fue vendida al

---

<sup>1</sup> FRESKALECHE. Quienes Somos [En línea]. (recuperado 13 de octubre 2017). Disponible en <http://www.freskaleche.com.co/nosotros.html#nosotros>

grupo ALQUERIA Productos Naturales de la Sabana S.A. responsables hoy en día.

### **1.3 POLITICAS INTEGRADA DE GESTIÓN**

Freskaleche S.A.S como compañía dedicada a ofrecer productos lácteos y alimentos procesados, busca garantizar la satisfacción de las necesidades de todas sus partes interesadas, la protección del medio ambiente y la seguridad y salud de todos los colaboradores, contratistas y visitantes, a través de su compromiso de:

- Cumplir los requisitos legales vigentes y de otra índole aplicables de calidad, inocuidad, ambiental, seguridad y salud en el trabajo
- Asegurar que los requisitos del sistema de gestión estén integrados en los procesos de la compañía.
- Identificar los peligros, evaluar y valorar los riesgos y establecer los respectivos controles con el fin de prevenir los accidentes y enfermedades laborales.
- Prevenir la contaminación ambiental
- Asignar los recursos humanos, financieros y tecnológicos de manera eficiente para el fortalecimiento del sistema de gestión
- Gestionar de manera eficaz los procesos, aspectos ambientales significativos y riesgos organizacionales
- Contar con colaboradores comprometidos con la conservación de la infraestructura, los recursos y el autocuidado que fortalezcan la mejora continua y la cultura del sistema de gestión, que contribuyan desde su liderazgo a la eficacia del mismo y al logro de los resultados previstos en cuanto a crecimiento, rentabilidad y sostenibilidad.

## 1.4 MISIÓN

Desarrollar, producir y comercializar productos lácteos y alimentos procesados que aporten bienestar y nutrición a nuestros consumidores cumpliendo con altos estándares de calidad y políticas organizacionales, con el fin de generar beneficios a la sociedad, nuestros proveedores, clientes, colaboradores y rentabilidad para los accionistas.<sup>2</sup>

## 1.5 VISIÓN

FRESKALECHE S.A.S. 2013 – 2017. A 2017 Freskaleche crecerá en 50% sus ventas de manera rentable.

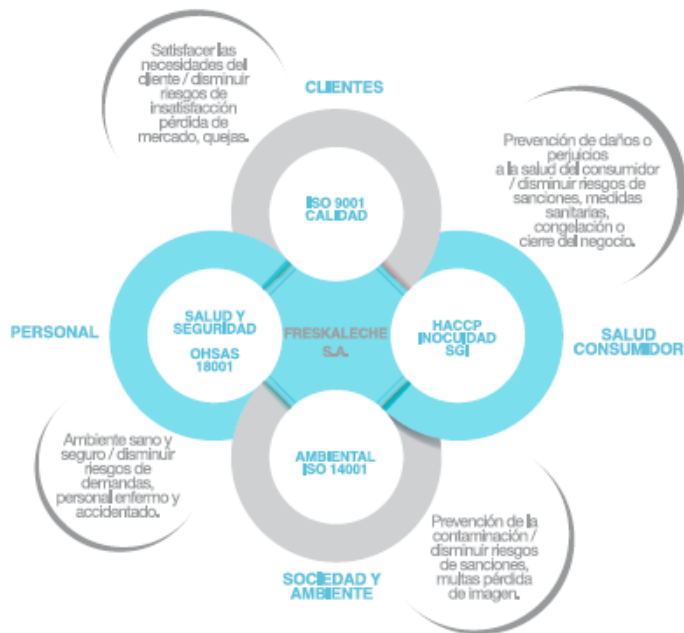
## 1.6 CERTIFICACIONES

La empresa FRESKALECHE S.A. Cuenta con las certificaciones **ISO 9001** sistema de gestión de calidad, **OHSAS 18001** Sistema de Gestión en Seguridad Industrial y Salud ocupacional, **ISO 14001** Sistema de Gestión Ambiental, HACCP Análisis de Peligros y Puntos de Control Críticos.

---

<sup>2</sup> FRESKALECHE. Quienes Somos [En línea]. (recuperado 13 de octubre 2017). Disponible en <http://www.freskaleche.com.co/nosotros.html#nosotros>

**Figura 4. Certificaciones**

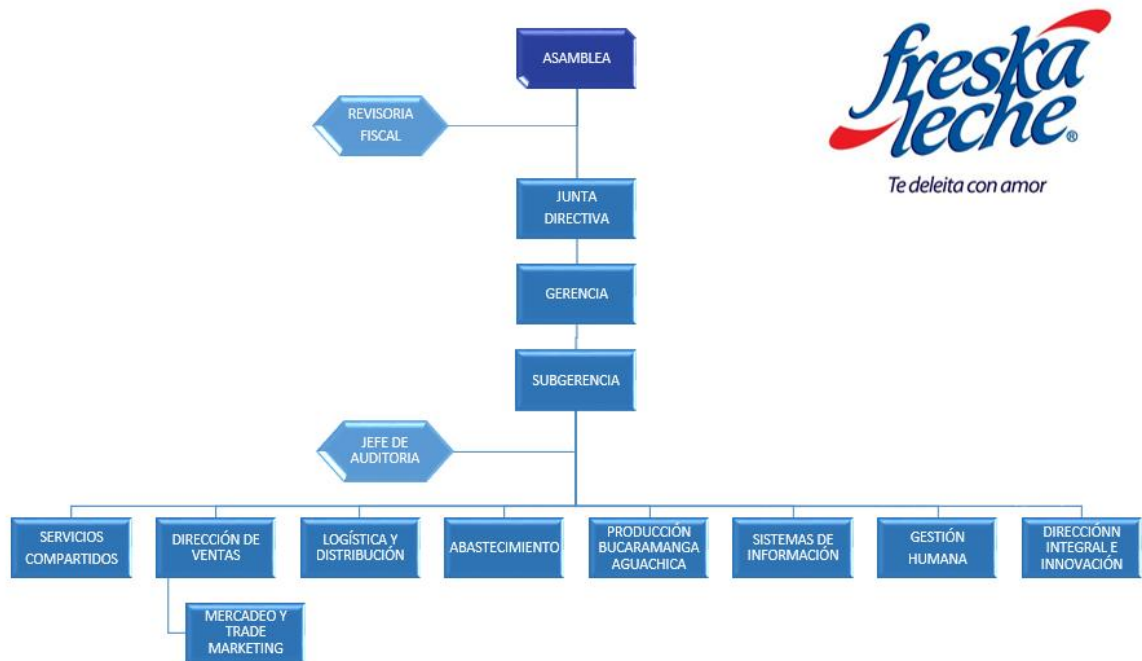


Fuente: Gestión Humana, Freskaleche S.A.S

## 1.7 ESTRUCTURA ORGANIZACIONAL

La estructura organizacional de la empresa está formada por una junta directiva, Gerencia, ocho directores entre administrativos, sus jefaturas y sus respectivos grupos de trabajo.

**Figura 5. Estructura Organizacional**



Fuente: Gestión Humana, Freskaleche S.A.S:

## 1.8 PORTAFOLIO DE PRODUCTOS

Los productos ofrecidos en la compañía se pueden dividir en bebidas lácteas, refrescos, postres y quesos<sup>3</sup>:

- Leche Entera.
- Leche en Polvo Entera.
- Leche Deslactosada.
- Leche Light.
- Yogurt entero con probióticos “Yogurcito”.
- Yogurt entero con probióticos.
- Yogurt con Adición.
- Tangelo.

<sup>3</sup> FRESKALECHE. Productos [En línea]. (Recuperado 13 de octubre 2017). Disponible en <http://www.freskaleche.com.co/nutricion.html#nutricion>

- Avena.
- Choco Leche.
- Crema de Leche.
- Queso doble crema, Quesito, Quesillo.
- Mantequilla Industrial.

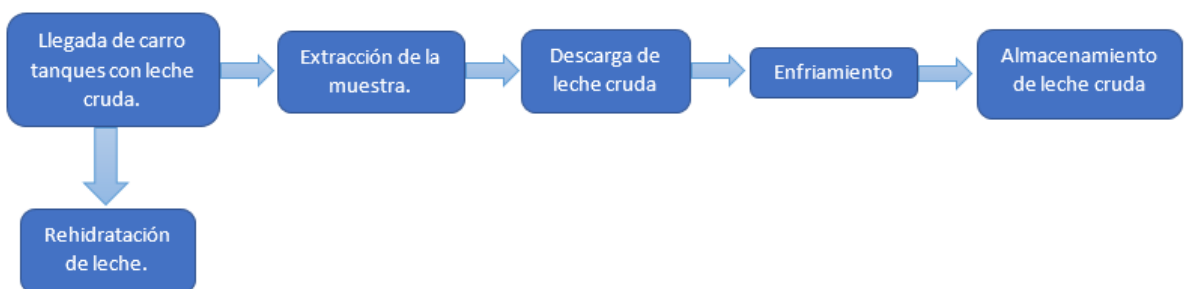
## 1.9 PROCESO PRODUCTIVO

Para especificar los procesos productivos de Freskaleche, solo se mencionarán los procesos que actualmente se realizan en la planta de Bucaramanga.

### 1.9.1 Descripción de los procesos en la planta de leches: RECIBO DE LECHE.

Se debe pasar la leche cruda que llega desde los acopios a los tanques 0-1-2 con capacidad de 50.000 litros cada uno. La leche debe ser pasada a un caudal de 5000-9000 litros/hora por un intercambiador de placas. Luego, el operario de turno (3 turnos/día) debe lavar los tanques por buenas prácticas de manufactura.

**Figura 6.** Proceso de Recibo de Leche.



- **PASTEURIZACIÓN O TERMIZACIÓN.** Es un proceso al que se somete la leche cruda, terminada o recombinada a una adecuada relación de temperatura y tiempo para destruir su flora patógena y la casi totalidad de flora banal, sin alterar de manera esencial ni su valor nutritivo ni sus características fisicoquímicas y

organolépticas. Las condiciones mínimas de pasteurización son aquellas que tiene efectos bactericidas equivalentes al calentamiento de cada partícula a 72°C - 76°C por 15 segundos (pasteurización de flujo continuo) o 61 °C a 63° C por 30 minutos (pasteurización discontinua) seguido de enfriamiento inmediato hasta temperatura de refrigeración o almacenamiento de 4+/-2°C.<sup>4</sup> , además el homogeneizador tiene un caudal de 10.000 Litros/hora. Cabe resaltar que Freskaleche tiene un indicador alto de exigencia de alta calidad para recibir la leche, pues requiere leche seleccionada con buenas prácticas pecuarias.

**Figura 7.** Proceso de Pasteurización.



- **ULTRA-ALTA-TEMPERATURA UAT (UHT) LECHE LARGA VIDA.** Es el producto obtenido mediante proceso térmico en flujo continuo, aplicado a la leche cruda o termizada a una temperatura entre 135 °C a 150 °C y tiempos entre 2 y 4 segundos, de tal forma que se compruebe la destrucción eficaz de las esporas bacterianas resistentes al calor, seguido inmediatamente de enfriamiento a

---

<sup>4</sup> COLOMBIA, MINISTERIO DE LA PROTECCION SOCIAL. Decreto 616 (28, Febrero, 2006). Por el cual se expide el reglamento técnico sobre los requisitos que se debe cumplir la leche para el consumo humano que se obtenga, procese, envase, transporte, comercializa, expendi, importe o exporte del país. Bogota D.C.: El Ministerio. 32. 5p.

temperatura ambiente y envasado aséptico en recipientes estériles con barreras a la luz y al oxígeno, cerrados herméticamente, para su posterior almacenamiento, con el fin de que se asegure la esterilidad comercial sin alterar de manera esencial ni su valor nutritivo ni sus características fisicoquímicas y organolépticas, la cual puede ser comercializada a temperatura ambiente.<sup>5</sup>

- **ENVASADORAS:** Para el proceso de empaque de leche se debe tener en cuenta el tiempo de alistamiento de la maquina ultra-pasteurizador que es 2 horas. En la planta de Bucaramanga existen 5 máquinas envasadoras: 2 prepack, 2 ESSI y una Elecster. las cuales pueden trabajar hasta 80 unidades/min, 76 unidades/min y 135 unidades/min respectivamente.
- **EMBALAJE.** De todo el volumen de producción cierta cantidad es empacada manualmente en bolsas de seis unidades por dos operarios que están a la salida de cada envasadora. Otro volumen es empacado automáticamente por la Bagger una maquina cuya capacidad es 8 Sixpack/minuto.

**1.9.2 Descripción de los procesos en la planta de derivados: YOGURT.** Se inicia con una rigurosa selección de la leche en la planta de acopio. Esta leche debe ser de la mejor calidad y lo más importante libre de antibióticos. La leche cruda seleccionada y liberada por el laboratorio es bombeada a un tanque de mezcla donde se realiza el proceso de dosificación, en el cual se le adicionan los sólidos: azúcar y leche en polvo. Una vez elaborada la mezcla, es pasteurizada a 90 grados centígrados durante 15 minutos y es bombeada hacia un tanque llamado madurador a una temperatura de 43 grados centígrados. A esta temperatura se le aplican los cultivos o fermentos lácticos y estos empiezan a producir con la lactosa que contiene la leche, redes lácticas que le dan el aroma y la viscosidad al yogurt, en este proceso el yogurt es continuamente agitado a diferentes velocidades, con el fin de lograr una

---

<sup>5</sup> COLOMBIA, MINISTERIO DE LA PROTECCION SOCIAL. Decreto 616 (28, Febrero, 2006). Por el cual se expide el reglamento técnico sobre los requisitos que se debe cumplir la leche para el consumo humano que se obtenga, procese, envase, transporte, comercializa, expendia, importe o exporte del país. Bogota D.C.: El Ministerio. 32. 5p.

buena consistencia. Para realizar el corte se da paso al agua fría por 15 minutos, donde el yogurt desciende su temperatura hasta 38 °C.

Luego se da paso por un intercambiador de placas donde se enfría la mezcla a 10 grados centígrados y se envía a unos tanques de saborización, donde se le adicionan los saborizantes, las pulpas y los colorantes según la programación del tipo de yogurt que se vaya a envasar. Para tal fin se usan diferentes presentaciones que se colocan en cestillos que luego son almacenados en cuartos fríos para ser distribuidos posteriormente.

- **TANGELO.** El Tangelo es elaborado con agua filtrada en un tanque de mezcla donde se le aplican el azúcar, las gomas que le dan viscosidad, los preservativos, la vitamina C y la base de Citrus Punch. Se agita en el tanque por un tiempo de 20 minutos para obtener una mezcla homogénea. Se miden al final de la mezcla los grados brix y la acides. Luego de haber cumplido con estos parámetros, la mezcla es pasteurizada a 80 grados centígrados durante 15 segundos y enfriada a 10 grados centígrados. Finalmente es almacenada en un tanque para su posterior envasado en las diferentes presentaciones.
- **MANTEQUILLA.** El proceso de producción parte desde la etapa de estandarización de la leche en la que un equipo centrífugo retira un porcentaje de la grasa. Ésta grasa es la materia prima para la producción de la mantequilla; llamada crema de leche. Ésta con un porcentaje de grasa del 60% es enfriada a 8 grados centígrados y bombeada a una batidora estacionaria donde se somete a un proceso físico simple de agitación mecánica para producir la separación de la grasa y el suero. Este tiempo de separación dura 45 minutos. Luego la tapa batidora es abierta para desuerar y poder lavar la mantequilla con agua fría. Después del lavado se le aplica la sal disuelta en agua fría y el preservativo. Se le da una agitación por 5 minutos para luego ser descargada en un recipiente de acero inoxidable para ser empacada y almacenada a -10 grados centígrados en cuartos de congelación
- **QUESO.** La producción se inicia con la selección de la leche y liberación por parte del laboratorio de antibióticos. Luego la leche es pasteurizada a 72 grados centígrados durante 15 minutos y se estandariza la grasa del 2.8 al 3%. La leche es

bombeada a una tina y es calentada a 38 grados centígrados. A esta temperatura se le aplican los cultivos lácticos dejándolos actuar durante una hora. Luego se le aplica el cuajo y la leche se deja en reposo durante 45 minutos hasta su coagulación. Está cuajada es cortada con las liras que posee la tina de preparación del tamaño ideal propio para este tipo de queso para producir el desuere. La cuajada con el suero es bombeada a un equipo llamado pre-prensa: allí la cuajada se le aplica una presión para extraer la mayor cantidad de humedad o suero posible. La cuajada en trozos es adicionada a un equipo llamado hiladora, sigue en agua caliente a 80 grados centígrados y después es transportada por tornillos sin fin para darle el amasado y el fundido propio de 46 este tipo de queso. La cuajada hilada es dosificada de acuerdo con la presentación, moldeada y almacenada en frío durante 8 horas. Luego el queso es desmoldado y sumergido en salmuera fría a 12 grados centígrados para su salado durante 12 horas. Después es empacado al vacío en empaque termoencogible y tiene 10 días de maduración en cuarto frío.<sup>6</sup>

## **1.10 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

En la actualidad Freskaleche S.A.S tiene un amplio portafolio de productos lácteos y alimentos procesados para consumo humano cuya manipulación y procesamiento exige el cumplimiento de normas que regulen su tratamiento y almacenamiento. Una de las normas más importantes en el tratamiento de la leche decreta mantener el producto en diversos procesos (tratamiento y transporte) a temperaturas entre 4°C +/- 2°C para que no se alteren las propiedades fisicoquímicas de la leche garantizando así la calidad del producto.

Para lograr las bajas temperaturas de refrigeración de la leche y de los productos Freskaleche S.A.S adquirió en la década de los noventa un sistema de refrigeración

---

<sup>6</sup> ARDILA, Mónica & ZARATE, Sergio. (2011). Diseño e Implementación de alternativas de mejoramiento basadas en producción más limpia para el manejo del recurso hídrico en Freskaleche S.A. (Tesis de Pregrado). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.

por bancos de hielo para la planta de Bucaramanga. Este sistema es ampliamente utilizado en la industria de alimentos por el uso de agua como elemento principal en la refrigeración al que se deben exponer los procesos.

La característica principal del Banco de Hielo es que requieren un tiempo de carga para un óptimo funcionamiento. En el tiempo de carga del sistema circula gas amoníaco a baja temperatura por un serpentín dentro del tanque de agua que va creando una capa de hielo sobre el evaporador. Esto permite compensar las altas temperaturas en las líneas de retorno de agua. Este sistema es propicio para un lugar donde el costo de la energía eléctrica sea menor en horarios nocturnos, que sería el periodo de carga del Banco de Hielo, sin embargo, Bucaramanga cuenta con una tarifa fija por kWh.

Con el crecimiento de la empresa aumento la carga de refrigeración, sobrepasando la capacidad para la que fue diseñado el sistema. Actualmente debe estar en constante carga para poder trabajar continuamente y satisfacer favorablemente las demandas de agua fría que la planta requiere. Esta demanda de mayor flujo de agua fría y baja eficiencia del banco de hielo ha obligado a la empresa Freskaleche S.A.S. a instalar un sistema de refrigeración auxiliar que se encargue de los procesos de tratamiento continuo en el área de pasteurización.

Contar con un sistema de años de antigüedad conlleva a creer que tiene una baja eficiencia, esto combinado con las altas demandas de agua fría hacen necesario el diseño de un nuevo sistema que abarque la demanda existente y una futura acorde al crecimiento de la planta, además que cuente con un mínimo de costos en instalación, mantenimiento y consumo de energía.

### **1.11 OBJETIVO GENERAL**

Contribuir con la misión de la Universidad Industrial de Santander, de generar desarrollo social, científico y tecnológico, afianzando la relación entre la Universidad y la empresa Freskaleche S.A. mediante el estudio de la carga térmica actual para la ampliación del sistema de enfriamiento de leche.

### **1.12 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Diseñar un nuevo sistema de refrigeración óptimo que se integre en todas las áreas requeridas (leche y derivados).
- Analizar el desempeño actual del sistema de bancos de hielo utilizado para la refrigeración de procesos del área de leche y derivados
- Obtener las cargas energéticas a refrigerar para el óptimo funcionamiento de los procesos (tanto los actuales, como los que se buscan agregar).
- Analizar económicamente la viabilidad para la integración de este nuevo sistema en las áreas propuestas.

### **1.13 JUSTIFICACIÓN**

Uno de los temas de mayor relevancia en la actualidad es la gestión energética, el cual, ha sido tema de discusión en múltiples congresos ambientalistas sobre las diferentes maneras en la que se puede contribuir a la conservación del medio ambiente a nivel mundial, sin embargo, Colombia no cuenta con los suficientes controles para mitigar el deterioro ambiental, y a causa de esto, varias industrias utilizan los recursos naturales de manera inadecuada.

Es importante para una empresa como Freskaleche S.A.S actualizar las tecnologías de producción con el fin de reducir consumos energéticos, haciéndose eficiente, logrando sobresalir en el mercado colombiano. El costo eléctrico de los procesos

repercute directamente sobre el valor agregado de los productos, por lo que una alta eficiencia reduce el costo de producción y hace más competitiva la empresa.

Debido al alto consumo de energía eléctrica del sistema principal de refrigeración (Bancos de Hielo) producto de su baja eficiencia, se diseña un nuevo sistema de refrigeración de mayor eficiencia que tenga la capacidad de suplir las cargas térmicas de los procesos de las áreas de leche y derivados.

## 2. SISTEMA DE REFRIGERACIÓN DE AGUA HELADA POR BANCOS DE HIELO.

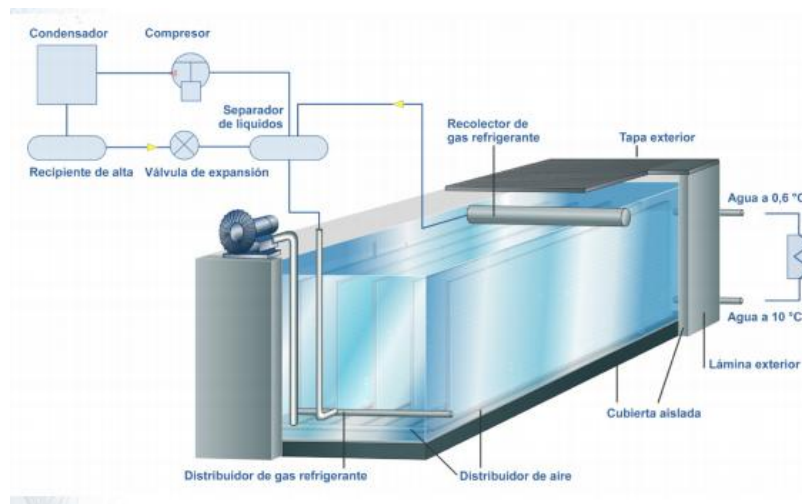
### 2.1 QUE ES UN BANCO DE HIELO

Los bancos de hielo son sistemas de enfriamiento de agua utilizados en la mayoría de casos por la industria de alimentos debido a su bajo riesgo de contaminación. En los sistemas de bancos de hielo quien absorbe el calor proporcionado por el sistema es el evaporador inundado, el cual es un serpentín de gran área de contacto, por el cual circula amoníaco (R717 -  $\text{NH}_3$ ) a baja presión y baja temperatura. Por transferencia de calor el amoníaco crea una capa de hielo sobre el serpentín del evaporador de modo que a medida que el agua que regresa de los procesos ingresa al tanque, el hielo absorbe ese calor y mantiene a baja temperatura el agua en el tanque.

Los bancos de hielo tienen las siguientes ventajas:

- Temperatura del agua fría estable en aproximadamente  $1^\circ\text{C}$
- Alta capacidad frigorífica para picos de consumo
- Carga de refrigerante muy baja
- Diseño abierto de fácil acceso, inspección y limpieza.

**Figura 8.** Esquema por Bancos de Hielo.



Fuente: [http://www.htt-ag.com/leaflets/htt-buco-ice-bank-base\\_es.pdf](http://www.htt-ag.com/leaflets/htt-buco-ice-bank-base_es.pdf)



**Tabla 1.** Componentes sistema de refrigeración Freskaleche S.A.S.

| <b>Número</b> | <b>Descripción</b>   |
|---------------|--|
| 1             | Compresor Reciprocante Mycom 1 – 60 Hp                               |
| 2             | Compresor Reciprocante Mycom 2 – 50 Hp                               |
| 3             | Compresor Reciprocante Mycom 3 – 75 Hp                               |
| 4             | Compresor Reciprocante Mycom 4 – 60 Hp                               |
| 5             | Tubería de retorno de aceite al Carter del compresor                 |
| 6             | Separador Refrigerante - Aceite                                      |
| 7             | Línea Vapor sobrecalentado (Alta presión – Alta temperatura)         |
| 8             | Torre Evaporativa Baltimore  |
| 9             | Tubería de Agua de enfriamiento torre Baltimore                      |
| 10            | Bomba de Agua de enfriamiento Torre Baltimore                        |
| 11            | Tanque receptor de Amoniaco  |
| 12            | Línea de líquido saturado (alta presión – Temperatura de Saturación) |
| 13            | Válvula de Expansión   |
| 14            | Trampa de liquido  |
| 15            | Agitador Agua Bancos de Hielo  |
| 16            | Banco de Hielo 1 – 45 m <sup>3</sup>                                 |
| 17            | Banco de Hielo 2 – 50 m <sup>3</sup>                                 |
| 18            | Banco de Hielo 3 - 50 m <sup>3</sup>                                 |
| 19            | Tubería de vapor saturado (Baja presión - Baja temperatura)          |

El ciclo de refrigeración instalado actualmente en la planta de Freskaleche de Bucaramanga corresponde a un ciclo de refrigeración de compresión de vapor. Los Compresores Reciprocantes están conectados en paralelo al igual que los evaporadores inundados o bancos de hielo, cabe resaltar que cada banco de hielo cuenta con su propia válvula de expansión.

**2.2.1 Compresores.** Actualmente en la planta de Freskaleche S.A.S. hay instalados cuatro compresores alternativos cuyas especificaciones se encuentran en la tabla 2.

**Tabla 2.** Datos técnicos compresores.

| COMPRESOR | MOTOR ELÉCTRICO [Hp] | MODELO    | RPM MOTOR | CAP. TEORICA DE REFRIGERACION [TR] | CAPACIDAD VOLUMETRICA |
|-----------|----------------------|-----------|-----------|------------------------------------|-----------------------|
| MYCOM 1   | 60                   | N6WA      | 1250      | 53                                 | 100-66-33             |
| MYCOM 2   | 50                   | N4WA - BB | 1250      | 36                                 | 100-50                |
| MYCOM 3   | 75                   | N6WA      | 1250      | 53                                 | 100-66-33             |
| MYCOM 4   | 60                   | N6WA      | 1250      | 53                                 | 100-66-33             |

**2.2.2 Condensador evaporativo.** Actualmente la planta cuenta con una torre evaporativa de la marca Mayekawa (Torre Baltimore). La torre instalada es de tiro inducido y su capacidad es de 914 KW o 260 TR. La función de esta torre es retirar el calor sensible y latente del refrigerante a presión constante de forma que cambie su estado de gas a líquido, para luego descender al tanque receptor de amoníaco. Sobre la tubería del refrigerante fluye agua a temperatura ambiente la cual enfría paulatinamente el refrigerante. El agua está en continua recirculación dentro de la torre.

**2.2.3 Tanque receptor de amoníaco.** El amoníaco al salir de la torre condensadora permanece en estado de líquido saturado a alta presión, el amoníaco llega al tanque receptor de amoníaco y este desde ahí se distribuye hacia los bancos de hielo. La capacidad de almacenamiento de este tanque es de 3.820 litros. De esta capacidad cerca de la tercera parte del líquido siempre se queda en el tanque y el resto se encuentra en las tuberías del ciclo de refrigeración como líquido o vapor.

**2.2.4 Evaporador.** La planta cuenta con tres Bancos de hielo, dos de los cuales están en continua operación y uno deshabilitado. Los bancos que están en funcionamiento se encuentran conectados en paralelo al sistema de refrigeración por amoníaco y son los bancos de hielo 1 y 2 de  $45 m^3$  y  $50 m^3$  respectivamente. El banco de hielo 3 no está en funcionamiento actualmente ya que el requerimiento

de agua fría ha disminuido con la salida de línea de un esterilizador por temas económicos. El serpentín que está en los bancos de hielo en tubería de diámetro de 1 ¼ pulgada de acero al carbón cedula número 40.

Los bancos en una operación estable podrían generar 1.200 Kg de hielo sobre la superficie del evaporador en 12 horas de carga, trabajando con 3 compresores y sin extraer agua para proceso. Esto no se cumple debido a la constante demanda de agua fría que requiere la planta. Generalmente para suplir la demanda de agua fría en la planta se tienen encendidos 2 de los cuatro compresores 24 horas continuas.

Sobre cada banco de hielo existe un agitador el cual se encarga de generar un movimiento turbulento en el agua, para hacer continua y constante la temperatura de toda el agua del banco de hielo.

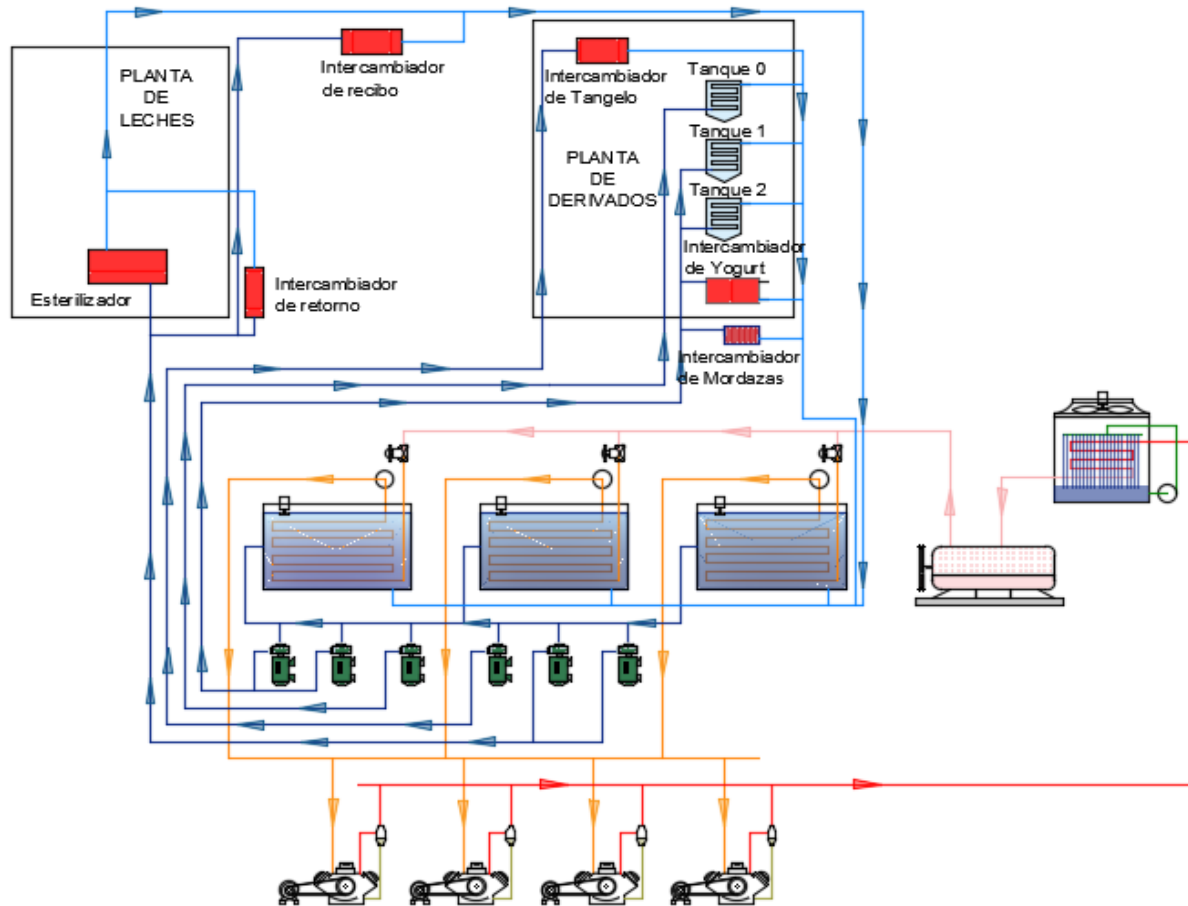
La función principal del banco de hielo es suplir de agua fría a los procesos que lo requieran, para ello se adicionan a los bancos de hielo un sistema de distribución de agua fría que circula por toda la planta y que va a todos los procesos intercambiando calor con los productos.

**Tabla 3.** Características Bancos de Hielo

| <b>Banco</b>     | <b>Tipo</b>         | <b>Capacidad de refrigeración [TR]</b> | <b>Capacidad volumétrica [m<sup>3</sup>]</b> |
|------------------|---------------------|--|--|
| Banco de hielo 1 | Evaporador Inundado | 46                                     | 45   |
| Banco de hielo 2 | Evaporador Inundado | 46                                     | 45   |
| Banco de hielo 3 | Evaporador Inundado | 46                                     | 50   |

## 2.3 SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA FRÍA

Figura 10. Sistema de Tuberías.



El sistema de distribución es el encargado de transportar el agua fría desde los bancos de hielos a cada área y proceso de la planta que requiera del fluido refrigerado, lo hace a través de tuberías de acero inoxidable.

El sistema de distribución cuenta con líneas de tuberías independientes según el sector a la que se dirija, estas líneas son:

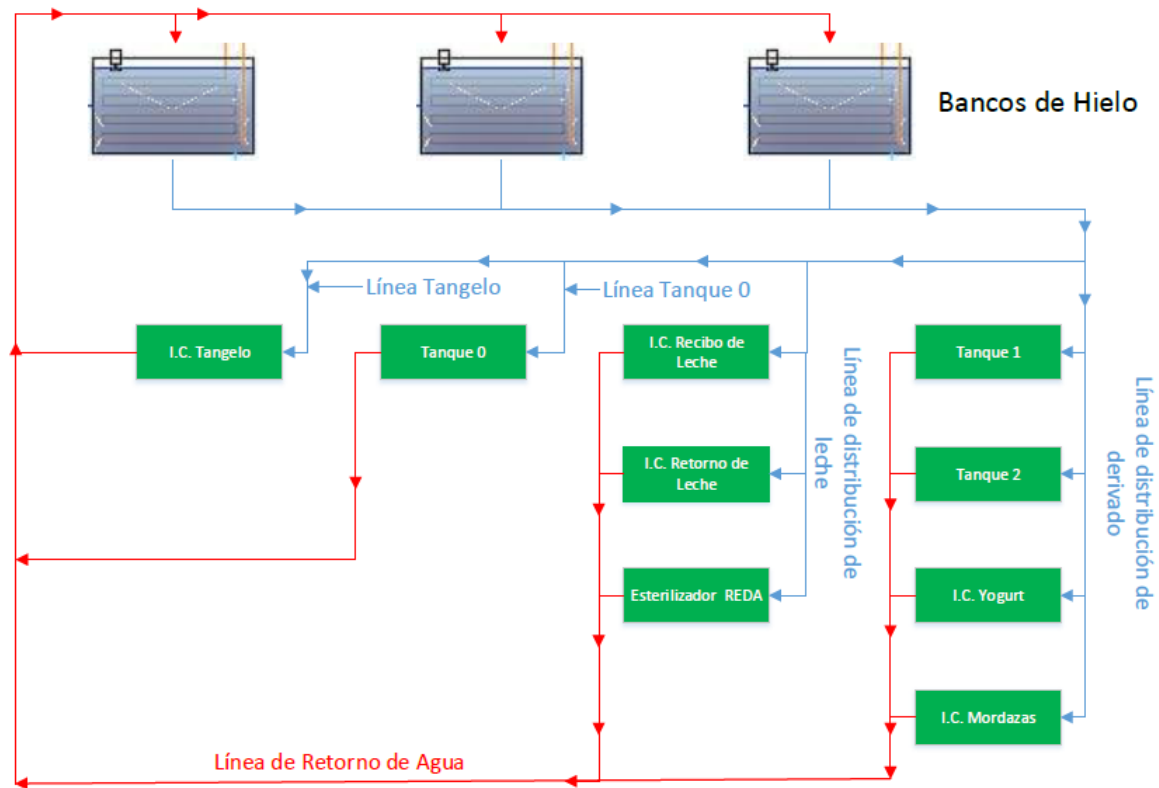
- Línea de distribución para área de Derivados.
- Línea de distribución para área de Leche.
- Línea de distribución para Tanque 0 de Yogurt.
- Línea de distribución para intercambiador de Tangelo.

Cada línea se encarga de la distribución de agua fría en distintos procesos, a continuación, se presenta los procesos a los que cada línea distribuyen agua fría.

**Tabla 4.** Especificación de cada línea de agua fría.

| <b>Línea de derivados</b>  | <b>Línea de Leche</b>              | <b>Línea de Tanque 0</b> | <b>Línea de Tangelo</b>   |
|----------------------------|------------------------------------|--------------------------|---------------------------|
| Intercambiador de Yogurt   | Intercambiador de recibo de leche  | Tanque 0                 | Intercambiador de Tangelo |
| Intercambiador de Mordazas | Intercambiador de retorno de leche |                          |                           |
| Tanque 1                   | Esterilizador REDA                 |                          |                           |
| Taque 2                    |                                    |                          |                           |

**Figura 11.** Esquematización de cada línea



Cada línea cuenta con un sistema de bombeo de una o dos bombas según requiera el sistema, las líneas de derivados y leches son las líneas que cuentan con dos bombas, una principal y una auxiliar, las demás líneas solo cuentan con una bomba.

**2.3.1 Sistema de bombeo.** Las bombas hidráulicas son dispositivos encargadas de transferir energía a la corriente del fluido impulsándolo, energía obtenida a base de un motor primario (motor eléctrico, motor de combustión interna, Diésel)

Las bombas se clasifican en dos categorías, bombas hidrodinámicas o de desplazamiento no positivo y bombas hidrostáticas o de desplazamiento positivo. Las bombas hidrodinámicas o de desplazamiento no positivo son las utilizadas para mover grandes caudales a bajas presiones mientras las bombas hidrostáticas o de desplazamiento positivo se encargan de ejercer grandes presiones en caudales

pequeños que se requieren normalmente en máquinas hidráulicas a base de aceites.

Las bombas cumplen con la función de impulsar el líquido frío a través de la tubería hasta los distintos intercambiadores dispuestos en la planta, a mayor caudal en los intercambiadores se logra una mayor disminución de la temperatura en los productos. Para transportar el agua fría desde el banco de hielo hasta los procesos se tienen instaladas bombas centrífugas.

El desplazamiento o caudal de las bombas depende de la curva de la bomba y la presión de trabajo, en su mayoría la bomba para la distribución del líquido frío de la planta pertenecen a la marca IHM.

Para obtener las curvas de la bomba normalmente se realiza con la referencia de la misma, sin embargo, en la planta se desconoce tal información, por ello se recurre a la obtención de las referencias a base de las características de las bombas, tales características son: diámetros de succión y descarga, diámetro del alabe y potencia del motor.

Tras un levantamiento de información de las bombas se obtuvieron los datos necesarios para determinar el modelo de cada una

**Tabla 5.** Características de las bombas

| <b>Nombre de la bomba</b> | <b>Ø succión (ln)</b> | <b>Ø descarga (ln)</b> | <b>Ø alabe (mm)</b> | <b>Potencia (Hp)</b> | <b>Modelo</b>         |
|---------------------------|-----------------------|------------------------|---------------------|----------------------|-----------------------|
| Bomba Principal Leche     | 3                     | 3                      | 208                 | 15                   | <b>30A-15W IHM</b>    |
| Bomba Auxiliar Leche      | 3                     | 3                      | 190                 | 10                   | <b>30A-10TW IHM</b>   |
| Bomba Principal derivados | 2                     | 2                      | 195                 | 7,5                  | <b>20H-7.5TW IHM</b>  |
| Bomba auxiliar derivados  | 2                     | 2                      | 180                 | 6                    | <b>20H-6W IHM</b>     |
| Bomba Tanque 0            | 2                     | 2                      | 180                 | 6                    | <b>20H-6W IHM</b>     |
| Bomba Tangelo             | 3                     | 3                      | 139,7               | 6,6                  | <b>AE 3 66 Barnes</b> |

### 3. CÁLCULO DE LAS CARGAS TÉRMICAS ACTUALES DE LOS PROCESOS POR HORAS

La obtención de las cargas térmicas de los procesos es indispensable para determinar cuál es el funcionamiento actual del sistema de refrigeración, estimar la capacidad de los bancos de hielo, determinar las horas de mayor consumo del sistema de refrigeración y las de menor consumo permitiendo hacer una idea de mejoramiento del sistema.

El procedimiento para la obtención de las cargas térmicas actuales de los procesos por horas será el siguiente:

3.1 Obtención de los flujos máxicos de las bombas

3.2 Obtención de temperaturas superficiales de tubos a la salida y entrada de los intercambiadores

3.3 análisis de transferencia de calor para obtener temperaturas internas de tubos

3.4 obtención de cargas térmicas por horas

#### 3.1 OBTENCIÓN DE LOS FLUJOS MÁXICOS DE LAS BOMBAS

A partir del modelo de la bomba se obtienen las curvas de rendimiento, estas nos determinan el caudal a partir de la altura dinámica total de bombeo (A.D.T).

La expresión para el cálculo de A.D.T proviene de la ecuación de Bernoulli y deriva en la siguiente expresión:

$$ADT = h + \Sigma hf + \frac{V}{2g} + hr$$

Donde:

$h$  = Altura geométrica entre el nivel inferior y el superior del líquido. (mca)

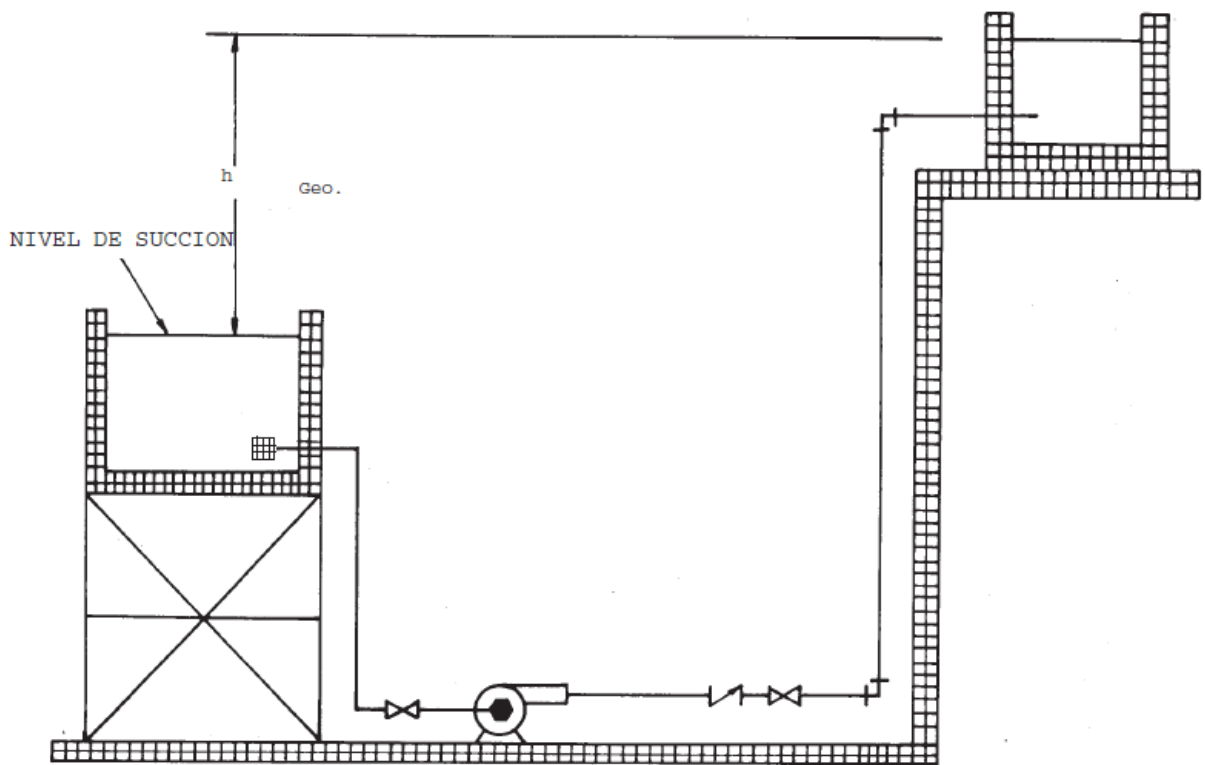
$\Sigma hf$  = La sumatorio de todas las pérdidas que sufre el fluido entre el nivel de succión y descarga. (m)

$\frac{v^2}{2g}$  = Energía cinética o presión dinámica (m)

$hr$  = Es la presión residual que debe vencer la bomba cuando el fluido llegue a su destino o punto más desfavorable. (m)

La instalación de la planta se conforma mediante el siguiente esquema, se trata de una succión positiva y la altura geométrica que la bomba debe vencer es menor

**Figura 12.** Esquema de bombeo de la planta



Fuente: <http://oa.upm.es/6531/1/amd-apuntes-fluidos.pdf>

Para este caso el ADT será:

$$ADT = (hd - hs) + hfs + hfd + \frac{Vd^2}{2g} + hrs - hrd$$

Donde:

$hd$  = Altura de descarga ( $m$ )

$hs$  = Altura de succión ( $m$ )

$hfs$  = Caída de presión por pérdidas en el tramo de succión ( $m$ )

$hfd$  = Caída de presión por pérdidas en el tramo de descarga ( $m$ )

$Vd$  = Velocidad media de la corriente. ( $m/s$ )

$g$  = Aceleración de la gravedad. ( $m/s^2$ )

$hrs$  = Presión tanque de succión ( $Pa$ )

$hrd$  = Presión tanque de descarga ( $Pa$ )

Debido a que las líneas de retorno llegan al mismo tanque del que se extrae el líquido frío y que tal tanque está abierto a la atmósfera, las presiones residuales  $hrs$  y  $hrd$  se eliminan.

La altura de descarga puede ser determinada a con la presión de salida de la bomba a partir de la siguiente expresión:

$$hd = \frac{P_{abs}}{\rho_{agua} g}$$

Donde:

$hd$  = Altura de descarga ( $m$ )

$P_{abs}$  = Presión de salida de la bomba ( $Pa$ )

$\rho_{agua}$  = Densidad del agua ( $1.000 \text{ Kg}/m^3$ )

$g$  = Aceleración de la gravedad ( $9,81 \text{ m}/s^2$ )

Para la obtención de la presión dinámica se utiliza la siguiente expresión:

$$Vd = \frac{Q}{A_{Tub}}$$

Donde:

$Vd$  = Velocidad del fluido ( $m^2/h$ )

$Q$  = Caudal pasante ( $m^3/h$ )

$A_{Tub}$  = Área de la sección transversal del tubo ( $m^2$ )

Para hallar el caudal en la curva de rendimiento se requiere el ADT y para obtener el ADT se necesita el caudal en cierta sección de tubería, sin embargo, no contamos con medidor de caudal en ninguna instancia de tubería, por ello se realiza la parametrización de la curva de rendimiento de las bombas dejando en términos del ADT y caudal, se ingresa al software EES la parametrización junto con la ecuación del ADT reemplazando los datos del sistema, así solo tendríamos 2 ecuaciones con 2 incógnitas de fácil solución.

**Tabla 6.**Datos de trabajo de las bombas

|                                  | <b>Presión manométrica salida (PSI)</b> | <b>Altura succión (m)</b> | <b>Perdidas tramo descarga (m)</b> | <b>Perdidas tramo succión (m)</b> |
|----------------------------------|---|---------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| <b>Bomba Principal Leche</b>     | 95                                      | 3                         | 7                                  | 4                                 |
| <b>Bomba Auxiliar Leche</b>      | 75                                      | 3                         | 7                                  | 4                                 |
| <b>Bomba Principal derivados</b> | 74                                      | 3                         | 7                                  | 4                                 |
| <b>Bomba auxiliar derivados</b>  | 74                                      | 3                         | 7                                  | 4                                 |
| <b>Bomba Tanque 0</b>            | 75                                      | 3                         | 7                                  | 4                                 |
| <b>Bomba Tangelo</b>             | 28                                      | 3                         | 5                                  | 5                                 |

Los manómetros son instrumentos de medida de presión de fluidos, estos miden la diferencia entre la presión real o absoluta y la presión atmosférica.

$$P_{abs} = P_{man} + P_{atm}$$

Donde:

$P_{abs}$  = Presión real o absoluta. ( $Pa$ )

$P_{man}$  = Presión medida por el manómetro ( $Pa$ )

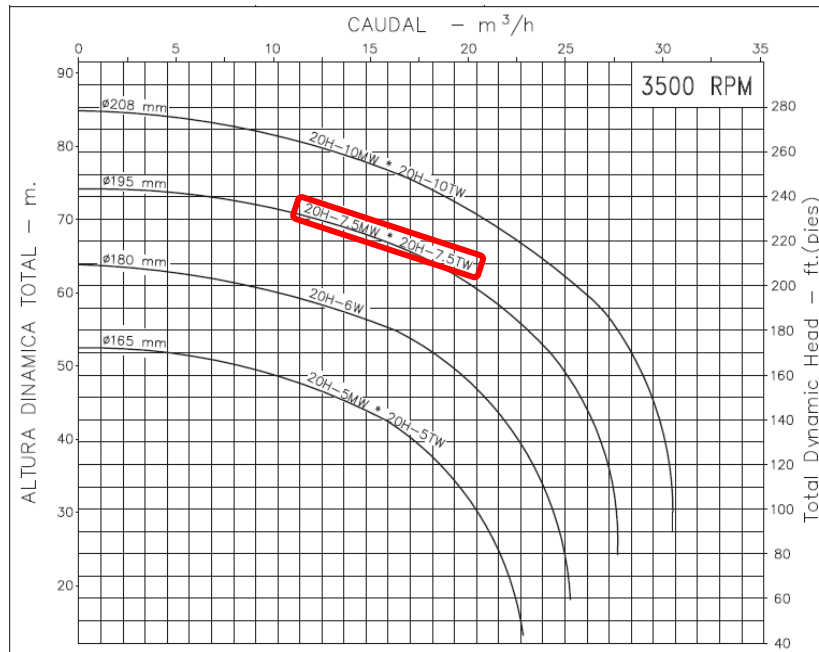
$P_{atm}$  = Presión atmosférica (101325  $Pa$ )

Dados los datos anteriores y expresiones ya se es posible determinar los caudales de las bombas de la planta, a continuación, se ejemplificará con una bomba.

**3.1.1 Ejemplificación de obtención de caudal de la bomba principal de derivados.** A partir del modelo que se encuentra en la tabla No 5, se consulta con la marca la curva de rendimiento de la bomba.

Modelo: **20H-7.5TW IHM**

**Figura 13.** Curva de rendimiento bomba principal de derivados



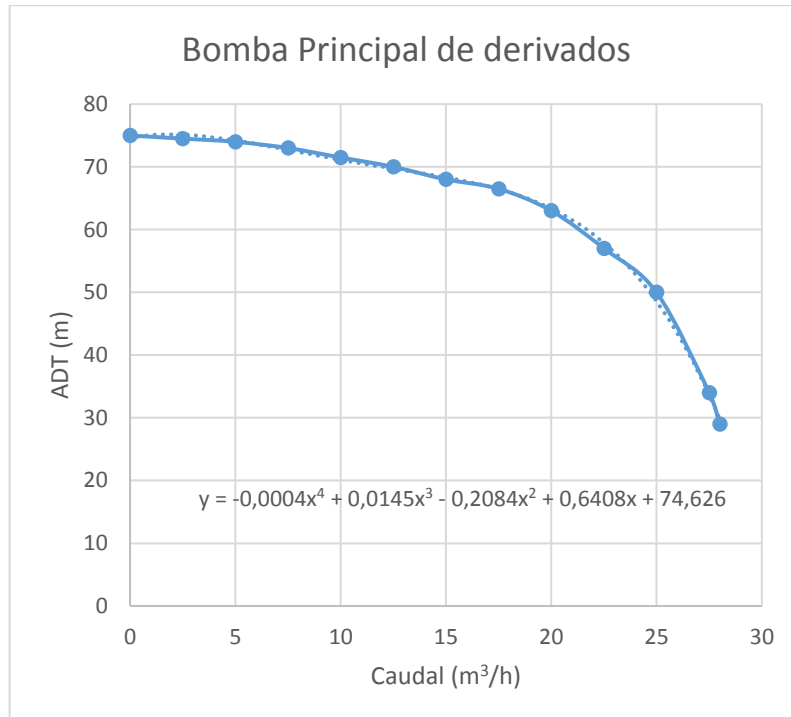
Fuente: <http://www.igihm.com/>

A partir de puntos tomados de la curva perteneciente a la bomba, se gráfica para lograr su respectiva parametrización.

**Tabla 7.** Puntos de parametrización de la bomba principal de derivados

| <b>Bomba Principal de Derivados</b> |                            |
|-------------------------------------|----------------------------|
| <b>ADT (m)</b>                      | <b>Q (m<sup>3</sup>/h)</b> |
| 75                                  | 0                          |
| 74,5                                | 2,5                        |
| 74                                  | 5                          |
| 73                                  | 7,5                        |
| 71,5                                | 10                         |
| 70                                  | 12,5                       |
| 68                                  | 15                         |
| 66,5                                | 17,5                       |
| 63                                  | 20                         |
| 57                                  | 22,5                       |
| 50                                  | 25                         |
| 34                                  | 27,5                       |
| 29                                  | 28                         |

**Figura 14.** Parametrización de la bomba principal de derivados



La ecuación de la curva de eficiencia de la bomba es:

$$ADT = -0,0004Qs^4 + 0,0145Qs^3 - 0,2084Qs^2 + 0,6408Qs + 74,626$$

Con  $ADT$  en metros y  $Qs$  en  $m^3/h$

A partir de los datos de trabajo de la bomba que se encuentran en la tabla No 4 se consigue el  $ADT$  reemplazando en la siguiente expresión:

$$ADT = (hd - hs) + hfs + hfd + \frac{Vd^2}{2g} + hrs - hrd$$

Donde:

$$hs = 3 [m]$$

$$hfs = 4 [m]$$

$$hfd = 7 [m]$$

$$hrs = 101325 [Pa]$$

$$hrd = 101325 [Pa]$$

$$g = 9,81 [m/s^2]$$

$$\rho_{agua} = 1000 [Kg/m^3]$$

$$Vd = \frac{Qs}{A_{Tub}}$$

$$A_{Tub} = \frac{\pi}{4} D^2_{salida} = \frac{\pi}{4} (2 [in] \frac{0,0254 [m]}{1 [in]})^2 = 0,03989 [m^2]$$

$$P_{abs} = P_{man} + P_{atm} = \left( 74 [Psi] \frac{6894,76 [Pa]}{1 [Psi]} \right) + 101325 [Pa] = 611537,24 [Pa]$$

$$hd = \frac{P_{abs}}{\rho_{agua} g} = \frac{611537,24 [Pa]}{1000 \left[ \frac{Kg}{m^3} \right] 9,81 \left[ \frac{m}{s^2} \right]} = 62,3381 [m]$$

Dejando la expresión en términos de  $Qs$  y  $ADT$ :

$$ADT = (62,3381 [m] - 3 [m]) + 4 [m] + 7 [m] + \left( \frac{Qs}{0,03989 [m^2]} \right)^2 / 2(9,81) \left[ \frac{m}{s^2} \right]$$

$$+ 101325 [Pa] - 101325 [Pa]$$

$$ADT = 69,381 [m] + \left( \frac{Qs}{0,03989 [m^2]} \right)^2 / 2(9,81) \left[ \frac{m}{s^2} \right]$$

A partir de la expresión anterior y la parametrización de la curva de rendimiento de la bomba se obtiene el  $Qs$  y el  $ADT$ .

$$Q_s = 17,98 \left[ \frac{m^3}{h} \right] \quad ADT = 61,26 [m]$$

Repitiendo el procedimiento anterior con las demás bombas se obtienen los caudales respectivos

**Tabla 8.** Caudales de bombas de la planta

|                           | Caudal (m <sup>3</sup> /h) |
|---------------------------|----------------------------|
| Bomba Principal Leche     | 32,04                      |
| Bomba Auxiliar Leche      | 20,87                      |
| Bomba Principal derivados | 17,98                      |
| Bomba Auxiliar derivados  | 8,034                      |
| Bomba Tanque 0            | 6,83                       |
| Bomba Tangelo             | 5,179                      |

Para hallar el flujo másico a partir del caudal se utiliza la siguiente expresión:

$$\dot{m} = \dot{Q} \rho$$

Donde:

$$\dot{m} = \text{Flujo másico} \left( \frac{Kg}{h} \right)$$

$$Q = \text{Flujo volumétrico} \left( \frac{m^3}{h} \right)$$

$$\rho = \text{densidad de la sustancia} \left( \frac{Kg}{m^3} \right)$$

La densidad la del agua es:  $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$

Con la anterior expresión y los flujos volumétricos de las bombas se obtienen los flujos másicos de cada bomba.

**Tabla 9.** Flujo Másico de las Bombas

|                           | <b>Flujo másico<br/>(Kg/h)</b> |
|---------------------------|--------------------------------|
| Bomba Principal Leche     | 39417                          |
| Bomba Auxiliar Leche      | 23054                          |
| Bomba Principal derivados | 18443                          |
| Bomba Auxiliar derivados  | 9947                           |
| Bomba Tanque 0            | 16343                          |
| Bomba Tangelo             | 5141                           |

### **3.2 OBTENCIÓN DE TEMPERATURAS SUPERFICIALES DE TUBOS A LA SALIDA Y ENTRADA DE LOS INTERCAMBIADORES**

Para obtener el valor de la temperatura es necesario apoyarse en elementos externos debido a la falta de termómetros en las líneas de distribución de agua fría, los elementos externos utilizados fueron:

- Medidor de temperatura y humedad con termocupla.

**Figura 15.** Termómetro Digital



Fuente: [https://www.aliexpress.com/store/product/New-Indoor-Outdoor-LCD-Digital-Solar-Temperature-Meter-Humidity-Thermometer-Time-Clock-with-Outdoor-Temperature-Sensor/2027093\\_32705391786.html](https://www.aliexpress.com/store/product/New-Indoor-Outdoor-LCD-Digital-Solar-Temperature-Meter-Humidity-Thermometer-Time-Clock-with-Outdoor-Temperature-Sensor/2027093_32705391786.html)

Gama de temperatura interior: 0 ~ 50C (32F ~ 122F)

Gama de temperatura al aire libre: -40 ~ 70C (-40F ~ -158F)

Rango de medición de la humedad: 10% RH ~ 99% RH

Resolución: 0.1C / 0.1F; 1% de HR

Precisión: Temperatura:  $\pm 1C / 2F$ ; Humedad:  $\pm 5\%$

Tiempo: 12/24

Peso: 190 g

Sensor de temperatura exterior: 150mm

- Termómetro de infrarrojo Fluke 62 MAX+

**Figura 16.** Termómetro infrarrojo Fluke 62



Fuente: [http://www.fluke.com/fluke/coes/termometros/termometros-por-infrarrojos/fluke-62 max+.htm?pid=74272](http://www.fluke.com/fluke/coes/termometros/termometros-por-infrarrojos/fluke-62%20max+.htm?pid=74272)

Rango de temperatura: De -30 a 650 °C (de -22 a 1202 °F)

Precisión:  $\pm 1,0\text{ °C}$  o  $\pm 1,0\%$  de la lectura, el valor más alto

-10 °C a 0 °C:  $\pm 2,0$

-30 °C a -10 °C:  $\pm 3,0$

Tiempo de respuesta (95%): <300 ms (95% de la lectura)

Respuesta espectral: De 8 a 14 micrones

Emisividad: 0,10 a 1.00

Resolución óptica: 12:1 (calculado al 90% de energía)

Resolución de la pantalla: 0.1 °C (0.2 °F)

Respetabilidad de las lecturas:  $\pm 0,5\%$  de la lectura o  $< \pm 0,5$  °C (1 °F), el valor más alto.

Ya con las herramientas identificadas se procede al análisis en cada una de las tuberías e intercambiadores seleccionados con el fin de determinar las temperaturas. Se deben repetir varias veces la toma de medidas con el fin de reducir el error en los datos.

**Tabla 10.** Temperaturas superficiales.

|                   | Área de Derivados |             |          |          |          |               | Área de Leche        |                       |                    |
|-------------------|-------------------|-------------|----------|----------|----------|---------------|----------------------|-----------------------|--------------------|
|                   | I.C. Tangelo      | I.C. Yogurt | Tanque 2 | Tanque 1 | Tanque 0 | I.C. Mordazas | I.C. Recibo de Leche | I.C. Retorno de Leche | Esterilizador REDA |
| Agua Entrada (°C) | 4,1               | 4           | 4,1      | 4,1      | 4,1      | 4,1           | 3,4                  | 3,4                   | 3,4                |
| Agua Salida (°C)  | 8,9               | 9,8         | 8,9      | 8,9      | 8,9      | 7             | 6,8                  | 6                     | 11,9               |

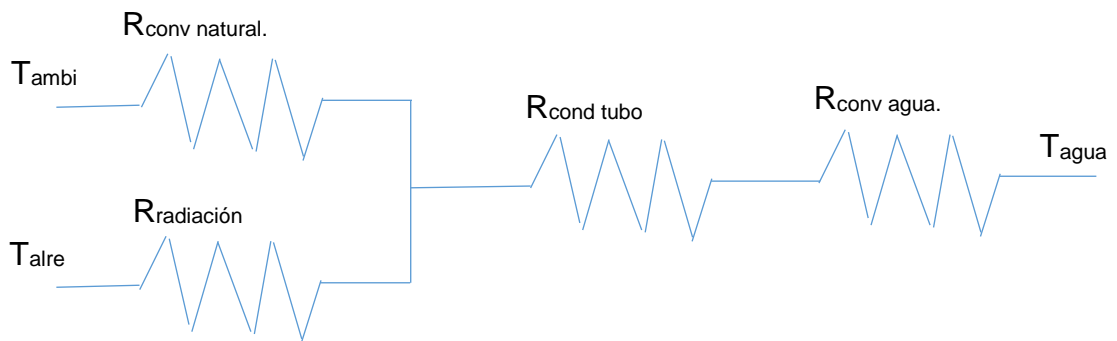
Debido a que las herramientas de medición de las temperaturas son externos, las temperaturas medidas son externas de la tubería. Para un mejor análisis se requiere de la temperatura interna del tubo la cual se obtiene a partir de datos del ambiente, la tubería y las expresiones de transferencia de calor.

### 3.3 ANÁLISIS DE TRANSFERENCIA DE CALOR PARA OBTENER TEMPERATURAS INTERNAS DE TUBOS

Externamente el tubo tendrá una ganancia de temperatura debido a 2 tipos de transferencia: radiación y convección natural.

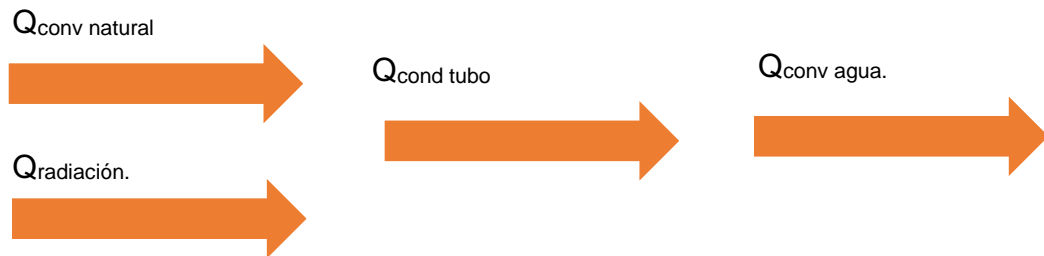
Con la transferencia externa del tubo (Transferencia por radiación y por convección natural) la cual debe ser igual a la transferencia por conducción del tubo, y este a su vez igual a la convección interna del tubo (como se muestra en el siguiente diagrama) se puede obtener la temperatura interna del agua.

**Figura 17.** Diagrama de Resistencias de Transferencia de calor.



A partir de las leyes de la termodinámica en donde se expone que la energía no se destruye, se transforma, se puede concluir que la transferencia de calor en la tubería se comporta de la siguiente manera:

**Figura 18.** Diagrama de flujos de Transferencia de calor.



La siguiente expresión sintetiza matemáticamente la figura 22:

$$Q_{conv\ natural} + Q_{radiacion} = Q_{Cond\ tubo} = Q_{Conv\ agua}$$

El análisis se realiza para una sección de un metro que se aproxima al área de toma de datos y minimiza los errores posibles, las temperaturas superficiales del tubo se encuentran en la tabla No 10.

Para realizar el análisis se requiere de datos ambientales como: temperatura ambiente, presión ambiente, diámetro de la tubería, Material de la tubería, etc.

Para el análisis se toman las tuberías de acero inoxidable, de 1 ½ pulgadas de diámetro nominal y cedula 40 con una emisividad aproximada de 0,1, un diámetro externo de 48,3 mm y un espesor de 3,68 mm<sup>7</sup>. La temperatura del ambiente y de alrededores se toma de 30 °C.<sup>8</sup>

La radiación se basa en la siguiente expresión:

$$Q_{rad} = \varepsilon_{mat} A_{sup} \sigma (T_{sup}^4 - T_{amb}^4)$$

Donde:

$Q_{rad}$  = Calor transferido por radiación (W)

$\varepsilon_{mat}$  = Emisividad del material.

$A_{sup}$  = Área superficial (m<sup>2</sup>)

$\sigma$  = Constante de Boltzmann ( $5,67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2} K^4$ )

$T_{sup}$  = Temperatura superficial (K)

$T_{amb}$  = Temperatura del ambiente (K)

---

<sup>7</sup> GRUPO ALMESA. Catálogo Técnico. España. 2015

<sup>8</sup> Temperatura registrada en la toma de medidas.

El análisis de convección natural se realiza a partir de un cilindro horizontal debido a que en la mayoría de la planta y en las secciones de toma de temperaturas la tubería se encuentra horizontalmente.

$$Q_{conv\ natur} = h A_{sup}(T_{sup} - T_{amb})$$

Donde:

$Q_{conv\ natur}$  = Calor transferido por convección natural (W)

$h$  = Coeficiente de convección ( $\frac{W}{m^2} \text{ } ^\circ C$ )

$A_{sup}$  = Área superficial ( $m^2$ )

$T_{sup}$  = Temperatura superficial (K)

$T_{amb}$  = Temperatura del ambiente (K)

Para hallar el coeficiente de convección se utiliza el número promedio de Nusselt ( $Nu$ ), para convección natural se obtiene bajo la siguiente expresión:

$$Nu = \frac{hD}{K} = \left\{ 0,6 + \frac{0,387 Ra_D^{\frac{1}{6}}}{\left[ 1 + (0,559/Pr)^{\frac{1}{4}} \right]^{\frac{1}{9}}} \right\}^2$$

Donde:

$h$  = Coeficiente de convección (W/m)

$L$  = Longitud (m)

$K$  = Coeficiente de conducción [ $\frac{W}{m} K$ ]

$Ra_D$  = Número de Rayleigh.

$Pr$  = Numero de Prandtl.

Para hallar el número de Rayleigh se requiere de la siguiente expresión:

$$Ra_D = \frac{(g\beta(T_{sup} - T_{amb})D^3)}{\nu^2} Pr$$

Donde:

$g$  = Aceleración de la gravedad. 9,81 ( $m/s^2$ )

$\beta$  = coeficiente de expansión volumétrica. (1/K)

$T_{sup}$  = Temperatura de la superficie (°C)

$T_{amb}$  = Temperatura del ambiente (°C)

$D$  = Diámetro tubo. (m)

$\nu$  = Viscosidad cinemática del fluido ( $m^2/s$ )

$Pr$  = Numero de Prandtl

La transferencia por conducción en tubos responde a la siguiente ecuación:

$$Q_{Cond\ tubo} = \frac{2 \pi k L (T_{int} - T_{ext})}{\ln(D_{ext} - D_{int})}$$

Donde:

$K$  = conductividad térmica del material (acero inoxidable:13,4 [ $w/m * K$  ] )

$L$  = Longitud del análisis (1 m)

$T_{int}$  = Temperatura interna del tubo (°C)

$T_{ext}$  = Temperatura externa del tubo (°C)

$D_{ext}$  = Diámetro externo del tubo (m)

$D_{int}$  = Diámetro interno del tubo (m)

La convección interna forzada de un tubo se calcula con la siguiente expresión:

$$Q_{conv\ agua} = h_{agua} A_{supint} (T_{agua} - T_{int})$$

Donde:

$h_{agua}$  = Coeficiente de convección del agua [ $w/m^2 \text{ } ^\circ C$ ]

$A_{supint}$  = Área superficial interna del tubo [ $m^2$ ]

$T_{agua}$  = Temperatura del agua [ $^\circ C$ ]

$T_{int}$  = Temperatura interna del tubo [ $^\circ C$ ]

Para obtener el coeficiente de convección se requiere obtener el número de Nusselt, el número de Nusselt dependerá de si el flujo del agua dentro del tubo se comporta de manera turbulenta o laminar.

Para flujos internos en cilindros, que es el caso, si el número de Reynolds es superior a 2300 se determina que el flujo se comporta de forma turbulenta de lo contrario será un flujo laminar.

Para determinar el Reynolds se utiliza la siguiente expresión:

$$Re_{agua} = \frac{V_{agua} D_{int}}{\nu_{agua}}$$

Donde:

$V_{agua}$  = Velocidad del agua promedio (m/s)

$D_{int}$  = Diámetro interno de la tubería (m)

$\nu_{agua}$  = Viscosidad cinemática (m<sup>2</sup>/s)

El diámetro interno y la viscosidad cinemática son características de la infraestructura y del agua respectivamente, en cuyo caso:

$$D_{int} = 0,04462 [m]$$

$$\nu_{agua} = 1,3 \times 10^{-6} [m^2/s]$$

Por efectos prácticos la velocidad del agua se toma de un flujo volumétrico aproximado de  $10 \left[ \frac{m^3}{h} \right]$

Con el flujo y el área del tubo se encuentra la velocidad del agua es:

$$V_{agua} = \dot{Q}/A = 1,776 [m/s]$$

Con esto obtenemos un Reynolds en la tubería de:

$$Re_{agua} = \frac{V_{agua} D_{int}}{\nu_{agua}} = 60258$$

Debido a que el Reynolds supera los 2300 se determina como flujo turbulento el agua que transita en las tuberías.

El Nusselt para un flujo turbulento en un recinto cilíndrico liso se expresa:

$$Nu = 0,125 f Re Pr^{1/3}$$

Donde:

$f$  = Factor de fricción.

$Re$  = Numero de Reynolds

$Pr$  = Numero de Prandtl.

El factor de fricción para tubos lisos se expresa y puede ser hallada a partir del número de Reynolds, en la tubería de la planta es:

$$f = (0,790 \ln Re - 1,64)^{-2} = (0,790 \ln(60258) - 1,64)^{-2} = 0,02009$$

**Tabla 11.** Tabla de datos ambientales y estructurales

| Datos del ambiente |                                      | Datos estructurales     |           |
|--------------------|--------------------------------------|-------------------------|-----------|
| $T_{amb}$          | 30 °C                                | $\varnothing_{nominal}$ | 1 ½ Pulg. |
| $T_{alr}$          | 30 °C                                | Célula                  | 40        |
| $V_{aire}$         | $1,516 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ | $\varnothing_{externo}$ | 48,3 mm   |
| $K_{aire}$         | 0,04371 W/m °C                       | Espesor                 | 3,68 mm   |
| $Pr_{aire}$        | 0,6939                               | Longitud                | 1 m       |
| $V_{agua}$         | $1,3 \times 10^{-6} \text{ m/s}^2$   |                         |           |
| $K_{agua}$         | 0,565 W/m °C                         |                         |           |
| $Pr_{agua}$        | 9,714                                |                         |           |
| $G$                | 9,81 m/s <sup>2</sup>                |                         |           |

**3.3.1 Ejemplo análisis de transferencia de calor para temperatura de salida del intercambiador de Yogurt.** Las temperaturas superficiales son las obtenidas en la tabla No. 10, a partir de ellas y los datos de la estructura y el ambiente se obtiene la transferencia por radiación:

$$Q_{rad} = \varepsilon_{mat} A_{sup} \sigma (T_{sup}^4 - T_{amb}^4)$$

Donde

$$\varepsilon_{mat} = 0,1$$

$$A_{sup} = \pi D_{ext}L = \pi(0,0483 [m])(1 [m]) = 0,1517 [m^2]$$

$$\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \left[ \frac{W}{m^2 K^4} \right]$$

$$T_{sup} = T_{outyog} = 9,8 + 273 = 282,8 [K]$$

$$T_{amb} = 30 + 273 = 303 [K]$$

Entonces:

$$\begin{aligned} Q_{rad} &= 0,1(0,1517 [m^2])(5,67 \times 10^{-8} \left[ \frac{W}{m^2 K^4} \right])((282,8 [K])^4 - (303 [K])^4) \\ &= -1,749 [W] \end{aligned}$$

Para obtener la convección natural se requiere el número de Rayleigh

$$Ra_D = \frac{(g\beta(T_{sup} - T_{amb})D^3)}{\nu^2} Pr_{aire}$$

Donde:

$$\nu = 1,516 \times 10^{-5} (m^2/s)$$

$$\beta = \frac{1}{T_f} = \frac{1}{(T_{amb} + T_{sup})/2} = 0,00341 (1/k)$$

$$T_{sup} = T_{outyog} = 9,8 + 273 = 282,8 K$$

$$T_{amb} = 30 + 273 = 303 K$$

$$Pr_{aire} = 0,6939$$

$$Ra_D = \frac{(9,81 \left[ \frac{m}{s^2} \right] 0,00341 \left[ \frac{1}{k} \right] (303 [K] - 282,8 [K]) 0,0483^3 [m])}{(1,516 \times 10^{-5})^2 [m^2/s]} \times 0,6939 = 230171$$

Después de obtenido el  $Ra_D$  ya se cuenta con los datos necesarios para obtener el Nusselt

$$Nu = \left\{ 0,6 + \frac{0,387 Ra_D^{\frac{1}{6}}}{[1 + (0,559/Pr)^{\frac{1}{4}}]^{\frac{4}{9}}} \right\}^2 = \left\{ 0,6 + \frac{0,387(230171)^{\frac{1}{6}}}{[1 + (\frac{0,559}{0,6939})^{\frac{1}{4}}]^{\frac{4}{9}}} \right\}^2 = 9,676$$

Una vez calculado el valor del Nusselt, se puede obtener el coeficiente de convección.

$$Nu = \frac{hL}{K} = \frac{h * 0,0483 [m]}{0,04371 [W/m \text{ } ^\circ C]} = 9,676$$

$$h = 8,762 \left[ \frac{W}{m} \text{ } ^\circ C \right]$$

Con el coeficiente de convección se puede hallar el valor de la transferencia por convección natural.

$$Q_{conv \text{ natur}} = h A_{sup} (T_{sup} - T_{amb}) = 8,762 \left[ \frac{W}{m} \text{ } ^\circ C \right] 0,1517 [m^2] (9,8 [K] - 30 [k])$$

$$Q_{conv \text{ natur}} = -26,86 [w]$$

A partir de la expresión anterior se procede a hallar la transferencia de calor por convección natural. Se sigue el análisis de la temperatura de salida del agua del intercambiador de yogurt.

Los datos del aire son:

$$\nu = 1,516 \times 10^{-5} \text{ (m}^2/\text{s)}$$

Para la obtención de  $\beta$  se toma el aire como gas ideal y partir de esta afirmación, se utiliza la siguiente expresión:

$$\beta = \frac{1}{T_f} = \frac{1}{(T_{amb} + T_{sup})/2} \left( \frac{1}{K} \right)$$

Se toma como temperatura superficial y ambiental las utilizadas en el análisis de transferencia por radiación.

$$T_{sup} = T_{outyog} = 9,8 + 273 = 282,8 K$$

$$T_{amb} = 30 + 273 = 303 K$$

A partir de las temperaturas podemos obtener  $\beta$ .

$$\beta = 0,00341 \text{ (1/k)}$$

Se reemplazan los datos obtenidos en la expresión del número de Rayleigh

$$Ra_D = \frac{(9,81 \left[ \frac{m}{s^2} \right] 0,00341 \left[ \frac{1}{K} \right] (303 [K] - 282,8 [K]) 0,0483^3 [m]}{(1,516 \times 10^{-5})^2 [m^2/s]} \times 0,6939 = 230171$$

Después de obtenido el  $Ra_D$  ya se cuenta con los datos necesarios para obtener el Nusselt

$$Nu = \left\{ 0,6 + \frac{0,387 Ra_D^{\frac{1}{6}}}{[1 + (0,559/Pr)^{\frac{16}{9}}]^{\frac{1}{4}}} \right\}^2 = \left\{ 0,6 + \frac{0,387(230171)^{\frac{1}{6}}}{[1 + (\frac{0,559}{0,6939})^{\frac{16}{9}}]^{\frac{1}{4}}} \right\}^2 = 9,676$$

Una vez calculado el valor del Nusselt, se puede obtener el coeficiente de convección, así

$$Nu = \frac{hL}{K} = \frac{h * 0,0483 [m]}{0,04371 [W/m \text{ } ^\circ C]} = 9,676$$

$$h = 8,762 \left[ \frac{W}{m \text{ } ^\circ C} \right]$$

Con el coeficiente de convección se puede hallar el valor de la transferencia por convección natural.

$$Q_{conv \text{ natural}} = h A_{sup} (T_{sup} - T_{amb}) = 8,762 \left[ \frac{W}{m \text{ } ^\circ C} \right] 0,1517 [m^2] (9,8 [K] - 30 [K])$$

$$Q_{conv \text{ natural}} = -26,86 [W]$$

Teniendo la transferencia por radiación y por convección natural y sabiendo que la energía se conserva se obtiene la transferencia por conducción.

$$Q_{conv \text{ natural}} + Q_{radiacion} = Q_{Cond \text{ tubo}} = -26,86 [W] - 1,749 [W] = -28,61 [W]$$

A partir de la expresión de transferencia de calor por conducción y conociendo la cantidad de calor transferido al exterior se puede obtener la temperatura interna del tubo.

$$Q_{Cond tubo} = \frac{2 \pi k L (T_{int} - T_{ext})}{\ln(D_{ext} - D_{int})} = \frac{2 \pi 13,4 \left[\frac{W}{m} K\right] 1[m] (T_{int} - 9,8 [^{\circ}C])}{\ln(0,0483[m]/0,04462[m])}$$

La temperatura interna del tubo sería:

$$T_{int} = 9,773 [^{\circ}C]$$

Continuando con los datos hallados en los análisis de transferencia realizados anteriormente para el intercambiador de yogurt y la expresión de conducción, se obtiene la temperatura interna del tubo.

$$Q_{Cond tubo} = \frac{2 \pi k L (T_{int} - T_{ext})}{\ln(D_{ext} - D_{int})} = \frac{2 \pi 13,4 \left[\frac{W}{m} K\right] 1[m] (T_{int} - 9,8 [^{\circ}C])}{\ln(0,0483[m]/0,04462[m])}$$

$$Q_{conv natural} + Q_{radiacion} = Q_{Cond tubo} = -26,86 [w] - 1,749 [w] = -28,61 [w]$$

La temperatura interna del tubo es:

$$T_{int} = 9,773 [^{\circ}C]$$

A partir del análisis de transferencia de calor por convección interna se es posible obtener la temperatura del agua

Se requiere obtener el número de Nusselt para hallar el coeficiente de convección, para el caso de flujo turbulento y con Reynolds de 60258 sería:

$$Nu = 0,125 f Re Pr^{1/3} = 0,125 (0,02022)(58483)(10,04)^{\frac{1}{3}} = 322,9$$

El coeficiente de convección del agua sería:

$$h_{agua} = \frac{Nu K_{agua}}{D_{int}} = \frac{318,8834 (0,565 \left[\frac{W}{m} ^{\circ}C\right])}{0,04462 [m]} = 4103 \left[\frac{W}{m^2} ^{\circ}C\right]$$

Con el factor de convección y los datos estructurales se obtiene la temperatura del agua dentro del tubo.

$$A_{supint} = \pi D_{int} = \pi 0,04462 [m] = 0,1402 [m^2]$$

$$Q_{Cond tubo} = Q_{Conv agua} = -28,61 [w]$$

$$Q_{conv agua} = h_{agua} A_{supint} (T_{agua} - T_{int})$$

$$Q_{conv agua} = 4103 \left[ \frac{W}{m^2} \text{ } ^\circ C \right] 0,1402 [m^2] (T_{agua} - 9,773 [^\circ C])$$

$$T_{agua} = 9,723 [^\circ C]$$

Repitiendo el procedimiento anterior se calculan las temperaturas del agua en circulación, estas temperaturas se encuentran en la siguiente tabla:

**Tabla 12.** Temperaturas del Agua

|                   | Área de Derivados |             |          |          |          |               | Área de Leche        |                       |                    |
|-------------------|-------------------|-------------|----------|----------|----------|---------------|----------------------|-----------------------|--------------------|
|                   | I.C. Tangelo      | I.C. Yogurt | Tanque 2 | Tanque 1 | Tanque 0 | I.C. Mordazas | I.C. Recibo de Leche | I.C. Retorno de Leche | Esterilizador REDA |
| Agua Entrada (°C) | 3,998             | 3,898       | 3,998    | 3,998    | 3,998    | 3,998         | 3,298                | 3,298                 | 3,298              |
| Agua Salida (°C)  | 8,798             | 9,723       | 8,798    | 8,798    | 8,798    | 6,898         | 6,698                | 5,898                 | 11,798             |

Con las temperaturas en cada uno de los intercambiadores de calor y los flujos de circulación, Se realiza el análisis de las cargas térmicas que tiene que disipar el sistema de bancos de hielo.

Luego del análisis de la temperatura de la tubería se puede contar con estos datos para la obtención de la carga.

El análisis de las cargas térmicas se realizará en lapsos de 1 hora el cual permite un mejor monitoreo del sistema de la planta.

Un factor importante a tener en cuenta para las cargas térmicas es que los sistemas y por su defecto los intercambiadores cumplen con un horario el cual se presenta a continuación:

### 3.4 OBTENCIÓN DE CARGAS TÉRMICAS POR HORAS

Las cargas térmicas del actual sistema de enfriamiento vienen dadas por cada uno de los sistemas o intercambiadores a los que se dirige los flujos de agua fría, los calores específicos de las sustancias incompresibles solo dependen de la temperatura, por lo tanto, el cambio en la energía interna de sólidos y líquidos se puede expresar como<sup>9</sup>:

$$Q = \dot{m} C_p (T_{out} - T_{in})$$

Donde:

$Q$  = Calor transferido en determinado tiempo ( $Kj/h$ )

$m$  = Flujo másico ( $Kg/h$ )

$C_p$  = Coeficiente de calor específico ( $\frac{Kj}{Kg^{\circ}C}$ )

---

<sup>9</sup> CENGEL, Yunus. Transferencia de calor y masa. 3 ed. Mexico D.F.:McGraw-Hill,2007. p. 9

$T_{out}$  = Temperatura de salida ( $^{\circ}C$ )

$T_{in}$  = Temperatura de entrada ( $^{\circ}C$ )

Existen expresiones para el análisis de los intercambiadores que permiten mayor exactitud, sin embargo, debido al desconocimiento de muchos de los datos de los mismos se recurre a la anterior expresión.

El análisis de las cargas térmicas se realizará en lapsos de 1 hora el cual permite un mejor monitoreo del sistema de la planta.

Un factor importante para tener en cuenta en la obtención de las cargas térmicas es que los sistemas y por su defecto los intercambiadores cumplen con un horario, el horario que cumplen los procesos se presenta a continuación:

**Tabla 13.** Horario de Funcionamiento de procesos

|                     | Área de Derivados |             |          |          |          | I.C. Mordazas | Área de Leche        |                       |                    |
|---------------------|-------------------|-------------|----------|----------|----------|---------------|----------------------|-----------------------|--------------------|
|                     | I.C. Tangelo      | I.C. Yogurt | Tanque 2 | Tanque 1 | Tanque 0 |               | I.C. Recibo de Leche | I.C. Retorno de Leche | Esterilizador REDA |
| Hora Encendido (hs) | 22:00             | 16:00       | 23:00    | 16:00    | 19:00    | 6:00          | 6:00                 | 6:00                  | 4:00               |
| Hora Apagado (hs)   | 4:00              | 2:00        | 2:00     | 19:00    | 23:00    | 16:00         | 2:00                 | 20:00                 | 20:00              |

Como se mencionó anteriormente, existen líneas de distribución las cuales llevan agua fría a los diferentes intercambiadores, todas las líneas funcionan con diferentes bombas y por ende diferentes flujos, este es un factor importante para conseguir el flujo másico circulando por cada intercambiador y que hace parte de los datos necesarios para obtener la carga térmica de cada sistema.

Además, se debe tener en cuenta que en las líneas principales como es el caso de la línea de distribución de leche y derivados cuentan cada una con dos bombas, las cuales no siempre funcionan a la par, por lo que se presenta un horario de funcionamiento de cada una de las bombas.

**Tabla 14.** Horario de Funcionamiento de las Bombas de Agua Fría

| Hora (hs)                 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---------------------------|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|---|---|---|---|---|---|
| Bomba Auxiliar leche      | X | X | X | X | X  | X  | X  | X  | X  | X  | X  | X  | X  | X  | X  | X  | X  | X  | X | X |   |   | X | X |
| Bomba Principal leche     | X | X | X | X | X  | X  | X  | X  | X  | X  | X  | X  | X  |    |    |    |    |    |   |   |   |   |   |   |
| Bomba Auxiliar Derivados  | X | X | X | X | X  | X  | X  | X  | X  | X  | X  | X  |    |    |    |    | X  | X  | X | X |   |   |   |   |
| Bomba Principal Derivados |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    | X  | X  | X  | X  | X  | X  | X  | X  | X | X |   |   |   |   |
| Bomba Tangelo             |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    | X  | X  | X | X | X | X |   |   |
| Bomba Tanque 0            |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    | X  | X  | X  |    |    |   |   |   |   |   |   |

Teniendo en cuenta el horario de los intercambiadores y el horario de encendido de cada una de las bombas se realiza un análisis para determinar el flujo másico que pasa por cada intercambiador, para efectos prácticos se divide el flujo másico existente en la línea en la hora designada entre el número de intercambiadores funcionando en la misma hora.

### 3.4.1 Ejemplo de cálculo de carga de Intercambiador de Yogurt a las 18:00 hs.

A partir de la ecuación de transferencia de calor se obtiene la carga del intercambiador.

$$Q_{inter} = \dot{m}_{agua} C_{p_{agua}} (T_{out} - T_{in})$$

Para obtener el  $\dot{m}_{agua}$  debemos verificar la línea de distribución del intercambiador, para el intercambiador de yogurt se trata de la línea de derivados, se verifica que bombas funcionan en esta línea en la hora requerida, el horario de funcionamiento de las bombas se encuentra en la tabla 11, en este caso se encuentra en la línea de derivados funcionando la bomba principal de derivados y la bomba auxiliar de derivados, por tanto, tomando de la tabla 12:

$$\dot{m}_{derivados\ 18\ hs} = \dot{m}_{pd} + \dot{m}_{ad} = 18443 \left[ \frac{Kg}{h} \right] + 9947 \left[ \frac{Kg}{h} \right] = 28390 \left[ \frac{Kg}{h} \right]$$

Luego se verifica cuáles de los intercambiadores de esta línea se encuentran funcionando a la hora requerida, en la tabla 9 se visualiza los horarios de encendido y apagado de los intercambiadores, en este caso a la hora designada se encuentra el Intercambiador de Yogurt y el Tanque 1 funcionando, por tanto:

$$\dot{m}_{cargas\ derivados\ 18\ hs} = \frac{\dot{m}_{derivados\ 18\ hs}}{\# procesos\ 18\ hs} = \frac{43638 \left[ \frac{Kg}{h} \right]}{2} = 14195 \left[ \frac{Kg}{h} \right]$$

A partir de la siguiente expresión obtenemos las cargas térmicas.

$$Q_{inter} = \dot{m}_{agua} C_{p_{agua}} (T_{out} - T_{in})$$

Reemplazando el flujo pasante en el intercambiador a la hora designada, las temperaturas de entrada y salida del intercambiador (obtenidas de la tabla 8) y el coeficiente de calor específico del agua ( $C_{p_{agua}} = 4,194 \left( \frac{Kj}{Kg \cdot ^\circ C} \right)$ ) se obtiene la carga térmica en el intercambiador a determinada hora.

$$Q_{I.C. Yog 18hs} = \dot{m}_{flujo derivados 18 hs} C_{p_{agua}} (T_{out Yog} - T_{in yog})$$

$$Q_{I.C. Yog 18hs} = 14195 \left[ \frac{Kg}{h} \right] 4,194 \left[ \frac{Kj}{Kg \cdot ^\circ C} \right] (9,723 [^\circ C] - 3,898 [^\circ C]) = 346.823 [Kj/h]$$

Realizando el anterior proceso para cada uno de los intercambiadores en la totalidad de las horas, es posible obtener un análisis de cargas térmicas por horas, este se logra sumando la carga de cada intercambiador en la hora determinada.

Realizando el anterior proceso para cada uno de los intercambiadores en la totalidad de las horas, es posible obtener un análisis de cargas térmicas por horas, este se logra sumando la carga de cada intercambiador en la hora determinada.

**3.4.2 Ejemplo de carga térmica para las 18:00 hs.** A partir del proceso anterior las cargas de los intercambiadores a las 18:00 hs son:

$$Q_{IC Tangelo 18} = 0 [Kj/h]$$

$$Q_{IC Yogurt 18} = 346.823 [Kj/h]$$

$$Q_{Tanque 2 18} = 0 [Kj/h]$$

$$Q_{Tanque 1 18} = 285.794 [Kj/h]$$

$$Q_{Tanque 0 18} = 0 [Kj/h]$$

$$Q_{IC Mordazas 18} = 0 [Kj/h]$$

$$Q_{IC Rec.leche 18} = 296.970 [Kj/h]$$

$$Q_{IC Ret.leche 18} = 227.095 [Kj/h]$$

$$Q_{IC Estirilizador 18} = 742.425 [Kj/h]$$

La carga a la hora deseada es la suma de cada una de las cargas de los intercambiadores justamente a esa hora, para este caso tal hora son las 18:00 hs.

$$Q_{18} = Q_{IC Tangelo 18} + Q_{IC Yogurt 18} + Q_{Tanque 2 18} + Q_{Tanque 1 18} + Q_{Tanque 0 18}$$

$$+ Q_{IC Mordazas 18} + Q_{IC Rec.leche 18} + Q_{IC Ret.leche 18} + Q_{IC Estirilizador 18}$$

$$Q_{18} = 0 \left[ \frac{Kj}{h} \right] + 346.823 \left[ \frac{Kj}{h} \right] + 0 \left[ \frac{Kj}{h} \right] + 285.794 \left[ \frac{Kj}{h} \right] + 0 \left[ \frac{Kj}{h} \right] + 0 \left[ \frac{Kj}{h} \right]$$

$$+ 296.970 \left[ \frac{Kj}{h} \right] + 227.095 \left[ \frac{Kj}{h} \right] + 742.425 \left[ \frac{Kj}{h} \right]$$

$$Q_{18} = 1.899.107 \left[ \frac{Kj}{h} \right]$$

Para un mejor análisis y visualización se convierten de  $\frac{Kj}{h}$  a Kw.

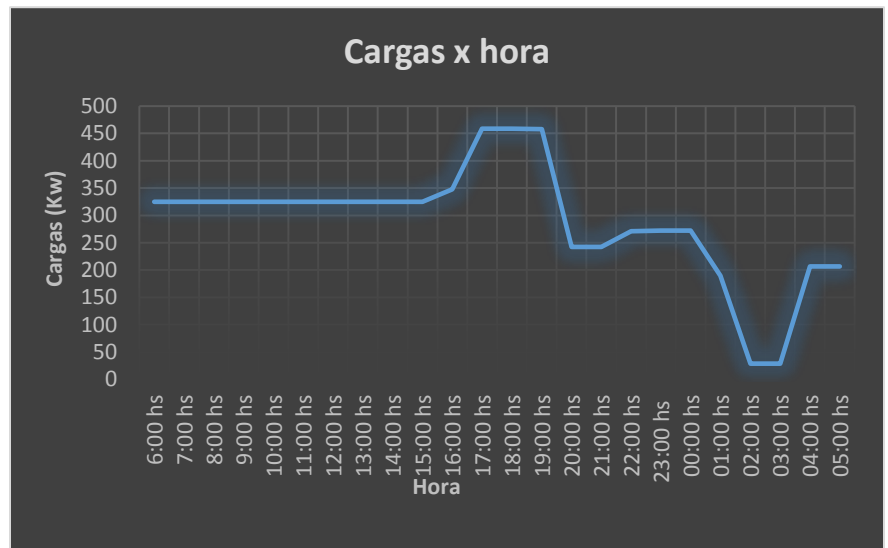
$$Q_{18} = 527,5 [Kw]$$

Realizando la misma operación en cada una de las horas se obtiene la siguiente tabla con su respectiva gráfica:

**Tabla 15.** Cargas Térmicas Actuales por Hora

| Hora (hs) | Cargas (kW) |
|-----------|-------------|
| 6:00 hs   | 325,2       |
| 7:00 hs   | 325,2       |
| 8:00 hs   | 325,2       |
| 9:00 hs   | 325,2       |
| 10:00 hs  | 325,2       |
| 11:00 hs  | 325,2       |
| 12:00 hs  | 325,2       |
| 13:00 hs  | 325,2       |
| 14:00 hs  | 325,2       |
| 15:00 hs  | 325,2       |
| 16:00 hs  | 347,6       |
| 17:00 hs  | 458,7       |
| 18:00 hs  | 458,7       |
| 19:00 hs  | 457,7       |
| 20:00 hs  | 242,4       |
| 21:00 hs  | 242,4       |
| 22:00 hs  | 271,3       |
| 23:00 hs  | 272,3       |
| 00:00 hs  | 272,3       |
| 01:00 hs  | 189,6       |
| 02:00 hs  | 28,92       |
| 03:00 hs  | 28,92       |
| 04:00 hs  | 206,7       |
| 05:00 hs  | 206,7       |

**Figura 19.** Perfil de cargas Actuales



## 4. CALCULO DE LA CAPACIDAD DE REFRIGERACIÓN

Una vez establecidas las cargas reales de los procesos, es necesario analizar la capacidad de los bancos de hielo para refrigerar estas cargas. Para analizar el ciclo termodinámico es necesario tener en cuenta que capacidad tiene instalada la empresa y la disponibilidad con la que se cuenta.

4.1 Masa de Refrigerante del sistema

4.2 Análisis del ciclo termodinámico.

4.3 Potencia eléctrica real.

4.4 Análisis de La capacidad de refrigeración.

### 4.1 MASA DE REFRIGERANTE DEL SISTEMA.

La masa del refrigerante que circula por el sistema será la suma de las masas que circulan por cada compresor durante la etapa de compresión

$$Masa_{RefTotal} = M_{ref1} + M_{ref2} + M_{ref3} + M_{ref4}$$

Para determinar la masa que circula por cada compresor es necesario conocer las RPM de cada compresor

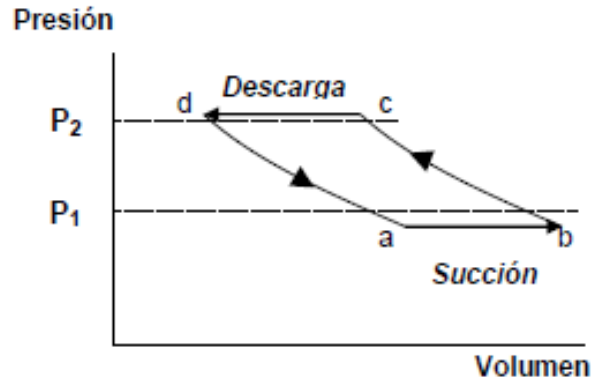
$$M_{ref1} = M_{RefCiclo} * RPM$$

Ahora para determinar la masa en cada ciclo de compresión  $M_{RefCiclo}$  se utiliza la expresión

$$M_{RefCiclo} = \frac{Vol. Real}{Vol. Especifico} = \frac{Vol. Fisico * \eta_{volumetrica}}{Vol. Especifico}$$

Para determinar la eficiencia volumétrica del compresor es necesario conocer el ciclo de compresión real (PV) de un compresor Reciprocante

**Figura 20.** Ciclo de Compresión real PV de un Compresor Reciprocante



Donde:

P1: Presión medida en la succión

P2: Presión medida en la descarga

$v_1$ : Volumen específico con las condiciones de entrada en la succión

$V_a$ : Volumen de expansión del gas remanente dentro del volumen muerto durante el ciclo anterior

$V_b$ : Volumen de expansión de la mezcla del gas remanente con el gas de entrada.

$V_c$ : Volumen después de la compresión politrópica desde el estado b.

$v_b$ : Volumen específico en el punto b

$V_d$ : Volumen muerto

La eficiencia volumétrica ( $\eta_{vol}$ ) del compresor corresponde a

$$\eta_{volumetrica} = \frac{\text{Volumen Real}}{\text{Volumen Físico}} = \frac{v_b - v_a}{v_b - V_d}$$

Para determinar el Volumen físico de un Compresor, es necesario analizarlo individualmente para determinar las partes esenciales.

$$V_{físico} = \frac{\pi * D_p^2}{4} * L_c * N_{rpm} * N_{pistones}$$

$D_p$ : Diámetro del pistón

$L_c$ : Longitud de la carrera

$N_{rpm}$ : Velocidad del compresor

Según la figura 20 y teniendo en cuenta que los procesos de compresión y de expansión son procesos politrópicos, cumplen con la relación

$$P_b * V_b^n = P_c * V_c^n$$

$$\frac{V_c}{V_b} = \left(\frac{P_b}{P_c}\right)^{\frac{1}{n}}$$

Teniendo en cuenta esta relación, se puede reemplazar en la ecuación de la eficiencia volumétrica

$$E_v = \frac{v_1}{v_b} * \left(1 - \frac{V_d}{V_{fis}} * \left(\left(\frac{P_c}{P_b}\right)^{\frac{1}{n}} - 1\right)\right)$$

Para determinar el coeficiente “n” se utiliza la aproximación del coeficiente politrópico del amoníaco k, que se halla de la relación  $k=C_p/C_v$ .

**4.1.1 Calculo de masa de refrigerante.** En la observación sobre el funcionamiento de un día completo que se realizó previamente, se detalló que de los cuatro compresores instalados para el sistema de bancos de hielo, dos se encontraron totalmente deshabilitados para lograr un ahorro energético, uno está en constante funcionamiento y el otro en horas nocturnas se apaga.

Para determinar la cantidad de amoníaco que circula en el sistema es necesario definir las horas de funcionamiento de cada compresor, adicional a eso es definir en qué porcentaje de capacidad está funcionando.

**Tabla 16.** Modelos de los Compresores Instalados

|                        | <b>Modelo N6WA</b>  | <b>Modelo N4WA</b> |
|------------------------|---------------------|--------------------|
| Numero de cilindros    | 6                   | 4                  |
| Diámetro (mm)          | 95                  | 95                 |
| Carrera (mm)           | 76                  | 76                 |
| Velocidad máxima (rpm) | 1450                | 1450               |
| Control de capacidad   | 100 % - 66 % - 33 % | 100% - 50 %        |

El cálculo tipo se realizará para las 6:00 pm, para esta hora se tienen los siguientes datos

**Tabla 17.** Datos Medidos Para las 18 horas

| Presión de succión [kPa] | Presión de descarga [kPa] | Temperatura de succión [°C] | Temperatura de descarga [°C] | Compresor 3        | Compresor 4        |
|--------------------------|---------------------------|-----------------------------|------------------------------|--------------------|--------------------|
| 328                      | 1278                      | 0                           | 118                          | 100%<br>6 pistones | 100%<br>6 pistones |

Las pérdidas en la admisión y la descarga se asumen de 15 kPa y 30 kPa respectivamente

$$P_1 = 328 \text{ kPa}$$

$$P_b = 328 - 15 = 313 \text{ kPa}$$

$$P_2 = 1268 \text{ kPa}$$

$$P_c = 1278 + 30 = 1308 \text{ kPa}$$

Considerando que la temperatura en el punto b ( $T_b$ ) es igual la temperatura en el múltiple de admisión ( $T_1$ ), entonces

$$\frac{V_1}{V_b} = \frac{P_b}{P_1}$$

$$\frac{V_1}{V_b} = \frac{P_b}{P_1} = \frac{313}{328} = 0,9543$$

Con el software EES, se calculan las propiedades del amoniaco en el múltiple de admisión

$$v_1 = 0,3858 \frac{m^3}{kg}$$

A su vez, también se puede calcular el coeficiente politropico

$$K = 1,372$$

Para hallar el volumen físico del compresor, hay que tener en cuenta que el valor del control de capacidad, ya que este valor es proporcional, según la tabla 17 los compresores a la hora del análisis funcionan al 100 % de su capacidad.

$$V_{físico} = \frac{\pi * D_p^2}{4} * L_c * N_{rpm} * N_{pistones}$$

### Compresor N6WA

$$V_{físico} = \frac{\pi * 0,095^2}{4} * 0,076 * 1150 * 6$$

$$V_{físico} = 0,003232 \text{ m}^3 / \text{min}$$

### Compresor N4WA - BB

$$V_{físico} = \frac{\pi * 0,095^2}{4} * 0,076 * 924 * 4$$

$$V_{físico} = 0,002155 \text{ m}^3 / \text{min}$$

**Tabla 18.** Volumen Físico de los Compresores

| COMPRESOR   | REFERENCIA | VOLUMEN [m <sup>3</sup> /min] |
|-------------|------------|-------------------------------|
| Compresor 1 | N6WA       | 0,003232                      |
| Compresor 2 | N4WA – BB  | 0,002155                      |
| Compresor 3 | N6WA       | 0,003232                      |
| Compresor 4 | N6WA       | 0,003232                      |

- Eficiencia volumétrica**

La relación entre el volumen muerto del compresor y el volumen físico del mismo corresponde al valor del claro y esta expresado en forma de un porcentaje del valor de la carrera del pistón, para los efectos de cálculo de estos compresores se asume un claro estándar 7 %, es decir, una relación de volúmenes de 0,07 entonces:

$$\eta_{volumetrica} = \frac{v_1}{v_b} * (1 - \frac{v_d}{v_{fís}} * ((\frac{P_c}{P_b})^{\frac{1}{n}} - 1))$$

$$\eta_{volumetrica} = 0,8411$$

### Masa de amoniaco que circula por el compresor 1

$$\text{Masa inducida por ciclo } m_{\frac{ref}{ciclo}} = \frac{\eta_{volumetrica} * V_{fis}}{v_1}$$

$$M_{\frac{ref}{ciclo}} = 0,007048 \frac{kg}{ciclo}$$

$$M_{ref1} = M_{\frac{ref}{ciclo}} * N(rpm) = 0,007048 * \frac{1150}{60} = 0,1351 \frac{kg}{segundo}$$

### Masa de amoniaco que circula por el compresor 2

$$\text{Masa inducida por ciclo } m_{\frac{ref}{ciclo}} = \frac{\eta_{volumetrica} * V_{fis}}{v_1}$$

$$M_{\frac{ref}{ciclo}} = 0,004699 \frac{kg}{ciclo}$$

$$M_{ref3} = M_{\frac{ref}{ciclo}} * N(rpm) = 0,004699 * \frac{924}{60} = 0,07233 \frac{kg}{Segundo}$$

### Masa de amoniaco que circula por el compresor 3

$$\text{Masa inducida por ciclo } m_{\frac{ref}{ciclo}} = \frac{\eta_{volumetrica} * V_{fis}}{v_1}$$

$$M_{\frac{ref}{ciclo}} = 0,007048 \frac{kg}{ciclo}$$

$$M_{ref3} = M_{\frac{ref}{ciclo}} * N(rpm) = 0,007048 * \frac{1147}{60} = 0,1348 \frac{kg}{segundo}$$

### Masa de amoniaco que circula por el compresor 4

$$\text{Masa inducida por ciclo } m_{\frac{ref}{ciclo}} = \frac{\eta_{volumetrica} * V_{fis}}{v_1}$$

$$M_{\frac{ref}{ciclo}} = 0,007048 \frac{kg}{ciclo}$$

$$M_{ref3} = M_{\frac{ref}{ciclo}} * N(rpm) = 0,007048 * \frac{1150}{60} = 0,1351 \frac{kg}{segundo}$$

Una vez establecidas las masas de refrigerante que pueden circular por cada compresor, se hace el análisis para la hora especificada, teniendo en cuenta que para las 6:00 pm solo están encendidos los compresores 3 y 4. Entonces la masa total de amoniaco es

$$M_{refT} = M_{ref3} + M_{ref4}$$

$$M_{refT} = 0,2699 \frac{kg}{segundo}$$

**Tabla 19.** Masa de refrigerante total por Hora

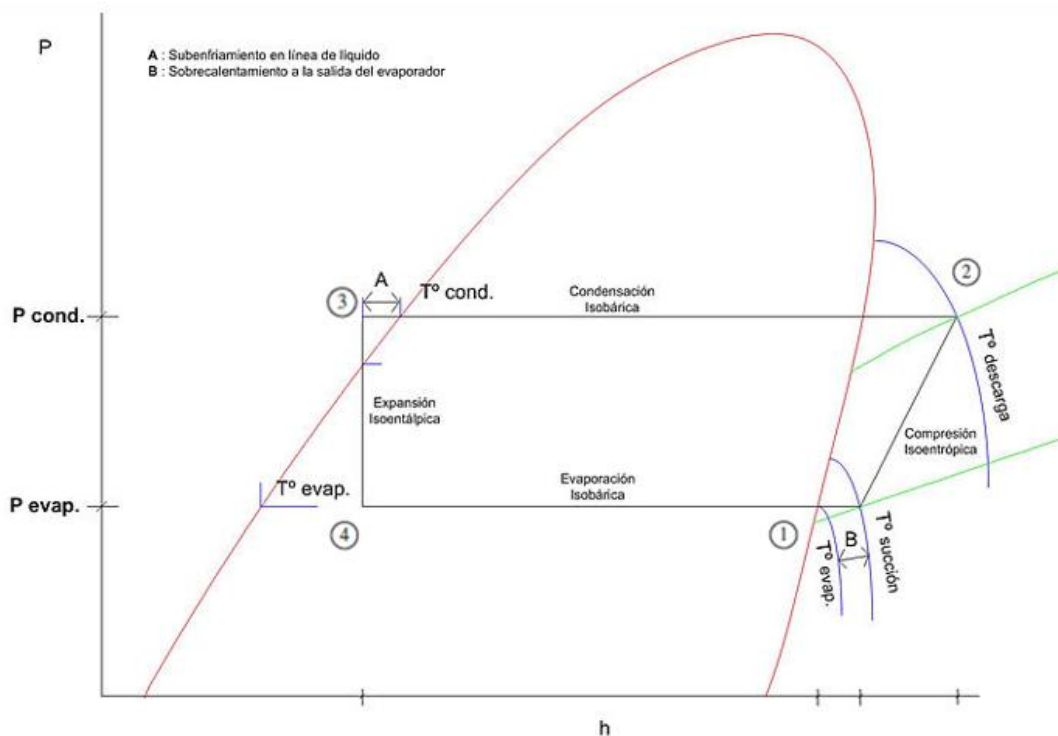
| HORA        | MASA TOTAL REFRIGERANTE [Kg/Seg] |
|-------------|----------------------------------|
| 6:00 a. m.  | 0,2603                           |
| 7:00 a. m.  | 0,268                            |
| 8:00 a. m.  | 0,2581                           |
| 9:00 a. m.  | 0,2481                           |
| 10:00 a. m. | 0,2517                           |
| 11:00 a. m. | 0,2562                           |
| 12:00 p. m. | 0,2635                           |
| 1:00 p. m.  | 0,2553                           |
| 2:00 p. m.  | 0,2547                           |
| 3:00 p. m.  | 0,2645                           |
| 4:00 p. m.  | 0,2678                           |
| 5:00 p. m.  | 0,2699                           |
| 6:00 p. m.  | 0,2699                           |
| 7:00 p. m.  | 0,2671                           |
| 8:00 p. m.  | 0,2642                           |
| 9:00 p. m.  | 0,2613                           |
| 10:00 p. m. | 0,2462                           |
| 11:00 p. m. | 0,1581                           |
| 12:00 a. m. | 0,1607                           |
| 1:00 a. m.  | 0,1673                           |
| 2:00 a. m.  | 0,1646                           |
| 3:00 a. m.  | 0,1607                           |
| 4:00 a. m.  | 0,1616                           |
| 5:00 a. m.  | 0,1573                           |

## 4.2 DESEMPEÑO TEÓRICO DEL CICLO TERMODINÁMICO.

Es importante conocer el desempeño que tiene el sistema de refrigeración primario (amoníaco) para conocer la capacidad de refrigeración real del banco de hielo, en la tabla N°. 20 se encuentran los datos de la medición en la tubería de succión y en la tubería de descarga de presión y temperatura del refrigerante en los compresores. Además se debe tener en cuenta el cálculo del coeficiente de desempeño (COP) del ciclo y su desviación respecto a al cálculo teórico.

Para el ciclo refrigeración instalado en la planta se procede a estudiar el comportamiento del amoníaco en cuatro estados, el primero en la succión del compresor, el segundo en la descarga del compresor, el tercero en la salida del condensador y el cuarto en la salida de la válvula de expansión.

**Figura 21.** Ciclo de refrigeración del actual sistema



Fuente: [https://es.wikipedia.org/wiki/Diagrama\\_Ph](https://es.wikipedia.org/wiki/Diagrama_Ph)

Para efectos de cálculo se realizarán la toma de medida de presión y temperatura en la entrada y la salida del compresor. Los datos se recopilarán durante 24 horas y se tomara como referencia el punto más crítico de la medición.

**Tabla 20.** Recopilación de Datos del Ciclo Real de Compresión.

| HORA        | PRESIÓN DE SUCCIÓN [KPA] | PRESIÓN DE DESCARGA [KPA] | TEMPERATURA DE SUCCIÓN [°C] | TEMPERATURA DE DESCARGA [°C] |
|-------------|--------------------------|---------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| 6:00 a. m.  | 313                      | 1170                      | -2                          | 103                          |
| 7:00 a. m.  | 321                      | 1190                      | -2                          | 108                          |
| 8:00 a. m.  | 311                      | 1170                      | -2                          | 110                          |
| 9:00 a. m.  | 302                      | 1151                      | -1                          | 110                          |
| 10:00 a. m. | 306                      | 1170                      | -1                          | 116                          |
| 11:00 a. m. | 313                      | 1219                      | 0                           | 117                          |
| 12:00 p. m. | 320                      | 1219                      | 0                           | 112                          |
| 1:00 p. m.  | 313                      | 1209                      | 1                           | 117                          |
| 2:00 p. m.  | 314                      | 1259                      | 1                           | 117                          |
| 3:00 p. m.  | 324                      | 1278                      | 1                           | 118                          |
| 4:00 p. m.  | 326                      | 1278                      | 0                           | 118                          |
| 5:00 p. m.  | 328                      | 1278                      | 0                           | 118                          |
| 6:00 p. m.  | 328                      | 1278                      | 0                           | 118                          |
| 7:00 p. m.  | 325                      | 1268                      | 0                           | 118                          |
| 8:00 p. m.  | 322                      | 1259                      | 0                           | 110                          |
| 9:00 p. m.  | 318                      | 1259                      | -1                          | 118                          |
| 10:00 p. m. | 300                      | 1219                      | -3                          | 114                          |
| 11:00 p. m. | 367                      | 1160                      | -1                          | 100                          |
| 12:00 a. m. | 373                      | 1151                      | 0                           | 98                           |
| 1:00 a. m.  | 387                      | 1160                      | 1                           | 97                           |
| 2:00 a. m.  | 382                      | 1160                      | 1                           | 98                           |
| 3:00 a. m.  | 373                      | 1151                      | 0                           | 98                           |
| 4:00 a. m.  | 373                      | 1102                      | 0                           | 97                           |
| 5:00 a. m.  | 366                      | 1131                      | 0                           | 97                           |

**Tabla 21.** Datos Tomados para ejemplificar el cálculo del ciclo termodinámico.

| P-unto                           | Lectura de datos |                  |
|----------------------------------|------------------|------------------|
| Entrada al Compresor             | Presión          | P_baja:328 kPa   |
|                                  | Temperatura      | T_baja:0 °C      |
|                                  | Calidad          | X=1              |
| Salida al Compresor              | Presión          | P_alta: 1278 kPa |
|                                  | Temperatura      | T_alta:118 °C    |
| Salida Condensador - Evaporativo | Presión          | P_alta2=1170 kPa |
|                                  | Temperatura      | 33.4 °C          |

Para el cálculo de la potencia consumida por los compresores, es necesario analizar termodinámicamente el ciclo de refrigeración.

**Estado 1:** Inicialmente se debe calcular la entalpia a la entrada del compresor con los datos proporcionados por la manometría del compresor, con el software EES se calculan las propiedades del amoniaco a la temperatura, presión y entalpia seleccionada.

$$h_1 = \text{enthalpy}(R717; x = 1; P = P_{baja}) \quad h_1 = 1454 \text{ kJ/kg}$$

$$s_1 = \text{entropy}(R717; x = 1; P = P_{baja}) \quad S_1 = 5,715 \text{ kJ/kg}$$

**Estado 2:** Para saber realmente la carga del sistema es necesario tener la lectura de la presión y temperatura a la salida del compresor. Con estos datos se calcula la entalpia de salida, que está correspondería a la entalpia real. Como punto de comparación se puede tomar la entalpia ideal (Con un compresor Isentrópico).

$$h_{2REAL} = \text{enthalpy}(R717; T = T_{alta}; P = P_{alta}) \quad h_{2REAL} = 1720 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{2IDEAL} = \text{enthalpy}(R717; s = s_1; P = P_{alta}) \quad h_{2IDEAL} = 1649 \text{ kJ/kg}$$

**Estado 3:** A la salida del condensador evaporativo es posible medir la presión y la temperatura de saturación correspondiente a esta presión del refrigerante. Se toman estos valores como los valores de entrada a la válvula de expansión, asumiendo también que todo el refrigerante en este punto se encuentra en Líquido.

$$h_4 = \text{enthalpy}(R717; x = 0; P = P_{alta2}) \quad h_4 = 356,7 \text{ kJ/kg}$$

**Estado 4:** Para hallar las características del refrigerante a la salida de la válvula de expansión, es necesario asumir que los dispositivos de estrangulación son isoentálpicos, teniendo esto como dato inicial y la presión de baja, se calcula la temperatura a la entrada del evaporador

$$h_5 = h_4$$

$$T_5 = \text{Temperature}(R717; h = h_5; P = P_{baja}) \quad T_5 = -7,003 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$X_5 = \text{Quality}(R717; T = T_5; h = h_5) \quad X_5 = 0,1469$$

Teniendo todos los estados del ciclo termodinámico, se procede hallar la eficiencia del compresor en el ciclo

$$\eta_{compresor} = \frac{h_{2ideal} - h_1}{h_{2real} - h_1} \quad \eta_{compresor} = 73,35 \%$$

**Carga Térmica que puede extraer:** La carga térmica total de los procesos tiene que ser extraída por el evaporador inundado o Banco de hielo, como la carga térmica de la planta varia a diferentes horas, la masa del refrigerante debe variar también para cumplir con los requerimientos. La capacidad que tiene el banco de hielo de extraer calor depende de la cantidad de masa que circula por las tuberías de amoniaco, que se calculó de acuerdo a la cantidad de masa que está pasando por los compresores activos

$$Q_{eva} = \text{Masa}_{ref} * (h_1 - h_4) \quad \text{Masa}_{ref} = 0,2669 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$Q_{eva} = 296,2 \text{ kW}$$

**Potencia consumida por los compresores:** Una vez calculada la carga máxima que puede ser extraída por el evaporador inundado se procede a calcular la potencia requerida por los compresores para extraer la carga.

$$Potencia = Masa_{ref} * (h_{2real} - h_1) \quad Potencia = 71,69 \text{ kW}$$

Para calcular el coeficiente de desempeño COP del ciclo se toman los datos de entalpías. Para el COP Real y el COP Ideal se toman la entalpia dos ideal y la entalpia dos real, respectivamente.

$$COP_{Real} = \frac{h_1 - h_4}{h_{2real} - h_1} \quad COP_{real} = 4,132$$

$$COP_{Ideal} = \frac{h_1 - h_4}{h_{ideal} - h_1} \quad COP_{ideal} = 5,634$$

**Tabla 22.** Generalización de datos teóricos y reales de cargas.

| HORA        | CARGA TERMICA DE LOS PROCESOS [kW] | CARGA TERMICA DISIPADA POR LOS BANCOS DE HIELO [kW] | POTENCIA DE LOS COMPRESORES SEGÚN EL CICLO [kW] | COP IDEAL | COP REAL | EFICIENCIA DEL CICLO TERMODINAMICO (hR/hl) | EFICIENCIA VOLUMETRICA DEL COMPRESOR |
|-------------|------------------------------------|---|---|-----------|----------|--|--------------------------------------|
| 06:00 a. m. | 325,2                              | 289,1   | 60,64   | 5,923     | 4,775    | 0,8063                                     | 0,8445                               |
| 07:00 a. m. | 325,2                              | 297,2   | 65,34   | 5,948     | 4,4549   | 0,7648                                     | 0,8468                               |
| 08:00 a. m. | 325,2                              | 286,7   | 64,62   | 5,891     | 4,437    | 0,7532                                     | 0,8433                               |
| 09:00 a. m. | 325,2                              | 276   | 62,47   | 5,843     | 4,418    | 0,7563                                     | 0,8399                               |
| 10:00 a. m. | 325,2                              | 279,4   | 66,88   | 5,811     | 4,177    | 0,7189                                     | 0,8402                               |
| 11:00 a. m. | 325,2                              | 282,8   | 68,19   | 5,682     | 4,148    | 0,73                                       | 0,8388                               |
| 12:00 p. m. | 325,2                              | 291,1   | 66,66   | 5,788     | 4,366    | 0,7544                                     | 0,8428                               |
| 01:00 p. m. | 325,2                              | 282,2   | 68,03   | 5,729     | 4,149    | 0,7241                                     | 0,8397                               |
| 02:00 p. m. | 325,2                              | 279,9   | 67,48   | 5,517     | 4,147    | 0,7517                                     | 0,8349                               |
| 03:00 p. m. | 325,2                              | 290,2   | 70,34   | 5,577     | 4,125    | 0,7397                                     | 0,8387                               |
| 04:00 p. m. | 347,6                              | 293,9   | 71,18   | 5,605     | 4,129    | 0,7366                                     | 0,84                                 |
| 05:00 p. m. | 458,7                              | 296,2   | 71,69   | 5,634     | 4,132    | 0,7335                                     | 0,8411                               |
| 06:00 p. m. | 458,7                              | 296,2   | 71,69   | 5,634     | 4,132    | 0,7335                                     | 0,8411                               |
| 07:00 p. m. | 457,7                              | 293,4   | 71,09   | 5,635     | 4,128    | 0,7325                                     | 0,8405                               |
| 08:00 p. m. | 242,4                              | 290,6   | 65,17   | 5,632     | 4,459    | 0,7916                                     | 0,8397                               |
| 09:00 p. m. | 242,4                              | 287,2   | 69,79   | 5,574     | 4,116    | 0,7383                                     | 0,8376                               |
| 10:00 p. m. | 271,3                              | 271,5   | 63,99   | 5,489     | 4,242    | 0,7729                                     | 0,8315                               |
| 11:00 p. m. | 272,3                              | 176,6   | 34,9  | 6,903     | 5,062    | 0,7333                                     | 0,872                                |
| 12:00 a. m. | 272,3                              | 179,8   | 34,63   | 7,075     | 5,192    | 0,7339                                     | 0,8752                               |
| 01:00 a. m. | 189,6                              | 187,1   | 35,39   | 7,272     | 5,287    | 0,727                                      | 0,8799                               |
| 02:00 a. m. | 28,92                              | 184,1   | 35,3  | 7,179     | 5,214    | 0,7263                                     | 0,8779                               |
| 03:00 a. m. | 28,92                              | 179,8   | 34,63   | 7,075     | 5,192    | 0,7339                                     | 0,8752                               |
| 04:00 a. m. | 206,7                              | 181,9   | 34,68   | 7,442     | 5,246    | 0,7049                                     | 0,8799                               |
| 05:00 a. m. | 206,7                              | 176,4   | 33,7  | 7,086     | 5,234    | 0,7387                                     | 0,8742                               |

### 4.3 POTENCIA ELÉCTRICA REAL.

Los compresores de los bancos de hielo son de tres cabezales, cada compresor puede funcionar independientemente de acuerdo con el requerimiento. Para un rendimiento del 100 % el compresor trabaja con los tres cabezales, para un rendimiento del 66% el compresor trabaja con 2 cabezales y para el 33% el compresor trabajara solo con un cabezal. Para estos rendimientos es necesario aclarar que la potencia eléctrica consumida será diferente en los 3 casos.

Para calcular el consumo de potencia del motor eléctrico de los compresores, se miden el amperaje en las tres fases del motor, en la tabla 18 se encuentra el consumo promedio a un rendimiento del 100%.

**Tabla 23.** Consumo Eléctrico de los motores de los compresores

| HORA        | COMPRESOR 3<br>[Amp] | COMPRESOR 4<br>[Amp] |
|-------------|----------------------|----------------------|
| 6:00 a. m.  | 115                  | 116,8                |
| 7:00 a. m.  | 118,5                | 113,3                |
| 8:00 a. m.  | 116,3                | 111,2                |
| 9:00 a. m.  | 114,9                | 112,6                |
| 10:00 a. m. | 115,9                | 112,4                |
| 11:00 a. m. | 115,9                | 114,5                |
| 12:00 p. m. | 118,1                | 114,8                |
| 1:00 p. m.  | 118,3                | 119,6                |
| 2:00 p. m.  | 122,6                | 121,5                |
| 3:00 p. m.  | 123,3                | 120,4                |
| 4:00 p. m.  | 122,1                | 119,4                |
| 5:00 p. m.  | 123,4                | 120,3                |
| 6:00 p. m.  | 123,3                | 119,2                |
| 7:00 p. m.  | 121,8                | 118,6                |
| 8:00 p. m.  | 121,4                | 118,3                |
| 9:00 p. m.  | 120,6                | 117,4                |
| 10:00 p. m. | 117,7                | 114,4                |

|             |       |       |
|-------------|-------|-------|
| 11:00 p. m. | 118   | ----- |
| 12:00 a. m. | 118,2 | ----- |
| 1:00 a. m.  | 120,4 | ----- |
| 2:00 a. m.  | 120,2 | ----- |
| 3:00 a. m.  | 119,5 | ----- |
| 4:00 a. m.  | 116,3 | ----- |
| 5:00 a. m.  | 117,6 | 112,7 |

Para conocer la potencia eléctrica consumida por cada uno de los motores trifásicos de los compresores se utiliza la fórmula:

$$P_{consumida} = \sqrt{3} * U_L * I_L * \text{Cos}(\phi)$$

Donde:

$U_L =$  Voltaje de la línea

$I_L =$  Corriente de la línea

$\text{Cos}(\phi) =$  Factor de potencia

Como ejemplo, se tomarán las corrientes de los dos compresores a las seis de la tarde, para evaluar el consumo de potencia eléctrica, entonces:

$$P_{compresor3} = \sqrt{3} * 220 * 123,3 * 0,85 = 39,94 \text{ kW}$$

$$P_{compresor4} = \sqrt{3} * 220 * 119,2 * 0,85 = 38,61 \text{ kW}$$

$$P_{TOTAL} = 78,55 \text{ kW}$$

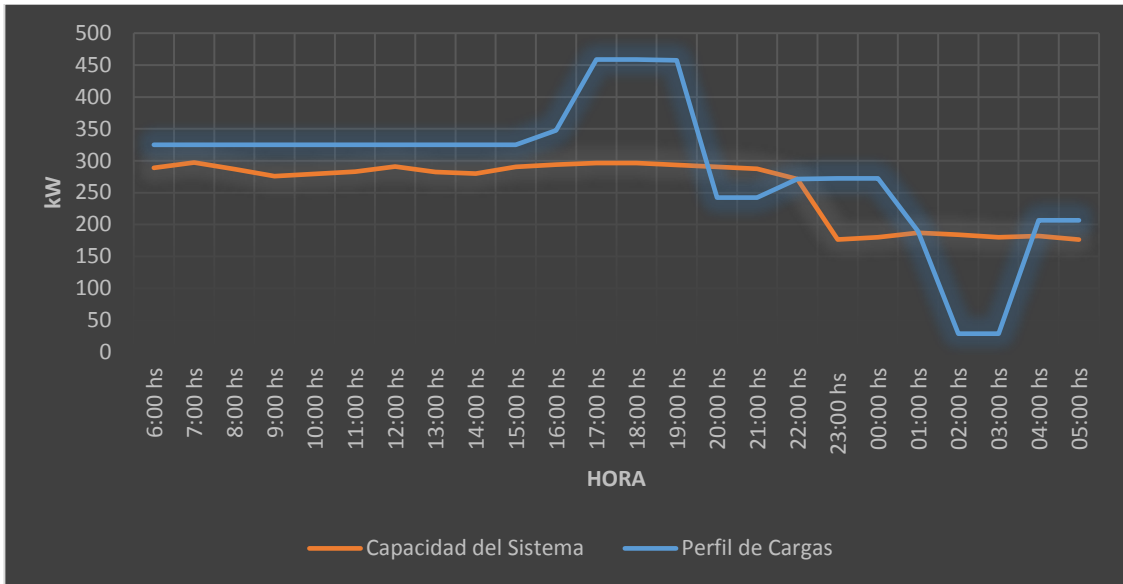
#### 4.4 ANÁLISIS DE LA CAPACIDAD DE REFRIGERACIÓN.

En la tabla 24, se encuentran los resultados obtenidos en los análisis previamente realizados.

**Tabla 24.** Tabla comparativa (Estado Real e ideal)

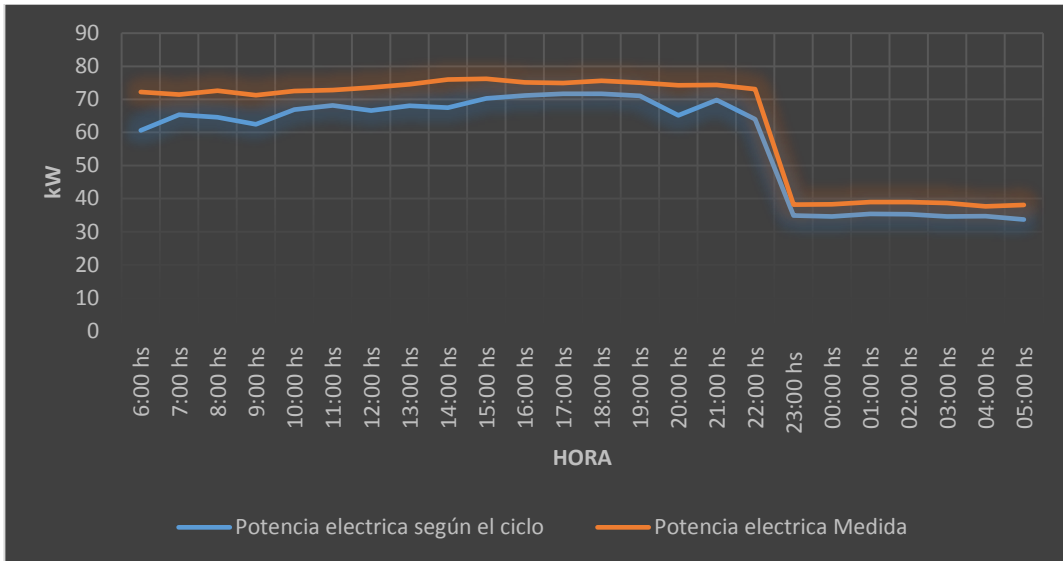
| HORA        | CARGA<br>TÉRMICA DE<br>LOS<br>PROCESOS<br>[kW] | CARGA TÉRMICA<br>DISIPADA POR EL<br>CICLO<br>TERMODINÁMICA<br>[kW] | POTENCIA DE LOS<br>COMPRESORES<br>SEGÚN EL CICLO<br>[kW] | POTENCIA<br>ELÉCTRICA<br>MEDIDA<br>[kW] |
|-------------|--|--|--|---|
| 6:00 a. m.  | 325,2  | 289,1  | 60,64  | 72,2                                    |
| 7:00 a. m.  | 325,2  | 297,2  | 65,34  | 71,4                                    |
| 8:00 a. m.  | 325,2  | 286,7  | 64,62  | 72,6                                    |
| 9:00 a. m.  | 325,2  | 276  | 62,47  | 71,2                                    |
| 10:00 a. m. | 325,2  | 279,4  | 66,88  | 72,5                                    |
| 11:00 a. m. | 325,2  | 282,8  | 68,19  | 72,8                                    |
| 12:00 p. m. | 325,2  | 291,1  | 66,66  | 73,6                                    |
| 1:00 p. m.  | 325,2  | 282,2  | 68,03  | 74,6                                    |
| 2:00 p. m.  | 325,2  | 279,9  | 67,48  | 76,0                                    |
| 3:00 p. m.  | 325,2  | 290,2  | 70,34  | 76,2                                    |
| 4:00 p. m.  | 347,6  | 293,9  | 71,18  | 75,2                                    |
| 5:00 p. m.  | 458,7  | 296,2  | 71,69  | 74,9                                    |
| 6:00 p. m.  | 458,7  | 296,2  | 71,69  | 75,6                                    |
| 7:00 p. m.  | 457,7  | 293,4  | 71,09  | 75,1                                    |
| 8:00 p. m.  | 242,4  | 290,6  | 65,17  | 74,3                                    |
| 9:00 p. m.  | 242,4  | 287,2  | 69,79  | 74,4                                    |
| 10:00 p. m. | 271,3  | 271,5  | 63,99  | 73,1                                    |
| 11:00 p. m. | 272,3  | 176,6  | 34,9   | 38,2                                    |
| 12:00 a. m. | 272,3  | 179,8  | 34,63  | 38,3                                    |
| 1:00 a. m.  | 189,6  | 187,1  | 35,39  | 39,0                                    |
| 2:00 a. m.  | 28,92  | 184,1  | 35,3   | 38,9                                    |
| 3:00 a. m.  | 28,92  | 179,8  | 34,63  | 38,7                                    |
| 4:00 a. m.  | 206,7  | 181,9  | 34,68  | 37,7                                    |
| 5:00 a. m.  | 206,7  | 176,4  | 33,7   | 38,1                                    |

**Figura 22.** Capacidad del Sistema vs Perfil de Cargas



Según la Figura 22, se visualiza el comportamiento que presenta el perfil de cargas térmicas en los procesos y la capacidad actual, se observa que entre los lapsos de 8 pm a 10 pm y 1 am a 4 am el perfil de cargas disminuye de modo que en esas horas el sistema se recupera, creando sobre la superficie del evaporador una capa de hielo con el fin de disipar las cargas altas que se registran entre las 5 pm a 7 pm.

**Figura 23.** Potencia Ideal vs Potencia Real



Según la figura 23, el valor determinado de la potencia de los compresores por el análisis termodinámico es menor que la potencia medida por el consumo eléctrico que presenta el motor del compresor. Se concluye que esa diferencia está relacionada con las pérdidas por calor en el motor eléctrico y las pérdidas de potencia por el sistema de transmisión.

## 5. DISEÑO DEL NUEVO SISTEMA DE REFRIGERACIÓN

A partir de la recopilación de datos del funcionamiento actual del sistema y de las características del sistema requerido por la planta, se debe hacer una selección del sistema de refrigeración con mayor eficiencia utilizado en la industria. Para poder determinar el sistema ideal se analizan los requerimientos del nuevo sistema.

**Tabla 25.** Requerimientos del nuevo sistema.

| PROCESO                            | Horario Funcionamiento |             | Temperatura deseada  |                       | FLUJO [L/h] | VOLUMEN [Litros] |
|------------------------------------|------------------------|-------------|----------------------|-----------------------|-------------|------------------|
|                                    | Inicio                 | Fin         | T <sub>in</sub> [°C] | T <sub>out</sub> [°C] |             |                  |
| Intercambiador de recibo de leche  | 06:00 a. m.            | 09:59 p. m. | 8                    | 4                     | 22.500      |                  |
| Intercambiador de retorno de leche | 06:00 a. m.            | 07:00 p. m. | 27                   | 4                     | 1.200       |                  |
| Esterilizador REDA 15.000 Litros   | 06:00 a. m.            | 07:00 p. m. | 35                   | 27                    | 15.000      |                  |
| Esterilizador 4000 Litros          | 06:00 a. m.            | 07:00 p. m. | 35                   | 27                    | 4.000       |                  |
| Pasteurizador UHT                  | 06:00 a. m.            | 11:59 p. m. | 15                   | 4                     | 10.000      |                  |
| Pasteurizador Tangelo              | 10:30 p. m.            | 03:40 a. m. | 30                   | 12,5                  | 4.000       |                  |
| Intercambiador de Yogurt           | 05:15 p. m.            | 01:30 a. m. | 30                   | 8                     |             | 15.720           |
| Tanque 0                           | 10:00 p. m.            | 01:30 a. m. | 42                   | 38                    |             | 6.080            |
| Tanque 1                           | 07:00 p. m.            | 10:00 p. m. | 42                   | 38                    |             | 5.560            |
| Tanque 2                           | 05:00 p. m.            | 06:55 p. m. | 42                   | 38                    |             | 4.080            |
| Intercambiador Mordazas            | 06:00 a. m.            | 03:00 p. m. | 25                   | 22                    | 3.600       |                  |

En la tabla N°. 25 a cada proceso se le especifica su hora de encendido y apagado, temperatura de entrada y temperatura requerida de salida y el flujo volumétrico o su volumen total a lo largo del proceso (horas de funcionamiento).

Las cargas de los intercambiadores se obtienen a partir de la expresión utilizada en el capítulo 3:

$$Q_{inter} = \dot{m}_{prod} C_{p_{prod}} (T_{in} - T_{out})$$

El flujo másico es dependiente del flujo volumétrico y este se encuentra en la tabla No 25 Los productos de cada proceso junto a sus características se encuentran en la tabla N°. 26:

**Tabla 26.** Características de los productos de cada proceso.

| PROCESO                            | Producto | Cp. (KJ/Kg °C) | ρ (Kg/m³) |
|------------------------------------|----------|----------------|-----------|
| Intercambiador de recibo de leche  | Leche    | 3,89           | 1030      |
| Intercambiador de retorno de leche | Leche    | 3,89           | 1030      |
| Esterilizador REDA 15.000 Litros   | Leche    | 3,89           | 1030      |
| Esterilizador 4.000 Litros         | Leche    | 3,89           | 1030      |
| Pasteurizador UHT                  | Leche    | 3,89           | 1030      |
| Pasteurizador Tangelo              | Tangelo  | 4,1            | 1010      |
| Intercambiador de Yogurt           | Yogurt   | 3,8            | 1080      |
| Tanque 0                           | Yogurt   | 3,8            | 1080      |
| Tanque 1                           | Yogurt   | 3,8            | 1080      |
| Tanque 2                           | Yogurt   | 3,8            | 1080      |
| Intercambiador Mordazas            | Yogurt   | 3,8            | 1080      |

La expresión para la obtención del flujo másico es la siguiente:

$$\dot{m}_{prod} = \dot{Q}_{prod} \rho_{prod}$$

Por consiguiente, la expresión para obtener las cargas térmicas quedaría así:

$$Q_{inter} = \dot{Q}_{prod} \rho_{prod} C_{p_{prod}} (T_{in} - T_{out})$$

En el caso de los procesos que tienen los volúmenes y no los flujos volumétricos solo basta con dividir en el número de horas que funciona tal proceso, se ejemplificara con el proceso del Tanque No 1

$$\dot{Q}_{T1} = \frac{V_{T1}}{\# \text{ horas funcionamiento } T1} = \frac{5.560 [m^3]}{3 [h]} = 1.853,33 \left[ \frac{m^3}{h} \right]$$

A partir de las expresiones y datos anteriores se obtienen las cargas de cada proceso.

**Tabla 27.** Carga requerida para cada proceso

| <b>PROCESO</b>                     | <b>Carga (KW)</b> |
|------------------------------------|-------------------|
| Intercambiador de recibo de leche  | 111,3             |
| Intercambiador de retorno de leche | 34,13             |
| Esterilizador REDA 15.000 Litros   | 148,4             |
| Esterilizador 4.000 Litros         | 39,57             |
| Pasteurizador UHT                  | 136               |
| Pasteurizador Tangelo              | 89,47             |
| Intercambiador de Yogurt           | 47,79             |
| Tanque 0                           | 16,04             |
| Tanque 1                           | 9,39              |
| Tanque 2                           | 5,906             |
| Intercambiador Mordazas            | 53,1              |

A partir de las cargas obtenidas en la tabla N°. 27 se puede observar que existen procesos de alto consumo y procesos de bajo consumo.

A partir de la tabla anterior podemos determinar que los sistemas de alta consumo son los procesos cuya carga supere la carga de 80 kW, por otra parte en los sistemas de bajo consumo se encuentran los procesos con carga menor a 80 kW.

#### **SISTEMAS DE ALTA CARGA.**

- Intercambiador de recibo de leche.
- Esterilizador REDA 15.000 litros
- Pasteurizador UHT
- Pasteurizador Tangelo

## **SISTEMAS DE BAJA CARGA.**

- Intercambiador de retorno de leche
- Esterilizador 4000 Litros
- Intercambiador de Yogurt
- Tanque 0
- Tanque 1
- Tanque 2
- Intercambiador Mordazas

Bajo los estudios realizados al sistema actual (Bancos de hielo) se puede afirmar que cuenta con la capacidad para soportar los procesos de bajo consumo, por otra parte, para los procesos de alto consumo este sistema es inadecuado debido a que no cuenta con la capacidad de disipar toda la carga. Para las cargas de alto consumo se recomienda la instalación de un nuevo sistema de refrigeración.

Entre los sistemas más eficientes desarrollados en los últimos años, están los sistemas de enfriamiento de agua tipo Chiller, cuyas características se pueden utilizar de manera rentable y eficiente en el nuevo sistema.

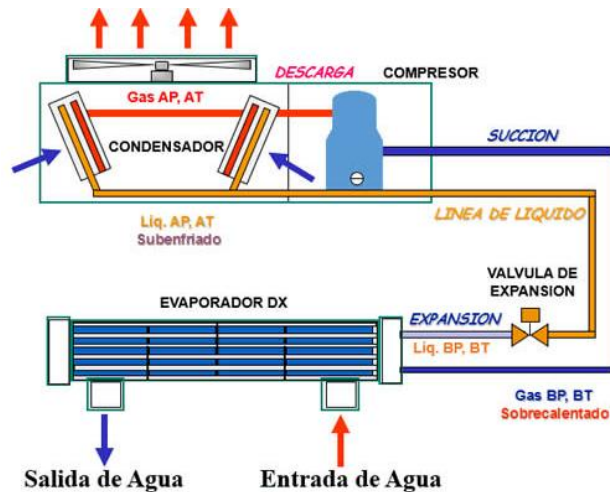
### **5.1 FUNCIONAMIENTO DE SISTEMA DE ENFRIAMIENTO DE AGUA-CHILLER.**

El agua que se requiere enfriar circula a través de un intercambiador. El flujo de agua transmitirá su calor al flujo del refrigerante, ya que estos se encuentran separados por la pared del tubo. El refrigerante, al recibir el calor, se evapora debido a sus características y a la baja presión de evaporación.

El refrigerante es extraído por el compresor, el cual lo envía como vapor a alta presión y alta temperatura hacia el condensador. En el condensador el calor es transmitido a un medio refrigerante, que bien puede ser agua o aire. El calor extraído

provoca que el refrigerante se condense a alta presión. El refrigerante en estado líquido a alta presión puede ser almacenado o enviado directamente a la válvula de expansión para su inyección en el evaporador y así reiniciar el ciclo.

**Figura 24.** Funcionamiento sistema de enfriamiento Chiller



Fuente: <http://www.skychillers.com/que-es-un-chiller.php>

## 5.2 PLANTEAMIENTO DEL NUEVO SISTEMA

La idea de la integrar estos dos sistemas es aprovechar las instalaciones ya existentes para ahorrar económicamente, también se busca un funcionamiento óptimo.

El nuevo diseño contaría con los bancos de hielo actuales y un nuevo Chiller que debe disipar las cargas actuales y las nuevas cargas, estos sistemas funcionarían con total independencia.

## **BENEFICIOS DEL NUEVO DISEÑO.**

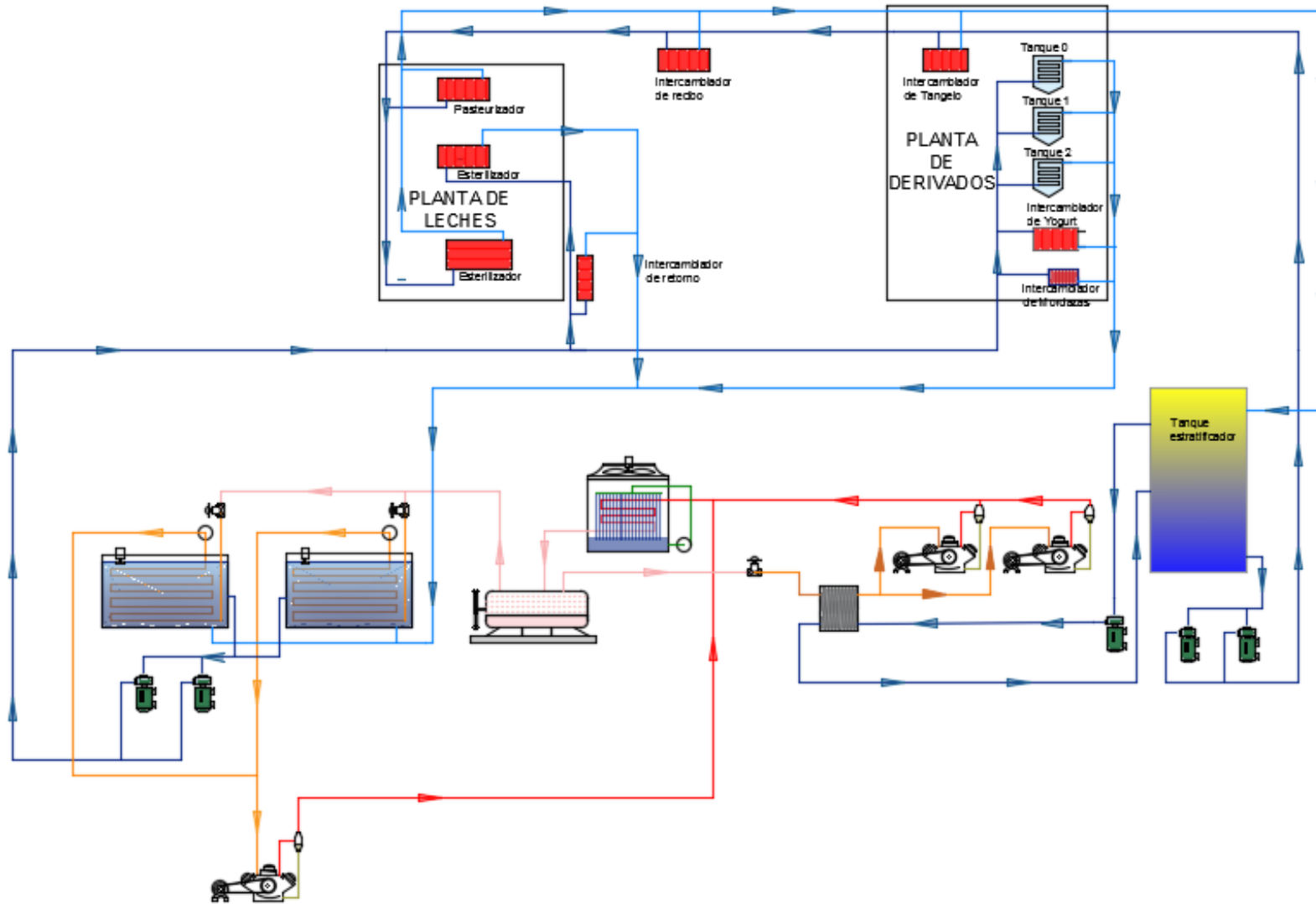
- Sistemas de producción refrigerados según requerimientos.
- Ahorro de energía eléctrica debido a mayor eficiencia por parte del sistema de refrigeración tipo Chiller integrado
- Ahorro de energía debido a que el Chiller cuenta con la capacidad de disipar calor según requiera el consumo.
- Mayor capacidad frigorífica debido a la suma de un sistema nuevo tipo Chiller (conlleva mayor capacidad de producción).

Con el horario de cada sistema se puede determinar las cargas energéticas a lo largo del día, este se consigue sumando los procesos de cada división (sistemas de alta y sistemas de baja) que se encuentran encendido a la hora respectiva.

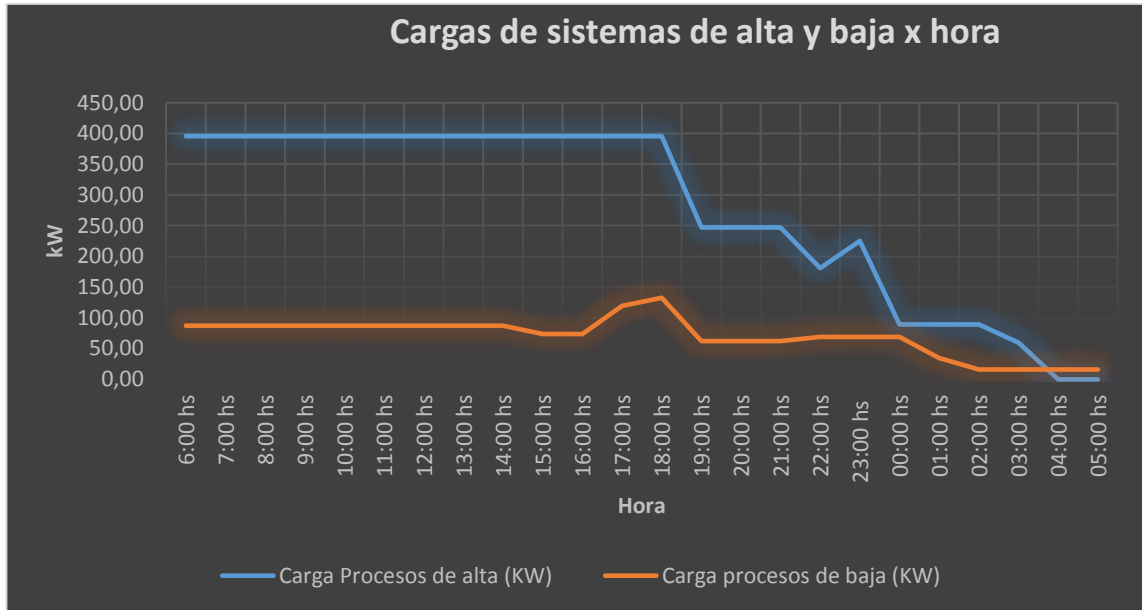
**Tabla 28.** Cargas térmicas en los procesos de alta y baja a lo largo del día

| <b>Hora (hs)</b> | <b>Carga Procesos de alta (KW)</b> | <b>Carga Procesos de alta (TR)</b> | <b>Carga procesos de baja (KW)</b> | <b>Carga procesos de baja (TR)</b> |
|------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| 06:00            | 395,70                             | 112,52                             | 87,38                              | 24,85                              |
| 07:00            | 395,70                             | 112,52                             | 87,38                              | 24,85                              |
| 08:00            | 395,70                             | 112,52                             | 87,38                              | 24,85                              |
| 09:00            | 395,70                             | 112,52                             | 87,38                              | 24,85                              |
| 10:00            | 395,70                             | 112,52                             | 87,38                              | 24,85                              |
| 11:00            | 395,70                             | 112,52                             | 87,38                              | 24,85                              |
| 12:00            | 395,70                             | 112,52                             | 87,38                              | 24,85                              |
| 13:00            | 395,70                             | 112,52                             | 87,38                              | 24,85                              |
| 14:00            | 395,70                             | 112,52                             | 87,38                              | 24,85                              |
| 15:00            | 395,70                             | 112,52                             | 73,70                              | 20,96                              |
| 16:00            | 395,70                             | 112,52                             | 73,70                              | 20,96                              |
| 17:00            | 395,70                             | 112,52                             | 119,40                             | 33,95                              |
| 18:00            | 395,70                             | 112,52                             | 132,70                             | 37,73                              |
| 19:00            | 247,30                             | 70,32                              | 62,49                              | 17,77                              |
| 20:00            | 247,30                             | 70,32                              | 62,49                              | 17,77                              |
| 21:00            | 247,30                             | 70,32                              | 62,49                              | 17,77                              |
| 22:00            | 180,80                             | 51,41                              | 69,14                              | 19,66                              |
| 23:00            | 225,50                             | 64,12                              | 69,14                              | 19,66                              |
| 00:00            | 89,47                              | 25,44                              | 69,14                              | 19,66                              |
| 01:00            | 89,47                              | 25,44                              | 34,57                              | 9,83                               |
| 02:00            | 89,47                              | 25,44                              | 16,04                              | 4,56                               |
| 03:00            | 59,64                              | 16,96                              | 16,04                              | 4,56                               |
| 04:00            | 0,00                               | 0,00                               | 16,04                              | 4,56                               |
| 05:00            | 0,00                               | 0,00                               | 16,04                              | 4,56                               |

Figura 25. Diseño del Nuevo sistema



**Figura 26.** Comparación entre cargas de sistemas de alto carga con sistemas de baja carga.



Como se puede observar en la figura 26, en el sistema de bajo consumo se encuentran cargas con las que fácilmente puede operar el banco de hielo con un compresor, cargas de máximo 37,73 TR (Tonelada de refrigeración), y el sistema de alta no supera la carga máxima de 112,52 TR, sin embargo, el sistema se diseña con el fin de soportar un crecimiento de producción en la planta que significa crecimiento en el sistema de refrigeración. Por ello se determina la selección de un Chiller de aproximadamente 140 TR.

**5.2.1 Selección de Chiller.** A partir del catálogo de Trane<sup>10</sup> para productos (Anexo O) se obtienen las características del Chiller.

Carga necesaria del sistema: 140 TR.

Temperatura de salida de agua helada: 40 °F Aproximadamente.

Descenso de temperatura: proyectada 10 °F Aproximadamente.

<sup>10</sup> TRANE. Catálogo de productos RLC-PRC001B-ES. Enero 2016, 19 p.

Temperatura ambiente: 85 °F Aproximadamente.

Para calcular el caudal de agua helada necesario se utiliza la siguiente expresión, a partir del anexo O

$$Gpm = T.R. \times 24 / \text{descenso de temperatura } (^\circ F)$$

Para los datos propuestos para la selección del Chiller

$$Gpm = 140 TR. \times 24 / 10 (^\circ F) = 336 Gpm$$

A partir de los datos propuestos para la selección de Chiller y la tabla de desempeño, un Chiller de 140 T.R. estándar producirá 138.0 TR con la potencia del compresor de 139,9 kW y una EER de unidad 10,9

**Figura 27.** Características del Chiller seleccionado.

| Temperatura de salida de agua helada del evaporador (F) | Modelo RTAC  | Temperatura del aire en la entrada del condensador (F) |             |      |         |             |     |         |             |     |         |             |     |
|---|--------------|--|-------------|------|---------|-------------|-----|---------|-------------|-----|---------|-------------|-----|
|   |              | 85   |             |      | 95      |             |     | 105     |             |     | 115     |             |     |
|   |              | Cap. TR  | Potencia kW | EER  | Cap. TR | Potencia kW | EER | Cap. TR | Potencia kW | EER | Cap. TR | Potencia kW | EER |
| 40  | 140 Estándar | 138.0  | 139.9       | 10.9 | 128.4   | 152.4       | 9.4 | 118.5   | 166.4       | 8.0 | 108.4   | 182.1       | 6.7 |
|   | 155 Estándar | 151.4  | 152.3       | 10.9 | 141.1   | 165.9       | 9.4 | 130.4   | 181.2       | 8.0 | 119.5   | 198.3       | 6.8 |
|   | 170 Estándar | 165.6  | 165.0       | 11.0 | 154.5   | 179.8       | 9.5 | 143.1   | 196.5       | 8.1 | 131.5   | 215.0       | 6.9 |
|   | 185 Estándar | 180.5  | 183.4       | 10.8 | 168.6   | 199.4       | 9.4 | 156.2   | 217.5       | 8.0 | 143.5   | 237.8       | 6.8 |
|   | 200 Estándar | 196.6  | 202.7       | 10.7 | 183.6   | 219.8       | 9.3 | 170.1   | 239.3       | 7.9 | 156.2   | 261.2       | 6.7 |
|   | 225 Estándar | 215.5  | 221.8       | 10.7 | 201.6   | 240.7       | 9.3 | 187.1   | 262.1       | 8.0 | 172.0   | 286.2       | 6.8 |
|   | 250 Estándar | 236.1  | 242.2       | 10.8 | 220.9   | 262.7       | 9.4 | 205.1   | 285.9       | 8.0 | 188.8   | 312.0       | 6.8 |
|   | 275 Estándar | 267.1  | 268.2       | 11.0 | 249.4   | 291.5       | 9.5 | 231.2   | 317.8       | 8.1 | 212.5   | 347.2       | 6.9 |
|   | 300 Estándar | 298.4  | 307.1       | 10.7 | 278.8   | 332.7       | 9.3 | 258.5   | 361.8       | 8.0 | 237.5   | 394.5       | 6.8 |
|   | 350 Estándar | 338.2  | 348.1       | 10.7 | 316.4   | 376.8       | 9.3 | 293.7   | 409.5       | 8.0 | 270.2   | 446.3       | 6.8 |

Fuente: [https://www.trane.com/content/dam/Trane/Commercial/lar/br/produtos-sistemas/equipamentos/Chillers/Chillers\\_Parafuso/Condensacao\\_Ar/RTAC-Serie\\_R/RTAC\\_Plus-Nacional/Catalogo\\_Produto-RTAC\(RLC-PRC001B%20ES\)%20small.pdf](https://www.trane.com/content/dam/Trane/Commercial/lar/br/produtos-sistemas/equipamentos/Chillers/Chillers_Parafuso/Condensacao_Ar/RTAC-Serie_R/RTAC_Plus-Nacional/Catalogo_Produto-RTAC(RLC-PRC001B%20ES)%20small.pdf)

Es posible conseguir temperatura de salida de agua helada menores a los 40 °F, a partir de una mezcla de agua-glicol en el Chiller. Según se menciona en el catálogo y en el ASHRAE con una concentración de glicol al 30 % se pueden conseguir temperaturas hasta de -15°C.

## 6. VIABILIDAD ECONÓMICA DEL DISEÑO PROPUESTO

Parte fundamental para la continuación y posterior implementación de un diseño es la viabilidad económica, para el nuevo diseño propuesto se realiza un análisis comparativo del consumo energético con el actual sistema de enfriamiento de la planta (Banco de hielo) para así determinar qué tan favorable es su ejecución.

El análisis comparativo se realizará a partir de las cargas ideales requeridas por el sistema.

**Tabla 29.** Cargas ideales requeridas en el nuevo sistema.

| <b>Hora (hs)</b> | <b>Cargas Nuevo diseño (KW)</b> |
|------------------|---------------------------------|
| 06:00            | 483,08                          |
| 07:00            | 483,08                          |
| 08:00            | 483,08                          |
| 09:00            | 483,08                          |
| 10:00            | 483,08                          |
| 11:00            | 483,08                          |
| 12:00            | 483,08                          |
| 13:00            | 483,08                          |
| 14:00            | 483,08                          |
| 15:00            | 469,4                           |
| 16:00            | 469,4                           |
| 17:00            | 515,1                           |
| 18:00            | 528,4                           |
| 19:00            | 309,79                          |
| 20:00            | 309,79                          |
| 21:00            | 309,79                          |
| 22:00            | 249,94                          |
| 23:00            | 294,64                          |
| 00:00            | 158,61                          |
| 01:00            | 124,04                          |
| 02:00            | 105,51                          |
| 03:00            | 75,68                           |
| 04:00            | 16,04                           |
| 05:00            | 16,04                           |

## 6.1 ANÁLISIS ECONÓMICO DEL ACTUAL SISTEMA (BANCOS DE HIELO) CON LAS CARGAS DE DISEÑO

Como se mencionó anteriormente el banco de hielo funciona de manera constante y disipa calor proporcionalmente a los compresores que funcionen en el sistema. Los bancos de hielo debido a que funcionan constantemente producen hielo cuando la carga requerida es menor a la carga que puede disipar el sistema, y por lo contrario cuando la carga requerida es mayor, el hielo acumulado se descongela compensando en el sistema la carga faltante.

Debido al principio de funcionamiento del banco de hielo, las cargas requeridas por el sistema y en base al análisis termodinámico realizado al actual sistema se determina que para su operación requerirá 3 de los 4 compresores existentes en la planta.

Los compresores utilizados para operar serian:

- Compresor Reciprocante Mycom 1 – 60 Hp
- Compresor Reciprocante Mycom 2 – 60 Hp
- Compresor Reciprocante Mycom 4 – 75 Hp

A partir del trabajo de estos compresores se logra disipar una carga constante de 444, 6 kW, es una carga media que permite acumulación de hielo en ciertas horas de bajo trabajo y su posterior descongelamiento en horas de alto trabajo.

Los tres compresores consumen un promedio de 107,6 kWh de energía eléctrica En un día de trabajo continuo se consumirán:

$$E_{dia} = E_{hora} \times \text{horas de trabajo} = 107,6 \text{ kWh} \times 24 \text{ h} = 2582,4 \text{ kWh}$$

Al mes se consumirá un total de:

$$E_{mes} = E_{dia} \times \text{dias de trabajo} = 2582,4 \text{ kWh} \times 30 \text{ dias} = 77472 \text{ kWh}$$

Y sabiendo que el costo eléctrico de la zona es de 341 \$/kWh, el costo de la electricidad en un mes seria:

$$\$E_{mes} = E_{mes} \times \text{costo energia/hora} = 77472 \text{ kWh} \times 341 \frac{\$}{\text{KWh}} = \$ 26'417.952$$

Se pagaría en un mes un total de 26'417.952 pesos, en un año sería un total de:

$$\begin{aligned} \$E_{\text{año}} &= \$E_{\text{año}} \times \text{meses de trabajo} = \$ 26'417.952 \times 12 \text{ meses} \\ &= \$ 317'015.424 \text{ Pesos} \end{aligned}$$

## 6.2 ANÁLISIS ECONÓMICO DEL NUEVO SISTEMA CON LAS CARGAS DE DISEÑO.

Como se menciona anteriormente, la propuesta del nuevo diseño integra los actuales bancos de hielo y un sistema de enfriamiento tipo Chiller con capacidad de 150 TR, el banco de hielo disipa el calor de los sistemas de menor carga térmica y por lo contrario el sistema tipo Chiller disipa las altas cargas de la planta, estas cargas se mencionan en la tabla No 28.

Según las cargas requeridas de baja, el banco de hielo solo necesitara para operar un compresor, se selecciona el Compresor Reciprocante Mycom 4 – 75 Hp trabajando con eficiencia volumétrica del 66 %.

Con el compresor Mycom 4 funcionando al 66 % se consume un total de 23,86 kWh y el banco de hielo cuenta con la capacidad de disipar 98,61 kW que es suficiente para las cargas requeridas.

El consumo eléctrico del banco de hielo en un día seria:

$$E_{\text{dia}} = E_{\text{hora}} \times \text{horas de trabajo} = 23,86 \text{ kWh} \times 24 \text{ h} = 572,64 \text{ kWh}$$

Para el análisis del sistema de enfriamiento tipo Chiller recurrimos a la eficiencia energética (EER) obtenida de las características del Chiller seleccionado, para este caso de 10,9

$$EER = \text{Potencia frigorífica} / \text{Potencia eléctrica consumida en refrigeración}$$

Sabemos que la potencia frigorífica son los de procesos de carga alta y se encuentran en la tabla No 28.

Para la obtención de los kWh consumidos por el Chiller solo basta con dividir las cargas disipadas entre la EER

$$\text{kWh} = \text{Carga}_{\text{kW}} / EER$$

El consumo del Chiller a lo largo del día viene dado en la siguiente tabla:

**Tabla 30.** Seguimiento del consumo energético del Chiller con las cargas requeridas en el nuevo sistema.

| Hora (hs) | Carga Procesos de alta (KW) | Consumo de energía kWh |
|-----------|-----------------------------|------------------------|
| 06:00     | 395,7                       | 36,30                  |
| 07:00     | 395,7                       | 36,30                  |
| 08:00     | 395,7                       | 36,30                  |
| 09:00     | 395,7                       | 36,30                  |
| 10:00     | 395,7                       | 36,30                  |
| 11:00     | 395,7                       | 36,30                  |
| 12:00     | 395,7                       | 36,30                  |
| 13:00     | 395,7                       | 36,30                  |
| 14:00     | 395,7                       | 36,30                  |
| 15:00     | 395,7                       | 36,30                  |
| 16:00     | 395,7                       | 36,30                  |
| 17:00     | 395,7                       | 36,30                  |
| 18:00     | 395,7                       | 36,30                  |
| 19:00     | 247,3                       | 22,69                  |
| 20:00     | 247,3                       | 22,69                  |
| 21:00     | 247,3                       | 22,69                  |
| 22:00     | 180,8                       | 16,59                  |
| 23:00     | 225,5                       | 20,69                  |
| 00:00     | 89,47                       | 8,21                   |
| 01:00     | 89,47                       | 8,21                   |
| 02:00     | 89,47                       | 8,21                   |
| 03:00     | 59,64                       | 5,47                   |
| 04:00     | 0                           | 0,00                   |
| 05:00     | 0                           | 0,00                   |
|           | Total:                      | 607,37                 |

A partir de la tabla anterior se denota que el consumo energético del Chiller a lo largo del día es de 607,37 kWh, esto sumado al consumo del banco de hielo tenemos el consumo total del diseño propuesto en un día.

$$E_{total} = E_{Chiller} + E_{Banco\ hielo} = 607,37 \text{ kWh} + 572,64 \text{ kWh} = 1180,01 \text{ kWh}$$

El consumo del diseño propuesto vendría siendo el producto del consumo al día por los días de funcionamiento a lo largo del mes

$$E_{mes} = E_{total} \times \text{días de trabajo} = 1180,01 \text{ kWh} \times 30 \text{ días} = 35400,3 \text{ kWh}$$

El valor de la energía eléctrica para este análisis viene siendo de 341 \$/kWh, el costo de energía al mes sería:

$$\$E_{mes} = E_{mes} \times \text{costo energía/hora} = 35400,3 \text{ kWh} \times 341 \frac{\$}{\text{kWh}} = \$ 12'071.502$$

En un mes el costo total de la energía es de 12'071.502 pesos, en un año sería un total de:

$$\$E_{año} = \$E_{año} \times \text{meses de trabajo} = \$ 12'071.502 \times 12 \text{ meses} = \$ 144'858.027$$

### 6.3 ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS DOS SISTEMAS

A partir de los análisis anteriores se observa que el diseño propuesto consume menos energía, la diferencia en el pago mensual es de:

$$\begin{aligned} \$E_{ahorrado\ mes} &= \$E_{mes\ diseño\ actual} - \$E_{mes\ diseño\ proouesto} \\ &= \$ 26'417.952 - \$ 12'071.502 = \$14'346.450 \end{aligned}$$

Lo que visualmente es una cantidad llamativa debido a que en un año el ahorro de energía eléctrica sería de:

$$\begin{aligned} \$E_{ahorrado\ año} &= \$E_{año\ diseño\ actual} - \$E_{año\ diseño\ proouesto} \\ &= \$ 317'015.424 - \$ 144'858.027 = \$172'157.397 \end{aligned}$$

Básicamente el porcentaje de energía ahorrado por el sistema propuesto comparado con el sistema actual sería:

$$\begin{aligned} \%E_{\text{ahorrado}} &= \frac{\$E_{\text{año diseño actual}} - \$E_{\text{año diseño proouesto}}}{\$E_{\text{año diseño actual}}} \times 100 \% \\ &= \frac{\$ 317'015.424 - \$ 144'858.027}{\$ 317'015.424} \times 100\% = 54 \% \end{aligned}$$

Un 54 % de ahorro de energía genera una alta probabilidad de viabilidad para su posterior ejecución, se debe tener en cuenta que el estudio se realiza a partir de una EER ideal para el Chiller.

## 7. RECOMENDACIONES

- Integrar medidores de caudal en las líneas de transporte de agua fría y en las líneas de transporte de producto para tener control de la energía térmica consumida en cada intercambiador y del funcionamiento de las bombas.
- Al actual sistema de banco de hielos se recomienda mantener continuamente encendido los dos compresores con revisiones esporádicas del espesor del hielo, la razón es que en las bajas horas de demanda normalmente se apaga un compresor, mantener los dos compresores encendidos lograría que el sistema se recupere y pueda compensar las altas horas de demanda de frío, sin embargo se debe mantener control de la cantidad de hielo debido a que el funcionamiento de los procesos no es continuo ni consume igual todos los días, puede existir excesiva acumulación de hielo que causaría ineficiencia y consumos innecesarios de energía.
- Se recomiendan termómetros en las salidas y entradas de los intercambiadores tanto del producto como del agua fría, esto con el fin de controlar la temperatura de los productos, verificar si mantienen la temperatura deseada del proceso.
- Se recomienda tener una mejor administración de la información acerca de los equipos existentes y sus respectivas modificaciones para un control del funcionamiento tanto de la planta como del equipo, sus características son indispensables para el análisis de los sistemas.

## 8. CONCLUSIONES

- El desarrollo del presente proyecto permitió aplicar los conocimientos adquiridos en las áreas de termodinámica, transferencia de calor y mecánica de fluidos en el análisis de funcionamiento del sistema de refrigeración de planta de Freskaleche S.A.S Bucaramanga fortaleciendo las relaciones industria-universidad.
- Se determinó que las cargas requeridas por el sistema son mayores a las ofrecidas por el sistema de refrigeración, lo que significa que el sistema no opera adecuadamente.
- Obteniendo información del debido funcionamiento de los actuales y nuevos sistemas de producción se realizó un diseño en el que se separan los procesos de alto consumo y procesos de bajo consumo para ser refrigerados por un sistema tipo Chiller y el actual sistema de bancos de hielo, respectivamente, que corresponde a un diseño funcional y económico para la planta.
- Se realizó un estudio económico respecto a la energía consumida entre el nuevo diseño de refrigeración y el actual diseño de refrigeración obteniendo con el nuevo diseño un ahorro de hasta el 54% de energía eléctrica, se debe tener en cuenta que el estudio se realiza con la eficiencia ideal.

## BIBLIOGRAFÍA

CENGEL, Yunus; BOLES, Michael. Termodinámica. Traducido por Virgilio González y Sergio Sarmiento. 7 ed. México D. F.: McGraw-Hill. 2009. 1042p. ISBN 978-607-15-0743-3.

CENGEL, Yunus; GHAJAR, Afshin. Transferencia de Calor y Masa: Fundamentos y aplicaciones. Traducido por Erika Jasso y Hernan D’Borneville. 4 ed. Mexico D.F.: McGraw-Hill. 2011. 946 p. ISBN 978-607-15-0540-8.

COLOMBIA, MINISTERIO DE LA PROTECCION SOCIAL. Decreto 616 (28, Febrero, 2006). Por el cual se expide el reglamento técnico sobre los requisitos que se debe cumplir la leche para el consumo humano que se obtenga, procese, envase, transporte, comercializa, expendia, importe o exporte del país. Bogotá D.C.: El Ministerio. 32.

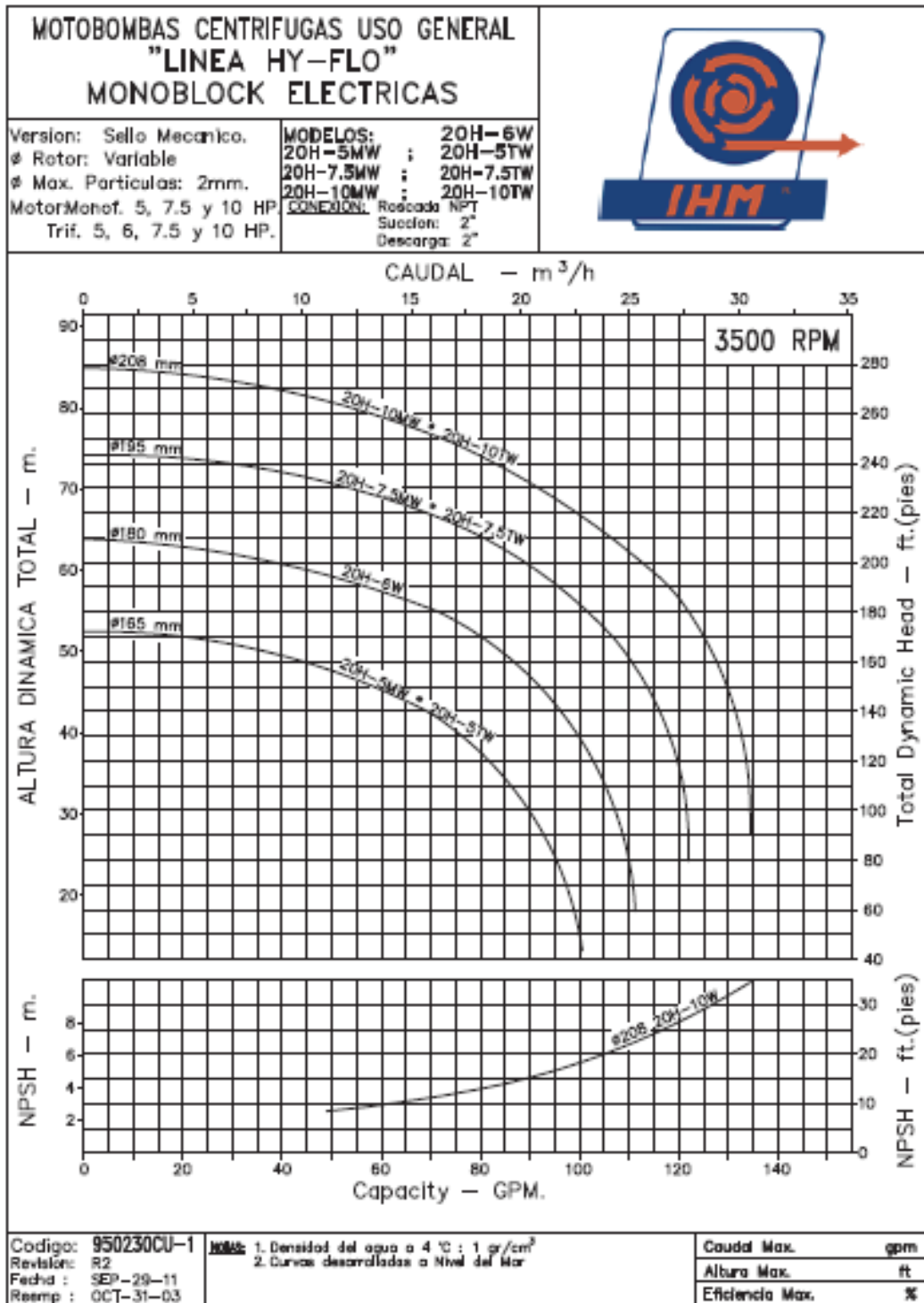
ASHRAE, Handbook - refrigeration, American society of Heating, Refrigerating and Air conditioning Engineers, Atlanta, 2014.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Trabajos escritos, presentación y referencias bibliográficas. Bogotá D.C. ICONTEC, 2008, 110 p.

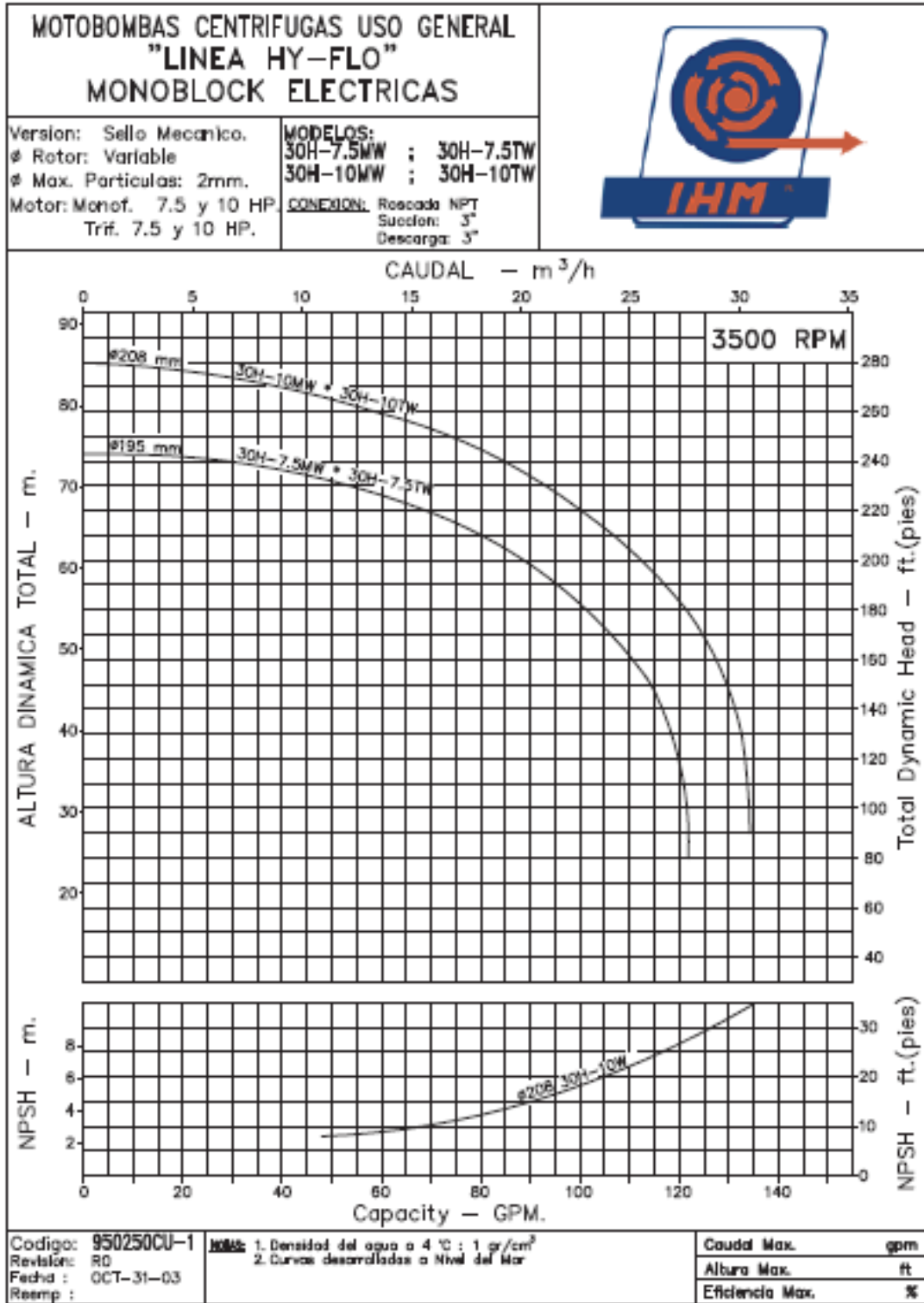
TRANE. Catálogo de productos RLC-PRC001B-ES. Enero 2016, 19 p.

## ANEXOS

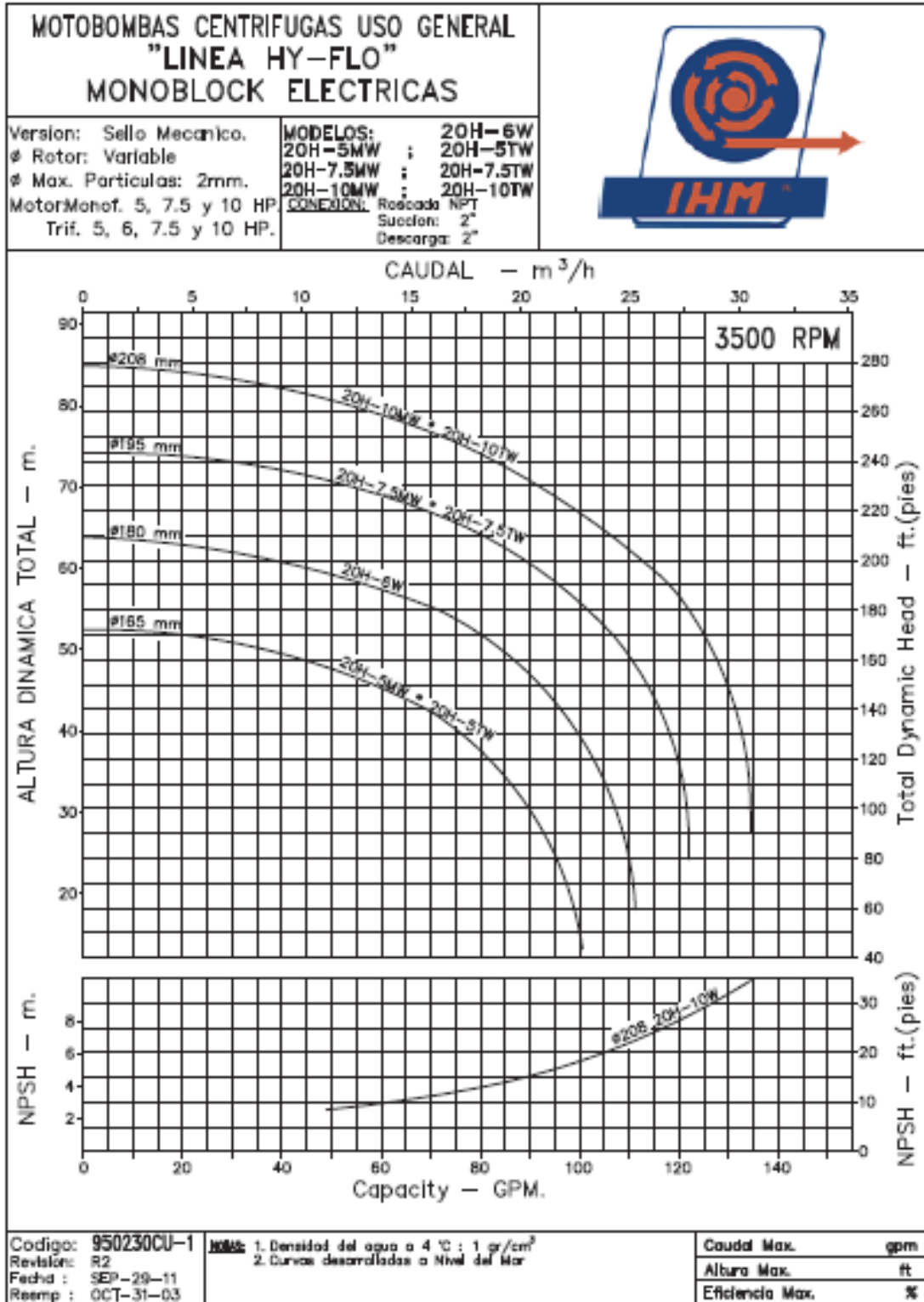
### Anexo A. Curva de eficiencia bomba auxiliar derivados-20H-6W IHM



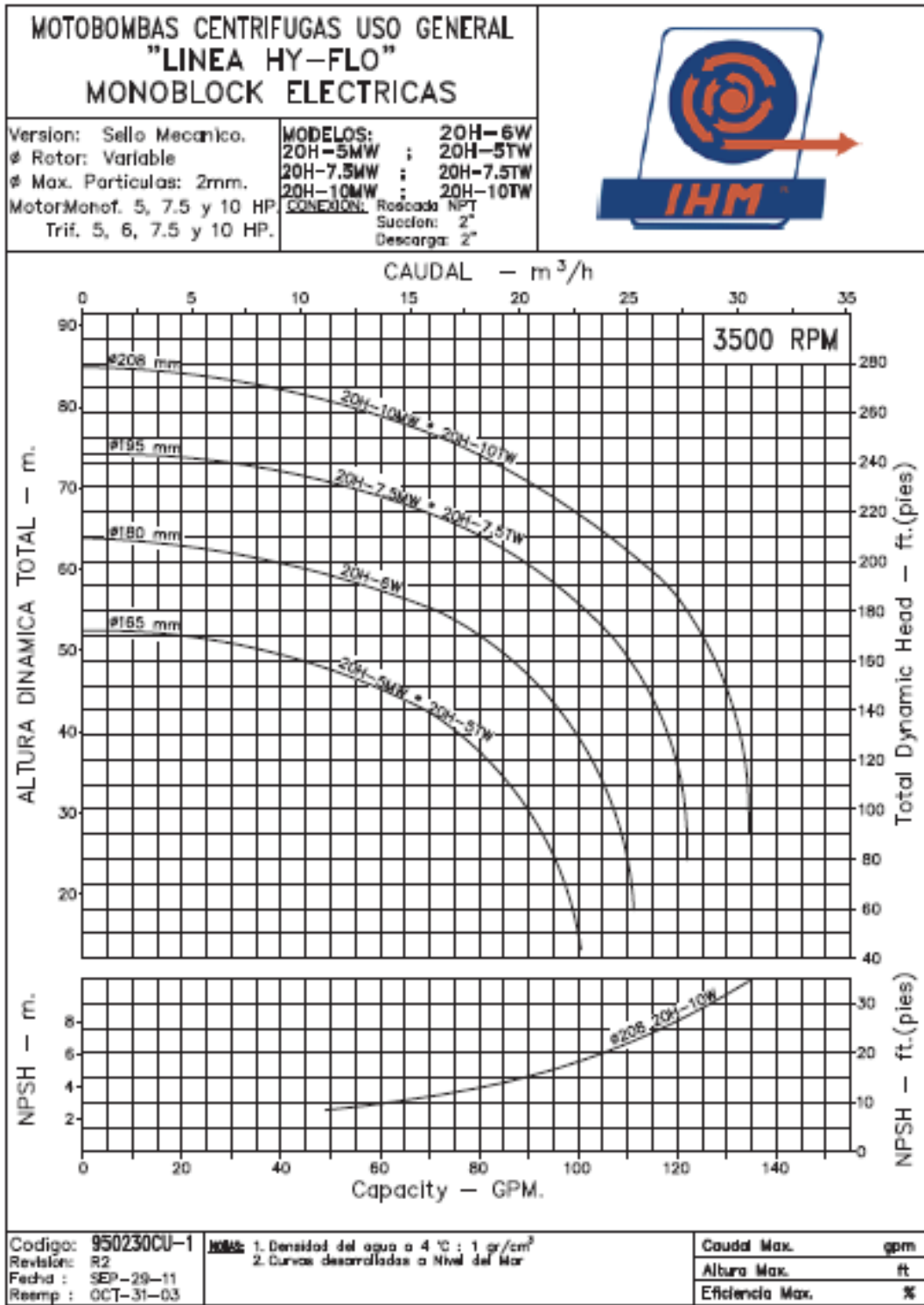
**Anexo B. Curva de eficiencia bomba auxiliar leche-30H-10Tw IHM**



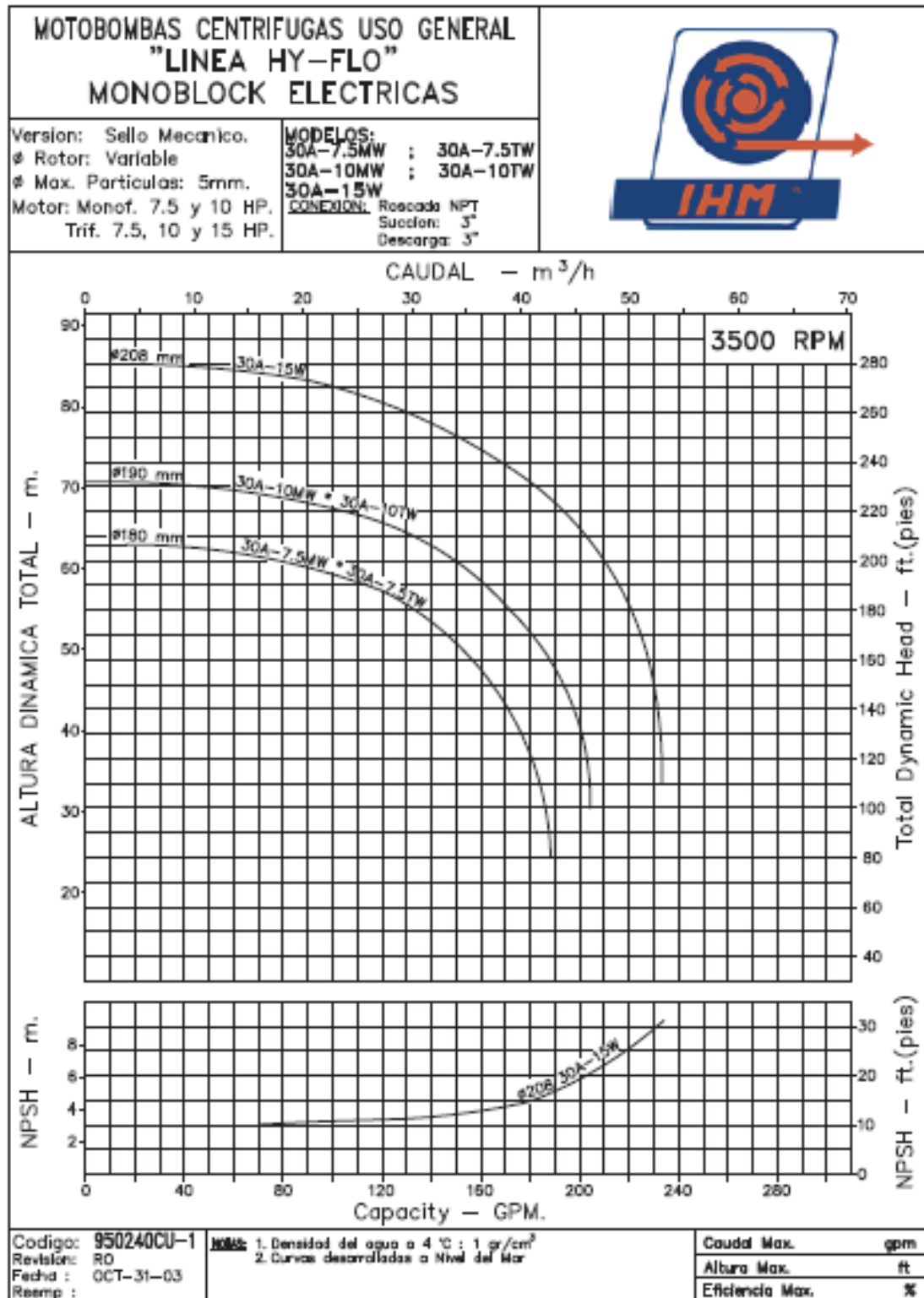
**Anexo C. Curva de eficiencia bomba de Tanque 0-20H-6W IHM**



**Anexo D. Curva de eficiencia bomba principal derivados-20H-7,5Tw IHM.**



**Anexo E. Curva de eficiencia bomba principal leche-30A-15W IHM.**



## Anexo F. Curva de eficiencia bomba Tangelo 6,6 Hp Barnes



www.barnes.com.co

una marca de



**Bombas Autocebantes**  
con motor eléctrico

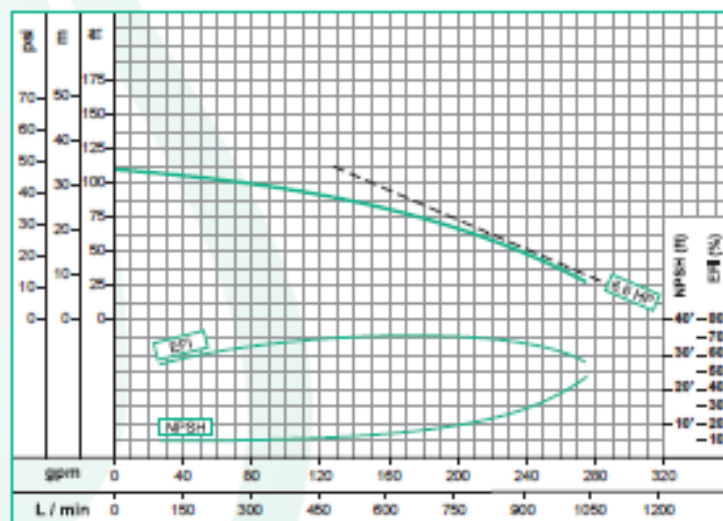
**AE 3 66**

| Características de la bomba |                               |  |            |            |           |                 |
|-----------------------------|-------------------------------|--|------------|------------|-----------|-----------------|
| Tipo de bomba               | Acoplamiento                  | Tipo de impulsor                               |            |            |           |                 |
| Centrífuga                  | Monobloque                    | Semibloque, balanceado dinámicamente (ISO 663) |            |            |           |                 |
| Etapas                      | Cierre del eje                | Temperatura máx. líquido                       |            | Ø Sólidos  |           |                 |
| 1                           | Sello mecánico 1 1/4" Tipo 21 | 70°C (152°F) Continuo                          |            | 3/16"      |           |                 |
| Modelo                      | Ref.                          | Ø Succión                                      | Ø Descarga | Ø Impulsor | Peso (kg) | H máx. (mca) *  |
| AE 3 66                     | 100504                        | 3" NPT   | 3" NPT     | 5,500"     | 66,0      | 34              |
|                             |                               |  |            |            |           | Q máx. (gpm) ** |
|                             |                               |  |            |            |           | 275             |

| Características del motor |       |                 |            |
|---------------------------|-------|-----------------|------------|
| Alimentación              |       | Velocidad (rpm) |            |
| Eléctrica                 |       | 3.600 (nominal) |            |
| Cerramiento               |       | Frecuencia (Hz) |            |
| TEFC                      |       | 60              |            |
| Potencia (hp)             | Fases | Voltaje (V)     | Frame      |
| 6,6                       | 3     | 220/440         | NEMA 184JM |

\* La altura (H) máxima se logra con la válvula totalmente cerrada. (mca= metros columna de agua).  
 \*\* El caudal (Q) máximo se logra con la válvula totalmente abierta. (gpm= galones por minuto).

### Curva de rendimiento



### Aplicaciones

Uso doméstico  
Sector agrícola  
Industria  
Construcción  
Institucional

- Acueductos
- Bombeo de agua con sólidos en suspensión
- Desagüe de cajas telefónicas y eléctricas
- Desagüe de zonas inundadas
- Industria Petrolera
- Industria Petroquímica
- Industria Química
- Manejo de aguas residuales o negras
- Manejo de combustibles
- Plantas de tratamiento
- Recirculación de agua
- Recirculación de agua en piscinas y en torres de enfriamiento
- Riego de estérrol
- Riego por aspersión
- Riego por goteo
- Riego por inundación

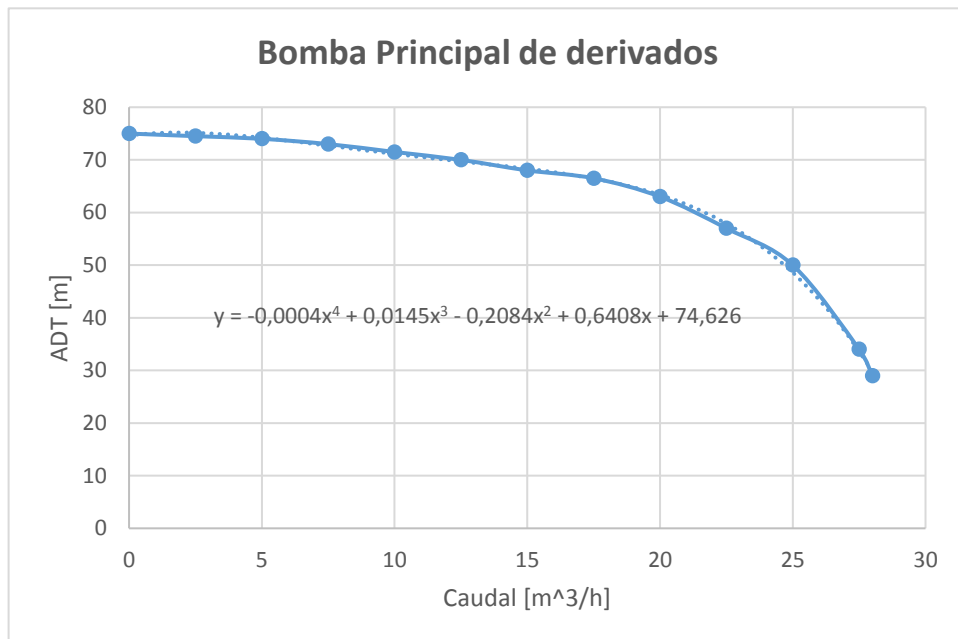
Nota: Las especificaciones técnicas están sujetas a cambios sin previo aviso.

Fecha última revisión  
2014-11-21

## Anexo G. Interpolación de bombas

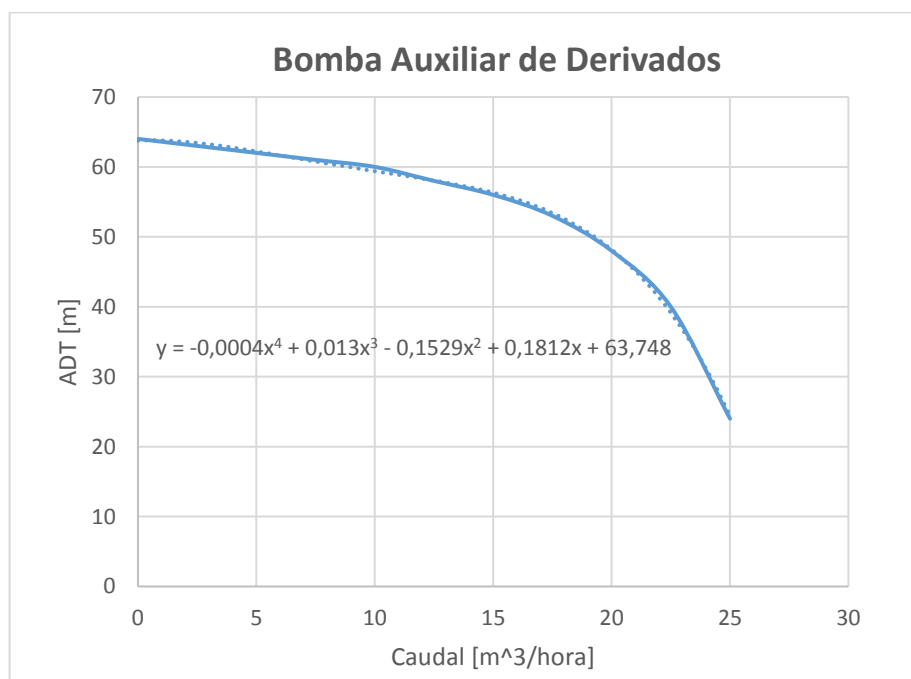
### Interpolación Bomba Principal de Derivados

| Bomba Principal de Derivados |                       |
|------------------------------|-----------------------|
| ADT (m)                      | Q (m <sup>3</sup> /h) |
| 75                           | 0                     |
| 74,5                         | 2,5                   |
| 74                           | 5                     |
| 73                           | 7,5                   |
| 71,5                         | 10                    |
| 70                           | 12,5                  |
| 68                           | 15                    |
| 66,5                         | 17,5                  |
| 63                           | 20                    |
| 57                           | 22,5                  |
| 50                           | 25                    |
| 34                           | 27,5                  |
| 29                           | 28                    |



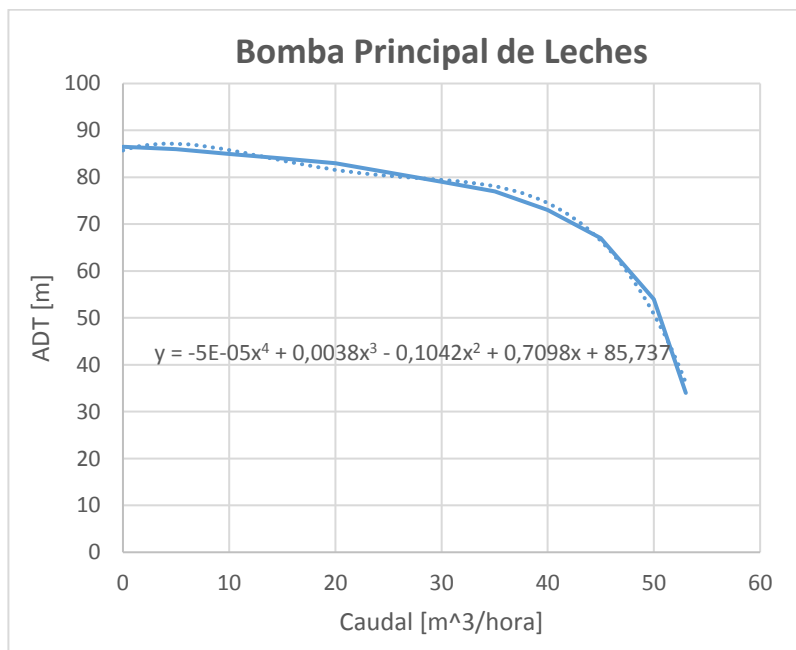
## Interpolación Bomba Auxiliar de Derivados

| Bomba Auxiliar de Derivados |          |
|-----------------------------|----------|
| ADT (m)                     | Q (m3/h) |
| 64                          | 0        |
| 63                          | 2,5      |
| 62                          | 5        |
| 61                          | 7,5      |
| 60                          | 10       |
| 58                          | 12,5     |
| 56                          | 15       |
| 53                          | 17,5     |
| 48                          | 20       |
| 40                          | 22,5     |
| 24                          | 25       |



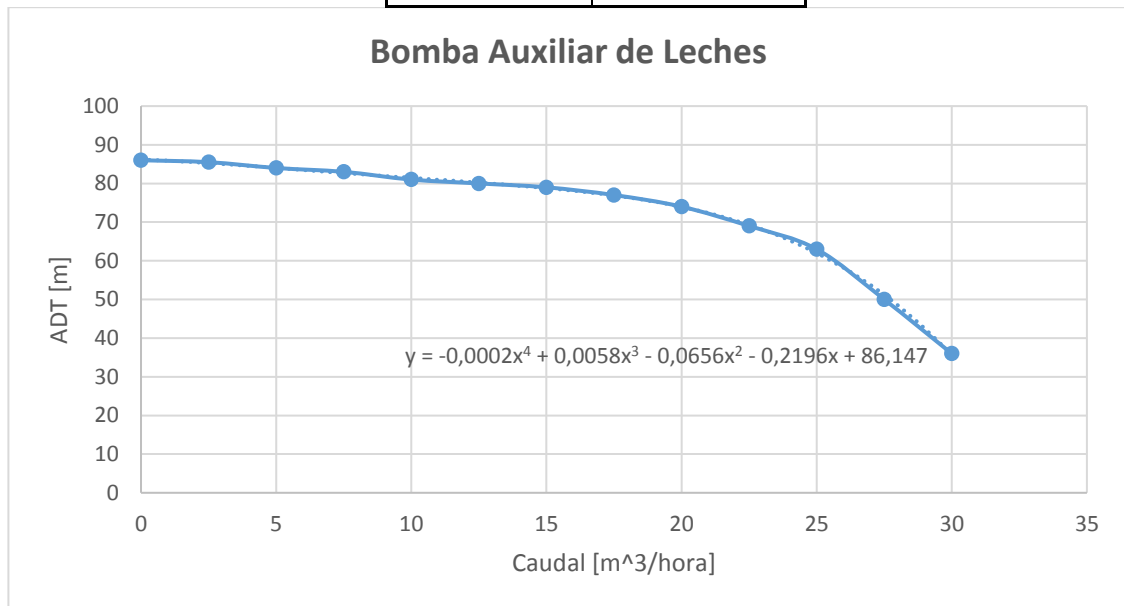
## Interpolación Bomba principal de leches

| Bomba Principal de Leches |          |
|---------------------------|----------|
| ADT (m)                   | Q (m3/h) |
| 86,5                      | 0        |
| 86                        | 5        |
| 85                        | 10       |
| 84                        | 15       |
| 83                        | 20       |
| 81                        | 25       |
| 79                        | 30       |
| 77                        | 35       |
| 73                        | 40       |
| 67                        | 45       |
| 54                        | 50       |
| 34                        | 53       |



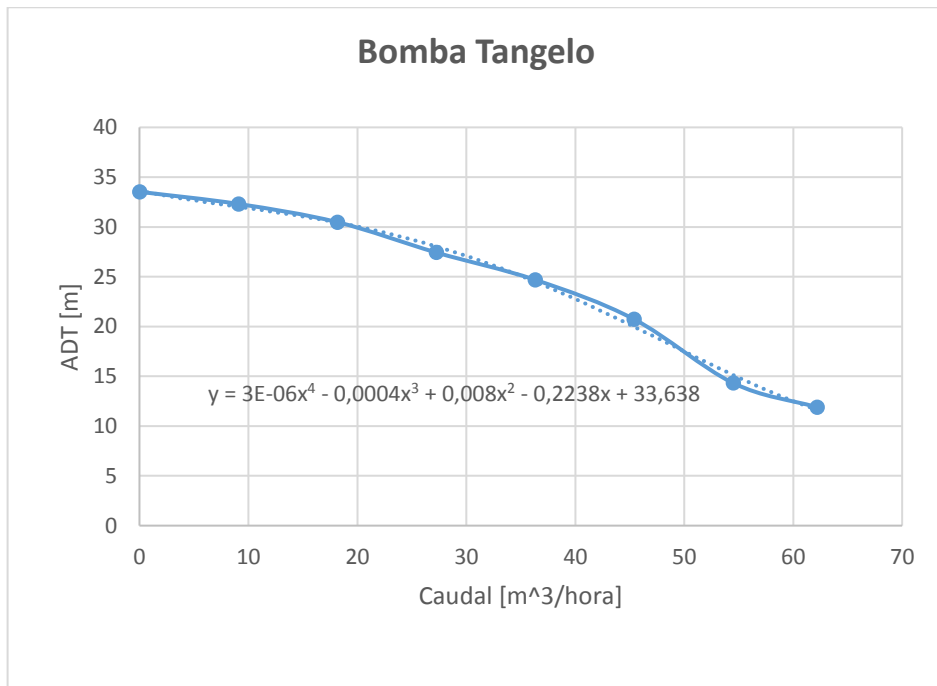
## Interpolación Bomba Auxiliar de leches

| Bomba Auxiliar de Leches |          |
|--------------------------|----------|
| ADT (m)                  | Q (m3/h) |
| 86                       | 0        |
| 85,5                     | 2,5      |
| 84                       | 5        |
| 83                       | 7,5      |
| 81                       | 10       |
| 80                       | 12,5     |
| 79                       | 15       |
| 77                       | 17,5     |
| 74                       | 20       |
| 69                       | 22,5     |
| 63                       | 25       |
| 50                       | 27,5     |
| 36                       | 30       |



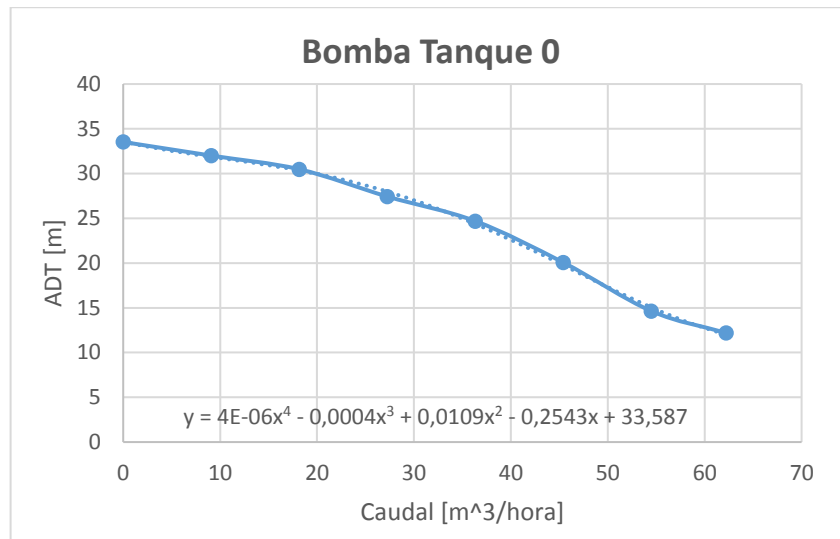
## Interpolación Bomba Tangelo

| <b>Bomba Tangelo</b> |          |
|----------------------|----------|
| ADT (m)              | Q (m3/h) |
| 33,528               | 0        |
| 32,3088              | 9,08     |
| 30,48                | 18,16    |
| 27,432               | 27,24    |
| 24,6888              | 36,32    |
| 20,7264              | 45,4     |
| 14,3256              | 54,48    |
| 11,8872              | 62,198   |



## Interpolación Bomba tanque 0

| Bomba Tanque 0 |          |
|----------------|----------|
| ADT (m)        | Q (m3/h) |
| 33,528         | 0        |
| 32,004         | 9,0839   |
| 30,48          | 18,1679  |
| 27,432         | 27,2519  |
| 24,688         | 36,3359  |
| 20,056         | 45,4199  |
| 14,6304        | 54,5039  |
| 12,192         | 62,2253  |



## Anexo H. Calculo de caudales de bombas

### "Datos constantes"

$$g = 9,81 \text{ [m/s}^2\text{]}$$
$$\rho_{\text{agua}} = \text{density}(\text{Water}; T = 0; P = P_{\text{pd}})$$
$$P_{\text{atm}} = 101325 \text{ [pa]}$$

### "Análisis bomba principal de derivados"

$$ADT_{\text{pd}} = (h_{\text{d}}_{\text{pd}} - h_{\text{s}}_{\text{pd}}) + h_{\text{fs}}_{\text{pd}} + h_{\text{fd}}_{\text{pd}} + V_{\text{d}}_{\text{pd}} / (2 * g)$$
$$h_{\text{s}}_{\text{pd}} = 3 \text{ [m]}$$
$$P_{\text{d}}_{\text{pd}} = \rho_{\text{agua}} * g * h_{\text{d}}_{\text{pd}}$$
$$P_{\text{d}}_{\text{pd}} = P_{\text{manpd}} + P_{\text{atm}}$$
$$h_{\text{fs}}_{\text{pd}} = 4 \text{ [m]}$$
$$h_{\text{fd}}_{\text{pd}} = 7 \text{ [m]}$$
$$P_{\text{manpd}} = 74 * \text{convert}(\text{psi}; \text{pa})$$

$$Q_{\text{s}}_{\text{pd}} = V_{\text{d}}_{\text{pd}} * A_{\text{tubpd}}$$
$$A_{\text{tubpd}} = \pi / 4 * D_{\text{pd}}^2$$
$$D_{\text{pd}} = 2 * \text{convert}(\text{in}; \text{m})$$
$$Q_{\text{s}}_{\text{hpd}} = Q_{\text{s}}_{\text{pd}} * 60 * 60 \text{ "se convierte a flujo volumetrico por hora"}$$

$$ADT_{\text{pd}} = -0,0004 * Q_{\text{s}}_{\text{hpd}}^4 + 0,0145 * Q_{\text{s}}_{\text{hpd}}^3 - 0,2084 * Q_{\text{s}}_{\text{hpd}}^2 + 0,6408 * Q_{\text{s}}_{\text{hpd}} + 74,626$$

### "Análisis bomba auxiliar de derivados"

$$ADT_{\text{ad}} = (h_{\text{d}}_{\text{ad}} - h_{\text{s}}_{\text{ad}}) + h_{\text{fs}}_{\text{ad}} + h_{\text{fd}}_{\text{ad}} + V_{\text{d}}_{\text{ad}} / (2 * g)$$
$$h_{\text{s}}_{\text{ad}} = 3 \text{ [m]}$$
$$P_{\text{d}}_{\text{ad}} = \rho_{\text{agua}} * g * h_{\text{d}}_{\text{ad}}$$
$$P_{\text{d}}_{\text{ad}} = P_{\text{manad}} + P_{\text{atm}}$$
$$h_{\text{fs}}_{\text{ad}} = 4 \text{ [m]}$$
$$h_{\text{fd}}_{\text{ad}} = 7 \text{ [m]}$$
$$P_{\text{manad}} = 74 * \text{convert}(\text{psi}; \text{pa})$$

$$Q_{\text{s}}_{\text{ad}} = V_{\text{d}}_{\text{ad}} * A_{\text{tubad}}$$
$$A_{\text{tubad}} = \pi / 4 * D_{\text{ad}}^2$$
$$D_{\text{ad}} = 2 * \text{convert}(\text{in}; \text{m})$$
$$Q_{\text{s}}_{\text{had}} = Q_{\text{s}}_{\text{ad}} * 60 * 60 \text{ "se convierte a flujo volumetrico por hora"}$$

$$ADT_{ad} = -0,0004 * Qs_{had}^4 + 0,0142 * Qs_{had}^3 - 0,1694 * Qs_{had}^2 + 0,2493 * Qs_{had} + 64,42$$

*"Ecuacion de la curva de la bomba"*

*"Analisis bomba principal de Leches"*

$$ADT_{pl} = (hd_{pl} - hs_{pl}) + hfs_{pl} + hfd_{pl} + Vd_{pl}/(2 * g)$$

$$hs_{pl} = 3 [m]$$

$$Pd_{pl} = rho_{agua} * g * hd_{pl}$$

$$Pd_{pl} = P_{manpl} + P_{atm}$$

$$hfs_{pl} = 4 [m]$$

$$hfd_{pl} = 7 [m]$$

$$P_{manpl} = 95 * convert(psi; pa)$$

$$Qs_{pl} = Vd_{pl} * A_{tubpl}$$

$$A_{tubpl} = pi/4 * D_{pl}^2$$

$$D_{pl} = 3 * convert(in; m)$$

$$Qs_{hpl} = Qs_{pl} * 60 * 60 \text{ "se convierte a flujo volumetrico por hora"}$$

$$ADT_{pl} = -3E - 05 * Qs_{hpl}^4 + 0,0027 * Qs_{hpl}^3 - 0,0891 * Qs_{hpl}^2 + 1,1149 * Qs_{hpl} + 80,46"$$

$$ADT_{pl} = -5E - 05 * Qs_{hpl}^4 + 0,0038 * Qs_{hpl}^3 - 0,1042 * Qs_{hpl}^2 + 0,7098 * Qs_{hpl} + 85,737$$

*"Ecuacion de la curva de la bomba"*

*"Analisis bomba auxiliar de Leches"*

$$ADT_{al} = (hd_{al} - hs_{al}) + hfs_{al} + hfd_{al} + Vd_{al}/(2 * g)$$

$$hs_{al} = 3 [m]$$

$$Pd_{al} = rho_{agua} * g * hd_{al}$$

$$Pd_{al} = P_{manal} + P_{atm}$$

$$hfs_{al} = 4 [m]$$

$$hfd_{al} = 7 [m]$$

$$P_{manal} = 85 * convert(psi; pa)$$

$$Qs_{al} = Vd_{al} * A_{tubal}$$

$$A_{tubal} = pi/4 * D_{al}^2$$

$$D_{al} = 3 * convert(in; m)$$

$$Qs_{hal} = Qs_{al} * 60 * 60 \text{ "se convierte a flujo volumetrico por hora"}$$

*"Ecuacion de la curva de la bomba"*

$$ADT_{al} = -0,0002 * Qs_{hal}^4 + 0,0058 * Qs_{hal}^3 - 0,0656 * Qs_{hal}^2 - 0,2196 * Qs_{hal} + 86,147$$

*"Caudales totales"*

*"Caudal de derivados"*

$$Qs_d = Qs_{had} + Qs_{hpd}$$

*"Caudal de leches"*

$$Qs_l = Qs_{hal} + Qs_{hpl}$$

*"Analisis bomba Tangelo"*

$$ADT_{Tan} = (hd_{Tan} - hs_{Tan}) + hfs_{Tan} + hfd_{Tan} + Vd_{Tan}/(2 * g)$$

$$hs_{Tan} = 3 [m]$$

$$Pd_{Tan} = rho_{agua} * g * hd_{Tan}$$

$$Pd_{Tan} = P_{manTan} + P_{atm}$$

$$hfs_{Tan} = 5 [m]$$

$$hfd_{Tan} = 5 [m]$$

$$P_{manTan} = 28 * convert(psi; pa)$$

$$Qs_{al} = Vd_{Tan} * A_{tubTan}$$

$$A_{tubTan} = pi/4 * D_{Tan}^2$$

$$D_{Tan} = 3 * convert(in; m)$$

$$Qs_{hTan} = Qs_{Tan} * 60 * 60 \text{ "se convierte a flujo volumetrico por hora"}$$

$$ADT_{Tan} = 3E - 06 * Qs_{hTan}^4 - 0,0004 * Qs_{hTan}^3 + 0,008 * Qs_{hTan}^2 - 0,2238 * Qs_{hTan} + 33,638$$

*"Ecuacion de la curva de la bomba"*

*"Analisis bomba Tanque 0"*

$$ADT_{T0} = (hd_{T0} - hs_{T0}) + hfs_{T0} + hfd_{T0} + Vd_{T0}/(2 * g)$$

$$hs_{T0} = 3 [m]$$

$$Pd_{T0} = rho_{agua} * g * hd_{T0}$$

$$\begin{aligned}Pd_{T0} &= P_{manT0} + P_{atm} \\hfs_{T0} &= 4 \text{ [m]} \\hfd_{T0} &= 7 \text{ [m]} \\P_{manT0} &= 75 * \text{convert}(\text{psi}; \text{pa})\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}Qs_{al} &= Vd_{T0} * A_{tubT0} \\A_{tubT0} &= \pi/4 * D_{T0}^2 \\D_{T0} &= 2 * \text{convert}(\text{in}; \text{m}) \\Qs_{hT0} &= Qs_{T0} * 60 * 60 \text{ "*se convierte a flujo volumetrico por hora*"}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}ADT_{T0} &= -0,0004 * Qs_{hT0}^4 + 0,0142 * Qs_{hT0}^3 - 0,1694 * Qs_{hT0}^2 \\&\quad + 0,2493 * Qs_{hT0} + 64,42 \\&\text{"*Ecuacion de la curva de la bomba*"}\end{aligned}$$

## Anexo I. Análisis temperatura de tubería.

### "Análisis de convección natural, externa"

$T_{amb} = 30 [C]$   
 $T_{supext} = 8,8 [C]$   
 $P_{amb} = 101,325 [Kpa]$   
 $omega = 0,74$   
 $D_{nom} = 1,5 [in]$   
 $D_{ext} = 48,3 * convert(mm; m)$   
 $espe = 3,68 * convert(mm; m)$  "Celula 40"  
 $D_{int} = D_{ext} - espe$   
 $g = 9,81 [m/s^2]$   
 $L = 1[m]$   
 $Emis = 0,1$  "Emisividad del acero inoxidable"

$Sigma = 5,67E - 8 [W/m^2 * K^4]$

$T_f = (T_{amb} + T_{supext})/2$

### "Propiedades del aire"

$k_{air} = conductivity(Air; T = T_f;)$   
 $nu_{espe} = 1,516E - 5 [m^2/s]$   
 $Pr = Prandtl(Air; T = T_f)$   
 $Beta = 1/T_f$

### "Análisis convección natural"

$L_c = D_{ext}$   
 $R_{aD} = (g * Beta * (T_{amb} - T_{supext}) * D_{ext}^3)/(Nu_{espe})^2 * Pr$   
 $Nusselt = (0,6 + (0,387 * R_{aD}^{(1/6)}))/(1 + (0,559/Pr)^{(9/16)})^{(8/27)}^2$   
 $h = K_{air}/D_{ext} * Nusselt$

$A_s = pi * D_{ext} * L$

$Q_{conv} = h * A_s * (T_{supext} - T_{amb})$

$Q_{rad} = Emis * A_s * Sigma * ((T_{supext} + 273)^4 - (T_{amb} + 273)^4)$

$Q_{cond} = (T_{supint} - T_{supext})/R_{int}$   
 $R_{int} = ln(D_{ext}/D_{int})/(2 * pi * k_{Acer} * L)$   
 $k_{Acer} = 13,4 [w/m * K]$

$Q_{cond} = Q_{conv} + Q_{rad}$

*"Análisis tubería interna"*

*"Propiedades del agua"*

$k_{\text{agua}} = \text{Conductivity}(\text{Water}; T = T_{\text{supint}}; P = P_{\text{amb}})$

$cp_{\text{agua}} = \text{Cp}(\text{Water}; T = T_{\text{supint}}; P = P_{\text{amb}})$

$\rho_{\text{agua}} = \text{Density}(\text{Water}; T = T_{\text{supint}}; P = P_{\text{amb}})$

$Pr_{\text{agua}} = \text{Prandtl}(\text{Water}; T = T_{\text{supint}}; P = P_{\text{amb}})$

$\mu_{\text{agua}} = \text{Viscosity}(\text{Water}; T = T_{\text{supint}}; P = P_{\text{amb}})$

$\nu_{\text{espeagua}} = \mu_{\text{agua}} / \rho_{\text{agua}}$

$Re_{\text{agua}} = V_{\text{agua}} * D_{\text{int}} / \nu_{\text{espeagua}}$

$V_{\text{agua}} = 10 / (\pi / 4 * D_{\text{int}}^2) * \text{convert}(\text{m/h}; \text{m/s})$

*"a pesar de los cambios de caudal supera los 2300 de reynolds critico por tanto trabajamos"*

$Nusselt_{\text{agua}} = 0,125 * f * Re_{\text{agua}} * Pr_{\text{agua}}^{(1/3)}$

$f = (0,790 * \ln(Re_{\text{agua}}) - 1,64)^{(-2)}$

$Nusselt_{\text{agua}} = h_{\text{agua}} * D_{\text{int}} / k_{\text{agua}}$

$Q_{\text{convagua}} = h_{\text{agua}} * A_{\text{sint}} * (+T_{\text{int}} - T_{\text{supint}})$

$A_{\text{sint}} = \pi * D_{\text{int}} * L$

$Q_{\text{convagua}} = Q_{\text{cond}}$

## Anexo J. Calculo de cargas por hora

"Calculo de cargas termicas"

$$"Q = m * C_p * (T2 - T1)"$$

"Constantes del agua"

$$T_{cte} = 6 [C]$$

$$P_{cte} = 75 * \text{convert}(\text{psi}; \text{Kpa})$$

$$Cp\_agua = cp(\text{Water}; T = T_{cte}; P = P_{cte})$$

$$\rho_{agua} = \text{density}(\text{Water}; T = T_{cte}; P = P_{cte})$$

"Flujos"

$$Qs\_ad = 8,034 [m^3/h]$$

$$Qs\_al = 20,87 [m^3/h]$$

$$Qs\_pd = 17,98 [m^3/h]$$

$$Qs\_pl = 32,04 [m^3/h]$$

$$Qs\_tan = 5,17 [m^3/h]$$

$$Qs\_T0 = 6,83 [m^3/h]$$

$$m\_dot\_auxder = Qs\_ad * \rho_{agua} \text{ "Kg/h"}$$

$$m\_dot\_auxLec = Qs\_al * \rho_{agua} \text{ "kg/h"}$$

$$m\_dot\_prider = Qs\_pd * \rho_{agua} \text{ "Kg/h"}$$

$$m\_dot\_priLec = Qs\_pl * \rho_{agua} \text{ "kg/h"}$$

$$m\_dot\_tan = Qs\_tan * \rho_{agua} \text{ "Kg/h"}$$

$$m\_dot\_T0 = Qs\_T0 * \rho_{agua} \text{ "kg/h"}$$

$$m\_dot\_TotLec = m\_dot\_auxLec + m\_dot\_priLec$$

$$m\_dot\_Totder = m\_dot\_auxder + m\_dot\_prider$$

"Datos de temperatura"

"Temperaturas de entrada"

$$Ten\_Tan = 3,998 [C]$$

$$Ten\_Yog = 3,898 [C]$$

$$Ten\_T2 = 3,998 [C]$$

$$Ten\_T1 = 3,998 [C]$$

$$Ten\_T0 = 3,998 [C]$$

$$Ten\_Mor = 3,998 [C]$$

$$Ten\_Rec = 3,298 [C]$$

$$Ten\_Ret = 3,298 [C]$$

$T_{en\_Est} = 3,298 [C]$

*"Temperaturas de salidas"*

$T_{out\_Tan} = 8,798 [C]$

$T_{out\_Yog} = 9,698 [C]$

$T_{out\_T2} = 8,798 [C]$

$T_{out\_T1} = 8,798 [C]$

$T_{out\_T0} = 8,798 [C]$

$T_{out\_Mor} = 6,898 [C]$

$T_{out\_Rec} = 6,698 [C]$

$T_{out\_Ret} = 5,898 [C]$

$T_{out\_Est} = 11,798 [C]$

*"numero de intercambiadores en cada hora"*

$num\_interder06 = 1$

$num\_interder07 = 1$

$num\_interder08 = 1$

$num\_interder09 = 1$

$num\_interder10 = 1$

$num\_interder11 = 1$

$num\_interder12 = 1$

$num\_interder13 = 1$

$num\_interder14 = 1$

$num\_interder15 = 1$

$num\_interder16 = 2$

$num\_interder17 = 2$

$num\_interder18 = 2$

$num\_interder19 = 1$

$num\_interder20 = 1$

$num\_interder21 = 1$

$num\_interder22 = 1$

$num\_interder23 = 2$

$num\_interder00 = 2$

$num\_interder01 = 2$

$num\_interder02 = 1$  *"Sin funcionar"*

$num\_interder03 = 1$  *"Sin funcionar"*

$num\_interder04 = 1$  *"Sin funcionar"*

$num\_interder05 = 1$  *"Sin funcionar"*

$num\_interlec06 = 3$

$num\_interlec07 = 3$

$num\_interlec08 = 3$

num\_interlec09 = 3  
num\_interlec10 = 3  
num\_interlec11 = 3  
num\_interlec12 = 3  
num\_interlec13 = 3  
num\_interlec14 = 3  
num\_interlec15 = 3  
num\_interlec16 = 3  
num\_interlec17 = 3  
num\_interlec18 = 3  
num\_interlec19 = 3  
num\_interlec20 = 1  
num\_interlec21 = 1  
num\_interlec22 = 1  
num\_interlec23 = 1  
num\_interlec00 = 1  
num\_interlec01 = 1 "se apaga"  
num\_interlec02 = 1 "se apaga"  
num\_interlec03 = 1 "se apaga"  
num\_interlec04 = 1  
num\_interlec05 = 1

#### "Calculo de flujos por hora"

m\_dot\_der06 = m\_dot\_auxder/num\_interder06  
m\_dot\_der07 = m\_dot\_auxder/num\_interder07  
m\_dot\_der08 = m\_dot\_auxder/num\_interder08  
m\_dot\_der09 = m\_dot\_auxder/num\_interder09  
m\_dot\_der10 = m\_dot\_auxder/num\_interder10  
m\_dot\_der11 = m\_dot\_auxder/num\_interder11  
m\_dot\_der12 = m\_dot\_auxder/num\_interder12  
m\_dot\_der13 = m\_dot\_auxder/num\_interder13  
m\_dot\_der14 = m\_dot\_auxder/num\_interder14  
m\_dot\_der15 = m\_dot\_auxder/num\_interder15  
m\_dot\_der16 = m\_dot\_auxder/num\_interder16  
m\_dot\_der17 = m\_dot\_Totder/num\_interder17  
m\_dot\_der18 = m\_dot\_Totder/num\_interder18  
m\_dot\_der19 = m\_dot\_Prider/num\_interder19  
m\_dot\_der20 = m\_dot\_Prider/num\_interder20  
m\_dot\_der21 = m\_dot\_Prider/num\_interder21  
m\_dot\_der22 = m\_dot\_Prider/num\_interder22  
m\_dot\_der23 = m\_dot\_Totder/num\_interder23  
m\_dot\_der00 = m\_dot\_Totder/num\_interder00  
m\_dot\_der01 = m\_dot\_Totder/num\_interder01

$$m\_dot\_der02 = 0/num\_interder02$$

$$m\_dot\_der03 = 0/num\_interder03$$

$$m\_dot\_der04 = 0/num\_interder04$$

$$m\_dot\_der05 = 0/num\_interder05$$

$$m\_dot\_lec06 = m\_dot\_TotLec/num\_interlec06$$

$$m\_dot\_lec07 = m\_dot\_TotLec/num\_interlec07$$

$$m\_dot\_lec08 = m\_dot\_TotLec/num\_interlec08$$

$$m\_dot\_lec09 = m\_dot\_TotLec/num\_interlec09$$

$$m\_dot\_lec10 = m\_dot\_TotLec/num\_interlec10$$

$$m\_dot\_lec11 = m\_dot\_TotLec/num\_interlec11$$

$$m\_dot\_lec12 = m\_dot\_TotLec/num\_interlec12$$

$$m\_dot\_lec13 = m\_dot\_TotLec/num\_interlec13$$

$$m\_dot\_lec14 = m\_dot\_TotLec/num\_interlec14$$

$$m\_dot\_lec15 = m\_dot\_TotLec/num\_interlec15$$

$$m\_dot\_lec16 = m\_dot\_TotLec/num\_interlec16$$

$$m\_dot\_lec17 = m\_dot\_TotLec/num\_interlec17$$

$$m\_dot\_lec18 = m\_dot\_TotLec/num\_interlec18$$

$$m\_dot\_lec19 = m\_dot\_TotLec/num\_interlec19$$

$$m\_dot\_lec20 = m\_dot\_AuxLec/num\_interlec20$$

$$m\_dot\_lec21 = m\_dot\_AuxLec/num\_interlec21$$

$$m\_dot\_lec22 = m\_dot\_AuxLec/num\_interlec22$$

$$m\_dot\_lec23 = m\_dot\_AuxLec/num\_interlec23$$

$$m\_dot\_lec00 = m\_dot\_AuxLec/num\_interlec00$$

$$m\_dot\_lec01 = m\_dot\_AuxLec/num\_interlec01 * 0$$

$$m\_dot\_lec02 = 0/num\_interlec02 * 0$$

$$m\_dot\_lec03 = 0/num\_interlec03 * 0$$

$$m\_dot\_lec04 = m\_dot\_AuxLec/num\_interlec04$$

$$m\_dot\_lec05 = m\_dot\_AuxLec/num\_interlec05$$

*"Calculo de cargas X intercambiador X hora"*

*"Carga a las 06:00 hs"*

$$Q\_dot\_Tan06 = m\_dot\_tan * Cp\_agua * (Tout\_Tan - Ten\_Tan) * 0$$

$$Q\_dot\_Yog06 = m\_dot\_der06 * Cp\_agua * (Tout\_Yog - Ten\_Yog) * 0$$

$$Q\_dot\_T206 = m\_dot\_der06 * Cp\_agua * (Tout\_T2 - Ten\_T2) * 0$$

$$Q\_dot\_T106 = m\_dot\_der06 * Cp\_agua * (Tout\_T1 - Ten\_T1) * 0$$

$$Q\_dot\_T006 = m\_dot\_T0 * Cp\_agua * (Tout\_T0 - Ten\_T0) * 0$$

$$Q\_dot\_Mor06 = m\_dot\_der06 * Cp\_agua * (Tout\_Mor - Ten\_Mor)$$

$$Q\_dot\_Rec06 = m\_dot\_lec06 * Cp\_agua * (Tout\_Rec - Ten\_Rec)$$

$$Q\_dot\_Ret06 = m\_dot\_lec06 * Cp\_agua * (Tout\_Ret - Ten\_Ret)$$

$$Q\_dot\_Est06 = m\_dot\_lec06 * Cp\_agua * (Tout\_Est - Ten\_Est)$$

$$Q_{06} = (Q_{\dot{T}an06} + Q_{\dot{Y}og06} + Q_{\dot{T}206} + Q_{\dot{T}106} + Q_{\dot{T}006} + Q_{\dot{M}or06} + Q_{\dot{R}ec06} + Q_{\dot{R}et06} + Q_{\dot{E}st06}) * \text{convert}(Kj/h; Kw)$$

"Carga a las 07:00 hs"

$$\begin{aligned} Q_{\dot{T}an07} &= m_{\dot{t}an} * C_{p\_agua} * (T_{out\_Tan} - T_{en\_Tan}) * 0 \\ Q_{\dot{Y}og07} &= m_{\dot{d}er07} * C_{p\_agua} * (T_{out\_Yog} - T_{en\_Yog}) * 0 \\ Q_{\dot{T}207} &= m_{\dot{d}er07} * C_{p\_agua} * (T_{out\_T2} - T_{en\_T2}) * 0 \\ Q_{\dot{T}107} &= m_{\dot{d}er07} * C_{p\_agua} * (T_{out\_T1} - T_{en\_T1}) * 0 \\ Q_{\dot{T}007} &= m_{\dot{T}0} * C_{p\_agua} * (T_{out\_T0} - T_{en\_T0}) * 0 \\ Q_{\dot{M}or07} &= m_{\dot{d}er07} * C_{p\_agua} * (T_{out\_Mor} - T_{en\_Mor}) \\ Q_{\dot{R}ec07} &= m_{\dot{l}ec07} * C_{p\_agua} * (T_{out\_Rec} - T_{en\_Rec}) \\ Q_{\dot{R}et07} &= m_{\dot{l}ec07} * C_{p\_agua} * (T_{out\_Ret} - T_{en\_Ret}) \\ Q_{\dot{E}st07} &= m_{\dot{l}ec07} * C_{p\_agua} * (T_{out\_Est} - T_{en\_Est}) \end{aligned}$$

$$Q_{07} = (Q_{\dot{T}an07} + Q_{\dot{Y}og07} + Q_{\dot{T}207} + Q_{\dot{T}107} + Q_{\dot{T}007} + Q_{\dot{M}or07} + Q_{\dot{R}ec07} + Q_{\dot{R}et07} + Q_{\dot{E}st07}) * \text{convert}(Kj/h; Kw)$$

"Carga a las 08:00 hs"

$$\begin{aligned} Q_{\dot{T}an08} &= m_{\dot{t}an} * C_{p\_agua} * (T_{out\_Tan} - T_{en\_Tan}) * 0 \\ Q_{\dot{Y}og08} &= m_{\dot{d}er08} * C_{p\_agua} * (T_{out\_Yog} - T_{en\_Yog}) * 0 \\ Q_{\dot{T}208} &= m_{\dot{d}er08} * C_{p\_agua} * (T_{out\_T2} - T_{en\_T2}) * 0 \\ Q_{\dot{T}108} &= m_{\dot{d}er08} * C_{p\_agua} * (T_{out\_T1} - T_{en\_T1}) * 0 \\ Q_{\dot{T}008} &= m_{\dot{T}0} * C_{p\_agua} * (T_{out\_T0} - T_{en\_T0}) * 0 \\ Q_{\dot{M}or08} &= m_{\dot{d}er08} * C_{p\_agua} * (T_{out\_Mor} - T_{en\_Mor}) \\ Q_{\dot{R}ec08} &= m_{\dot{l}ec08} * C_{p\_agua} * (T_{out\_Rec} - T_{en\_Rec}) \\ Q_{\dot{R}et08} &= m_{\dot{l}ec08} * C_{p\_agua} * (T_{out\_Ret} - T_{en\_Ret}) \\ Q_{\dot{E}st08} &= m_{\dot{l}ec08} * C_{p\_agua} * (T_{out\_Est} - T_{en\_Est}) \end{aligned}$$

$$Q_{08} = (Q_{\dot{T}an08} + Q_{\dot{Y}og08} + Q_{\dot{T}208} + Q_{\dot{T}108} + Q_{\dot{T}008} + Q_{\dot{M}or08} + Q_{\dot{R}ec08} + Q_{\dot{R}et08} + Q_{\dot{E}st08}) * \text{convert}(Kj/h; Kw)$$

"Carga a las 09:00 hs"

$$\begin{aligned} Q_{\dot{T}an09} &= m_{\dot{t}an} * C_{p\_agua} * (T_{out\_Tan} - T_{en\_Tan}) * 0 \\ Q_{\dot{Y}og09} &= m_{\dot{d}er09} * C_{p\_agua} * (T_{out\_Yog} - T_{en\_Yog}) * 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Q_{\dot{T}209} &= m_{\dot{d}er09} * C_{p\_agua} * (T_{out\_T2} - T_{en\_T2}) * 0 \\
Q_{\dot{T}109} &= m_{\dot{d}er09} * C_{p\_agua} * (T_{out\_T1} - T_{en\_T1}) * 0 \\
Q_{\dot{T}009} &= m_{\dot{T}0} * C_{p\_agua} * (T_{out\_T0} - T_{en\_T0}) * 0 \\
Q_{\dot{M}or09} &= m_{\dot{d}er09} * C_{p\_agua} * (T_{out\_Mor} - T_{en\_Mor}) \\
Q_{\dot{R}ec09} &= m_{\dot{l}ec09} * C_{p\_agua} * (T_{out\_Rec} - T_{en\_Rec}) \\
Q_{\dot{R}et09} &= m_{\dot{l}ec09} * C_{p\_agua} * (T_{out\_Ret} - T_{en\_Ret}) \\
Q_{\dot{E}st09} &= m_{\dot{l}ec09} * C_{p\_agua} * (T_{out\_Est} - T_{en\_Est})
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Q_{09} &= (Q_{\dot{T}an09} + Q_{\dot{Y}og09} + Q_{\dot{T}209} + Q_{\dot{T}109} + Q_{\dot{T}009} \\
&\quad + Q_{\dot{M}or09} + Q_{\dot{R}ec09} + Q_{\dot{R}et09} + Q_{\dot{E}st09}) \\
&\quad * \text{convert}(Kj/h; Kw)
\end{aligned}$$

*"Carga a las 10:00 hs"*

$$\begin{aligned}
Q_{\dot{T}an10} &= m_{\dot{t}an} * C_{p\_agua} * (T_{out\_Tan} - T_{en\_Tan}) * 0 \\
Q_{\dot{Y}og10} &= m_{\dot{d}er10} * C_{p\_agua} * (T_{out\_Yog} - T_{en\_Yog}) * 0 \\
Q_{\dot{T}210} &= m_{\dot{d}er10} * C_{p\_agua} * (T_{out\_T2} - T_{en\_T2}) * 0 \\
Q_{\dot{T}110} &= m_{\dot{d}er10} * C_{p\_agua} * (T_{out\_T1} - T_{en\_T1}) * 0 \\
Q_{\dot{T}010} &= m_{\dot{T}0} * C_{p\_agua} * (T_{out\_T0} - T_{en\_T0}) * 0 \\
Q_{\dot{M}or10} &= m_{\dot{d}er10} * C_{p\_agua} * (T_{out\_Mor} - T_{en\_Mor}) \\
Q_{\dot{R}ec10} &= m_{\dot{l}ec10} * C_{p\_agua} * (T_{out\_Rec} - T_{en\_Rec}) \\
Q_{\dot{R}et10} &= m_{\dot{l}ec10} * C_{p\_agua} * (T_{out\_Ret} - T_{en\_Ret}) \\
Q_{\dot{E}st10} &= m_{\dot{l}ec10} * C_{p\_agua} * (T_{out\_Est} - T_{en\_Est})
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Q_{10} &= (Q_{\dot{T}an10} + Q_{\dot{Y}og10} + Q_{\dot{T}210} + Q_{\dot{T}110} + Q_{\dot{T}010} \\
&\quad + Q_{\dot{M}or10} + Q_{\dot{R}ec10} + Q_{\dot{R}et10} + Q_{\dot{E}st10}) \\
&\quad * \text{convert}(Kj/h; Kw)
\end{aligned}$$

*"Carga a las 11:00 hs"*

$$\begin{aligned}
Q_{\dot{T}an11} &= m_{\dot{t}an} * C_{p\_agua} * (T_{out\_Tan} - T_{en\_Tan}) * 0 \\
Q_{\dot{Y}og11} &= m_{\dot{d}er11} * C_{p\_agua} * (T_{out\_Yog} - T_{en\_Yog}) * 0 \\
Q_{\dot{T}211} &= m_{\dot{d}er11} * C_{p\_agua} * (T_{out\_T2} - T_{en\_T2}) * 0 \\
Q_{\dot{T}111} &= m_{\dot{d}er11} * C_{p\_agua} * (T_{out\_T1} - T_{en\_T1}) * 0 \\
Q_{\dot{T}011} &= m_{\dot{T}0} * C_{p\_agua} * (T_{out\_T0} - T_{en\_T0}) * 0 \\
Q_{\dot{M}or11} &= m_{\dot{d}er11} * C_{p\_agua} * (T_{out\_Mor} - T_{en\_Mor}) \\
Q_{\dot{R}ec11} &= m_{\dot{l}ec11} * C_{p\_agua} * (T_{out\_Rec} - T_{en\_Rec}) \\
Q_{\dot{R}et11} &= m_{\dot{l}ec11} * C_{p\_agua} * (T_{out\_Ret} - T_{en\_Ret}) \\
Q_{\dot{E}st11} &= m_{\dot{l}ec11} * C_{p\_agua} * (T_{out\_Est} - T_{en\_Est})
\end{aligned}$$

$$Q_{11} = (Q_{dot\_Tan11} + Q_{dot\_Yog11} + Q_{dot\_T211} + Q_{dot\_T111} + Q_{dot\_T011} + Q_{dot\_Mor11} + Q_{dot\_Rec11} + Q_{dot\_Ret11} + Q_{dot\_Est11}) * convert(Kj/h; Kw)$$

"Carga a las 12:00 hs"

$$\begin{aligned} Q_{dot\_Tan12} &= m_{dot\_tan} * Cp_{agua} * (Tout\_Tan - Ten\_Tan) * 0 \\ Q_{dot\_Yog12} &= m_{dot\_der12} * Cp_{agua} * (Tout\_Yog - Ten\_Yog) * 0 \\ Q_{dot\_T212} &= m_{dot\_der12} * Cp_{agua} * (Tout\_T2 - Ten\_T2) * 0 \\ Q_{dot\_T112} &= m_{dot\_der12} * Cp_{agua} * (Tout\_T1 - Ten\_T1) * 0 \\ Q_{dot\_T012} &= m_{dot\_T0} * Cp_{agua} * (Tout\_T0 - Ten\_T0) * 0 \\ Q_{dot\_Mor12} &= m_{dot\_der12} * Cp_{agua} * (Tout\_Mor - Ten\_Mor) \\ Q_{dot\_Rec12} &= m_{dot\_lec12} * Cp_{agua} * (Tout\_Rec - Ten\_Rec) \\ Q_{dot\_Ret12} &= m_{dot\_lec12} * Cp_{agua} * (Tout\_Ret - Ten\_Ret) \\ Q_{dot\_Est12} &= m_{dot\_lec12} * Cp_{agua} * (Tout\_Est - Ten\_Est) \end{aligned}$$

$$Q_{12} = (Q_{dot\_Tan12} + Q_{dot\_Yog12} + Q_{dot\_T212} + Q_{dot\_T112} + Q_{dot\_T012} + Q_{dot\_Mor12} + Q_{dot\_Rec12} + Q_{dot\_Ret12} + Q_{dot\_Est12}) * convert(Kj/h; Kw)$$

"Carga a las 13:00 hs"

$$\begin{aligned} Q_{dot\_Tan13} &= m_{dot\_tan} * Cp_{agua} * (Tout\_Tan - Ten\_Tan) * 0 \\ Q_{dot\_Yog13} &= m_{dot\_der13} * Cp_{agua} * (Tout\_Yog - Ten\_Yog) * 0 \\ Q_{dot\_T213} &= m_{dot\_der13} * Cp_{agua} * (Tout\_T2 - Ten\_T2) * 0 \\ Q_{dot\_T113} &= m_{dot\_der13} * Cp_{agua} * (Tout\_T1 - Ten\_T1) * 0 \\ Q_{dot\_T013} &= m_{dot\_T0} * Cp_{agua} * (Tout\_T0 - Ten\_T0) * 0 \\ Q_{dot\_Mor13} &= m_{dot\_der13} * Cp_{agua} * (Tout\_Mor - Ten\_Mor) \\ Q_{dot\_Rec13} &= m_{dot\_lec13} * Cp_{agua} * (Tout\_Rec - Ten\_Rec) \\ Q_{dot\_Ret13} &= m_{dot\_lec13} * Cp_{agua} * (Tout\_Ret - Ten\_Ret) \\ Q_{dot\_Est13} &= m_{dot\_lec13} * Cp_{agua} * (Tout\_Est - Ten\_Est) \end{aligned}$$

$$Q_{13} = (Q_{dot\_Tan13} + Q_{dot\_Yog13} + Q_{dot\_T213} + Q_{dot\_T113} + Q_{dot\_T013} + Q_{dot\_Mor13} + Q_{dot\_Rec13} + Q_{dot\_Ret13} + Q_{dot\_Est13}) * convert(Kj/h; Kw)$$

"Carga a las 14:00 hs"

$$\begin{aligned} Q_{dot\_Tan14} &= m_{dot\_tan} * Cp_{agua} * (Tout\_Tan - Ten\_Tan) * 0 \\ Q_{dot\_Yog14} &= m_{dot\_der14} * Cp_{agua} * (Tout\_Yog - Ten\_Yog) * 0 \\ Q_{dot\_T214} &= m_{dot\_der14} * Cp_{agua} * (Tout\_T2 - Ten\_T2) * 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Q_{\dot{T}114} &= m_{\dot{d}er14} * C_{p\_agua} * (T_{out\_T1} - T_{en\_T1}) * 0 \\
Q_{\dot{T}014} &= m_{\dot{T}0} * C_{p\_agua} * (T_{out\_T0} - T_{en\_T0}) * 0 \\
Q_{\dot{M}or14} &= m_{\dot{d}er14} * C_{p\_agua} * (T_{out\_Mor} - T_{en\_Mor}) \\
Q_{\dot{R}ec14} &= m_{\dot{l}ec14} * C_{p\_agua} * (T_{out\_Rec} - T_{en\_Rec}) \\
Q_{\dot{R}et14} &= m_{\dot{l}ec14} * C_{p\_agua} * (T_{out\_Ret} - T_{en\_Ret}) \\
Q_{\dot{E}st14} &= m_{\dot{l}ec14} * C_{p\_agua} * (T_{out\_Est} - T_{en\_Est})
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Q_{14} &= (Q_{\dot{T}an14} + Q_{\dot{Y}og14} + Q_{\dot{T}214} + Q_{\dot{T}114} + Q_{\dot{T}014} \\
&\quad + Q_{\dot{M}or14} + Q_{\dot{R}ec14} + Q_{\dot{R}et14} + Q_{\dot{E}st14}) \\
&\quad * \text{convert}(Kj/h; Kw)
\end{aligned}$$

"Carga a las 15:00 hs"

$$\begin{aligned}
Q_{\dot{T}an15} &= m_{\dot{t}an} * C_{p\_agua} * (T_{out\_Tan} - T_{en\_Tan}) * 0 \\
Q_{\dot{Y}og15} &= m_{\dot{d}er15} * C_{p\_agua} * (T_{out\_Yog} - T_{en\_Yog}) * 0 \\
Q_{\dot{T}215} &= m_{\dot{d}er15} * C_{p\_agua} * (T_{out\_T2} - T_{en\_T2}) * 0 \\
Q_{\dot{T}115} &= m_{\dot{d}er15} * C_{p\_agua} * (T_{out\_T1} - T_{en\_T1}) * 0 \\
Q_{\dot{T}015} &= m_{\dot{T}0} * C_{p\_agua} * (T_{out\_T0} - T_{en\_T0}) * 0 \\
Q_{\dot{M}or15} &= m_{\dot{d}er15} * C_{p\_agua} * (T_{out\_Mor} - T_{en\_Mor}) \\
Q_{\dot{R}ec15} &= m_{\dot{l}ec15} * C_{p\_agua} * (T_{out\_Rec} - T_{en\_Rec}) \\
Q_{\dot{R}et15} &= m_{\dot{l}ec15} * C_{p\_agua} * (T_{out\_Ret} - T_{en\_Ret}) \\
Q_{\dot{E}st15} &= m_{\dot{l}ec15} * C_{p\_agua} * (T_{out\_Est} - T_{en\_Est})
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Q_{15} &= (Q_{\dot{T}an15} + Q_{\dot{Y}og15} + Q_{\dot{T}215} + Q_{\dot{T}115} + Q_{\dot{T}015} \\
&\quad + Q_{\dot{M}or15} + Q_{\dot{R}ec15} + Q_{\dot{R}et15} + Q_{\dot{E}st15}) \\
&\quad * \text{convert}(Kj/h; Kw)
\end{aligned}$$

"Carga a las 16:00 hs"

$$\begin{aligned}
Q_{\dot{T}an16} &= m_{\dot{t}an} * C_{p\_agua} * (T_{out\_Tan} - T_{en\_Tan}) * 0 \\
Q_{\dot{Y}og16} &= m_{\dot{d}er16} * C_{p\_agua} * (T_{out\_Yog} - T_{en\_Yog}) \\
Q_{\dot{T}216} &= m_{\dot{d}er16} * C_{p\_agua} * (T_{out\_T2} - T_{en\_T2}) * 0 \\
Q_{\dot{T}116} &= m_{\dot{d}er16} * C_{p\_agua} * (T_{out\_T1} - T_{en\_T1}) \\
Q_{\dot{T}016} &= m_{\dot{T}0} * C_{p\_agua} * (T_{out\_T0} - T_{en\_T0}) * 0 \\
Q_{\dot{M}or16} &= m_{\dot{d}er16} * C_{p\_agua} * (T_{out\_Mor} - T_{en\_Mor}) * 0 \\
Q_{\dot{R}ec16} &= m_{\dot{l}ec16} * C_{p\_agua} * (T_{out\_Rec} - T_{en\_Rec}) \\
Q_{\dot{R}et16} &= m_{\dot{l}ec16} * C_{p\_agua} * (T_{out\_Ret} - T_{en\_Ret}) \\
Q_{\dot{E}st16} &= m_{\dot{l}ec16} * C_{p\_agua} * (T_{out\_Est} - T_{en\_Est})
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Q_{16} &= (Q_{\dot{T}an16} + Q_{\dot{Y}og16} + Q_{\dot{T}216} + Q_{\dot{T}116} + Q_{\dot{T}016} \\
&\quad + Q_{\dot{M}or16} + Q_{\dot{R}ec16} + Q_{\dot{R}et16} + Q_{\dot{E}st16}) \\
&\quad * \text{convert}(Kj/h; Kw)
\end{aligned}$$

*"Carga a las 17:00 hs"*

$$\begin{aligned}Q_{\dot{Tan}17} &= m_{\dot{tan}} * Cp_{\text{agua}} * (T_{\text{out}_Tan} - T_{\text{en}_Tan}) * 0 \\Q_{\dot{Yog}17} &= m_{\dot{der}17} * Cp_{\text{agua}} * (T_{\text{out}_Yog} - T_{\text{en}_Yog}) \\Q_{\dot{T}217} &= m_{\dot{der}17} * Cp_{\text{agua}} * (T_{\text{out}_T2} - T_{\text{en}_T2}) * 0 \\Q_{\dot{T}117} &= m_{\dot{der}17} * Cp_{\text{agua}} * (T_{\text{out}_T1} - T_{\text{en}_T1}) \\Q_{\dot{T}017} &= m_{\dot{T}0} * Cp_{\text{agua}} * (T_{\text{out}_T0} - T_{\text{en}_T0}) * 0 \\Q_{\dot{Mor}17} &= m_{\dot{der}17} * Cp_{\text{agua}} * (T_{\text{out}_Mor} - T_{\text{en}_Mor}) * 0 \\Q_{\dot{Rec}17} &= m_{\dot{lec}17} * Cp_{\text{agua}} * (T_{\text{out}_Rec} - T_{\text{en}_Rec}) \\Q_{\dot{Ret}17} &= m_{\dot{lec}17} * Cp_{\text{agua}} * (T_{\text{out}_Ret} - T_{\text{en}_Ret}) \\Q_{\dot{Est}17} &= m_{\dot{lec}17} * Cp_{\text{agua}} * (T_{\text{out}_Est} - T_{\text{en}_Est})\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}Q_{17} &= (Q_{\dot{Tan}17} + Q_{\dot{Yog}17} + Q_{\dot{T}217} + Q_{\dot{T}117} + Q_{\dot{T}017} \\&\quad + Q_{\dot{Mor}17} + Q_{\dot{Rec}17} + Q_{\dot{Ret}17} + Q_{\dot{Est}17}) \\&\quad * \text{convert}(Kj/h; Kw)\end{aligned}$$

*"Carga a las 18:00 hs"*

$$\begin{aligned}Q_{\dot{Tan}18} &= m_{\dot{tan}} * Cp_{\text{agua}} * (T_{\text{out}_Tan} - T_{\text{en}_Tan}) * 0 \\Q_{\dot{Yog}18} &= m_{\dot{der}18} * Cp_{\text{agua}} * (T_{\text{out}_Yog} - T_{\text{en}_Yog}) \\Q_{\dot{T}218} &= m_{\dot{der}18} * Cp_{\text{agua}} * (T_{\text{out}_T2} - T_{\text{en}_T2}) * 0 \\Q_{\dot{T}118} &= m_{\dot{der}18} * Cp_{\text{agua}} * (T_{\text{out}_T1} - T_{\text{en}_T1}) \\Q_{\dot{T}018} &= m_{\dot{T}0} * Cp_{\text{agua}} * (T_{\text{out}_T0} - T_{\text{en}_T0}) * 0 \\Q_{\dot{Mor}18} &= m_{\dot{der}18} * Cp_{\text{agua}} * (T_{\text{out}_Mor} - T_{\text{en}_Mor}) * 0 \\Q_{\dot{Rec}18} &= m_{\dot{lec}18} * Cp_{\text{agua}} * (T_{\text{out}_Rec} - T_{\text{en}_Rec}) \\Q_{\dot{Ret}18} &= m_{\dot{lec}18} * Cp_{\text{agua}} * (T_{\text{out}_Ret} - T_{\text{en}_Ret}) \\Q_{\dot{Est}18} &= m_{\dot{lec}18} * Cp_{\text{agua}} * (T_{\text{out}_Est} - T_{\text{en}_Est})\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}Q_{18} &= (Q_{\dot{Tan}18} + Q_{\dot{Yog}18} + Q_{\dot{T}218} + Q_{\dot{T}118} + Q_{\dot{T}018} \\&\quad + Q_{\dot{Mor}18} + Q_{\dot{Rec}18} + Q_{\dot{Ret}18} + Q_{\dot{Est}18}) \\&\quad * \text{convert}(Kj/h; Kw)\end{aligned}$$

*"Carga a las 19:00 hs"*

$$\begin{aligned}Q_{\dot{Tan}19} &= m_{\dot{tan}} * Cp_{\text{agua}} * (T_{\text{out}_Tan} - T_{\text{en}_Tan}) * 0 \\Q_{\dot{Yog}19} &= m_{\dot{der}19} * Cp_{\text{agua}} * (T_{\text{out}_Yog} - T_{\text{en}_Yog}) \\Q_{\dot{T}219} &= m_{\dot{der}19} * Cp_{\text{agua}} * (T_{\text{out}_T2} - T_{\text{en}_T2}) * 0 \\Q_{\dot{T}119} &= m_{\dot{der}19} * Cp_{\text{agua}} * (T_{\text{out}_T1} - T_{\text{en}_T1}) * 0 \\Q_{\dot{T}019} &= m_{\dot{T}0} * Cp_{\text{agua}} * (T_{\text{out}_T0} - T_{\text{en}_T0}) \\Q_{\dot{Mor}19} &= m_{\dot{der}19} * Cp_{\text{agua}} * (T_{\text{out}_Mor} - T_{\text{en}_Mor}) * 0\end{aligned}$$

$$Q\_dot\_Rec19 = m\_dot\_lec19 * Cp\_agua * (Tout\_Rec - Ten\_Rec)$$

$$Q\_dot\_Ret19 = m\_dot\_lec19 * Cp\_agua * (Tout\_Ret - Ten\_Ret)$$

$$Q\_dot\_Est19 = m\_dot\_lec19 * Cp\_agua * (Tout\_Est - Ten\_Est)$$

$$Q\_19 = (Q\_dot\_Tan19 + Q\_dot\_Yog19 + Q\_dot\_T219 + Q\_dot\_T119 + Q\_dot\_T019 \\ + Q\_dot\_Mor19 + Q\_dot\_Rec19 + Q\_dot\_Ret19 + Q\_dot\_Est19) \\ * convert(Kj/h; Kw)$$

"Carga a las 20:00 hs"

$$Q\_dot\_Tan20 = m\_dot\_tan * Cp\_agua * (Tout\_Tan - Ten\_Tan) * 0$$

$$Q\_dot\_Yog20 = m\_dot\_der20 * Cp\_agua * (Tout\_Yog - Ten\_Yog)$$

$$Q\_dot\_T220 = m\_dot\_der20 * Cp\_agua * (Tout\_T2 - Ten\_T2) * 0$$

$$Q\_dot\_T120 = m\_dot\_der20 * Cp\_agua * (Tout\_T1 - Ten\_T1) * 0$$

$$Q\_dot\_T020 = m\_dot\_T0 * Cp\_agua * (Tout\_T0 - Ten\_T0)$$

$$Q\_dot\_Mor20 = m\_dot\_der20 * Cp\_agua * (Tout\_Mor - Ten\_Mor) * 0$$

$$Q\_dot\_Rec20 = m\_dot\_lec20 * Cp\_agua * (Tout\_Rec - Ten\_Rec)$$

$$Q\_dot\_Ret20 = m\_dot\_lec20 * Cp\_agua * (Tout\_Ret - Ten\_Ret) * 0$$

$$Q\_dot\_Est20 = m\_dot\_lec20 * Cp\_agua * (Tout\_Est - Ten\_Est) * 0$$

$$Q\_20 = (Q\_dot\_Tan20 + Q\_dot\_Yog20 + Q\_dot\_T220 + Q\_dot\_T120 + Q\_dot\_T020 \\ + Q\_dot\_Mor20 + Q\_dot\_Rec20 + Q\_dot\_Ret20 + Q\_dot\_Est20) \\ * convert(Kj/h; Kw)$$

"Carga a las 21:00 hs"

$$Q\_dot\_Tan21 = m\_dot\_tan * Cp\_agua * (Tout\_Tan - Ten\_Tan) * 0$$

$$Q\_dot\_Yog21 = m\_dot\_der21 * Cp\_agua * (Tout\_Yog - Ten\_Yog)$$

$$Q\_dot\_T221 = m\_dot\_der21 * Cp\_agua * (Tout\_T2 - Ten\_T2) * 0$$

$$Q\_dot\_T121 = m\_dot\_der21 * Cp\_agua * (Tout\_T1 - Ten\_T1) * 0$$

$$Q\_dot\_T021 = m\_dot\_T0 * Cp\_agua * (Tout\_T0 - Ten\_T0)$$

$$Q\_dot\_Mor21 = m\_dot\_der21 * Cp\_agua * (Tout\_Mor - Ten\_Mor) * 0$$

$$Q\_dot\_Rec21 = m\_dot\_lec21 * Cp\_agua * (Tout\_Rec - Ten\_Rec)$$

$$Q\_dot\_Ret21 = m\_dot\_lec21 * Cp\_agua * (Tout\_Ret - Ten\_Ret) * 0$$

$$Q\_dot\_Est21 = m\_dot\_lec21 * Cp\_agua * (Tout\_Est - Ten\_Est) * 0$$

$$Q\_21 = (Q\_dot\_Tan21 + Q\_dot\_Yog21 + Q\_dot\_T221 + Q\_dot\_T121 + Q\_dot\_T021 \\ + Q\_dot\_Mor21 + Q\_dot\_Rec21 + Q\_dot\_Ret21 + Q\_dot\_Est21) \\ * convert(Kj/h; Kw)$$

"Carga a las 22:00 hs"

$$\begin{aligned}
Q_{\text{dot\_Tan22}} &= m_{\text{dot\_tan}} * Cp_{\text{agua}} * (T_{\text{out\_Tan}} - T_{\text{en\_Tan}}) \\
Q_{\text{dot\_Yog22}} &= m_{\text{dot\_der22}} * Cp_{\text{agua}} * (T_{\text{out\_Yog}} - T_{\text{en\_Yog}}) \\
Q_{\text{dot\_T222}} &= m_{\text{dot\_der22}} * Cp_{\text{agua}} * (T_{\text{out\_T2}} - T_{\text{en\_T2}}) * 0 \\
Q_{\text{dot\_T122}} &= m_{\text{dot\_der22}} * Cp_{\text{agua}} * (T_{\text{out\_T1}} - T_{\text{en\_T1}}) * 0 \\
Q_{\text{dot\_T022}} &= m_{\text{dot\_T0}} * Cp_{\text{agua}} * (T_{\text{out\_T0}} - T_{\text{en\_T0}}) \\
Q_{\text{dot\_Mor22}} &= m_{\text{dot\_der22}} * Cp_{\text{agua}} * (T_{\text{out\_Mor}} - T_{\text{en\_Mor}}) * 0 \\
Q_{\text{dot\_Rec22}} &= m_{\text{dot\_lec22}} * Cp_{\text{agua}} * (T_{\text{out\_Rec}} - T_{\text{en\_Rec}}) \\
Q_{\text{dot\_Ret22}} &= m_{\text{dot\_lec22}} * Cp_{\text{agua}} * (T_{\text{out\_Ret}} - T_{\text{en\_Ret}}) * 0 \\
Q_{\text{dot\_Est22}} &= m_{\text{dot\_lec22}} * Cp_{\text{agua}} * (T_{\text{out\_Est}} - T_{\text{en\_Est}}) * 0
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Q_{22} &= (Q_{\text{dot\_Tan22}} + Q_{\text{dot\_Yog22}} + Q_{\text{dot\_T222}} + Q_{\text{dot\_T122}} + Q_{\text{dot\_T022}} \\
&\quad + Q_{\text{dot\_Mor22}} + Q_{\text{dot\_Rec22}} + Q_{\text{dot\_Ret22}} + Q_{\text{dot\_Est22}}) \\
&\quad * \text{convert}(Kj/h; Kw)
\end{aligned}$$

*"Carga a las 23:00 hs"*

$$\begin{aligned}
Q_{\text{dot\_Tan23}} &= m_{\text{dot\_tan}} * Cp_{\text{agua}} * (T_{\text{out\_Tan}} - T_{\text{en\_Tan}}) \\
Q_{\text{dot\_Yog23}} &= m_{\text{dot\_der23}} * Cp_{\text{agua}} * (T_{\text{out\_Yog}} - T_{\text{en\_Yog}}) \\
Q_{\text{dot\_T223}} &= m_{\text{dot\_der23}} * Cp_{\text{agua}} * (T_{\text{out\_T2}} - T_{\text{en\_T2}}) \\
Q_{\text{dot\_T123}} &= m_{\text{dot\_der23}} * Cp_{\text{agua}} * (T_{\text{out\_T1}} - T_{\text{en\_T1}}) * 0 \\
Q_{\text{dot\_T023}} &= m_{\text{dot\_T0}} * Cp_{\text{agua}} * (T_{\text{out\_T0}} - T_{\text{en\_T0}}) * 0 \\
Q_{\text{dot\_Mor23}} &= m_{\text{dot\_der23}} * Cp_{\text{agua}} * (T_{\text{out\_Mor}} - T_{\text{en\_Mor}}) * 0 \\
Q_{\text{dot\_Rec23}} &= m_{\text{dot\_lec23}} * Cp_{\text{agua}} * (T_{\text{out\_Rec}} - T_{\text{en\_Rec}}) \\
Q_{\text{dot\_Ret23}} &= m_{\text{dot\_lec23}} * Cp_{\text{agua}} * (T_{\text{out\_Ret}} - T_{\text{en\_Ret}}) * 0 \\
Q_{\text{dot\_Est23}} &= m_{\text{dot\_lec23}} * Cp_{\text{agua}} * (T_{\text{out\_Est}} - T_{\text{en\_Est}}) * 0
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Q_{23} &= (Q_{\text{dot\_Tan23}} + Q_{\text{dot\_Yog23}} + Q_{\text{dot\_T223}} + Q_{\text{dot\_T123}} + Q_{\text{dot\_T023}} \\
&\quad + Q_{\text{dot\_Mor23}} + Q_{\text{dot\_Rec23}} + Q_{\text{dot\_Ret23}} + Q_{\text{dot\_Est23}}) \\
&\quad * \text{convert}(Kj/h; Kw)
\end{aligned}$$

*"Carga a las 00:00 hs"*

$$\begin{aligned}
Q_{\text{dot\_Tan00}} &= m_{\text{dot\_tan}} * Cp_{\text{agua}} * (T_{\text{out\_Tan}} - T_{\text{en\_Tan}}) \\
Q_{\text{dot\_Yog00}} &= m_{\text{dot\_der00}} * Cp_{\text{agua}} * (T_{\text{out\_Yog}} - T_{\text{en\_Yog}}) \\
Q_{\text{dot\_T200}} &= m_{\text{dot\_der00}} * Cp_{\text{agua}} * (T_{\text{out\_T2}} - T_{\text{en\_T2}}) \\
Q_{\text{dot\_T100}} &= m_{\text{dot\_der00}} * Cp_{\text{agua}} * (T_{\text{out\_T1}} - T_{\text{en\_T1}}) * 0 \\
Q_{\text{dot\_T000}} &= m_{\text{dot\_T0}} * Cp_{\text{agua}} * (T_{\text{out\_T0}} - T_{\text{en\_T0}}) * 0 \\
Q_{\text{dot\_Mor00}} &= m_{\text{dot\_der00}} * Cp_{\text{agua}} * (T_{\text{out\_Mor}} - T_{\text{en\_Mor}}) * 0 \\
Q_{\text{dot\_Rec00}} &= m_{\text{dot\_lec00}} * Cp_{\text{agua}} * (T_{\text{out\_Rec}} - T_{\text{en\_Rec}}) \\
Q_{\text{dot\_Ret00}} &= m_{\text{dot\_lec00}} * Cp_{\text{agua}} * (T_{\text{out\_Ret}} - T_{\text{en\_Ret}}) * 0 \\
Q_{\text{dot\_Est00}} &= m_{\text{dot\_lec00}} * Cp_{\text{agua}} * (T_{\text{out\_Est}} - T_{\text{en\_Est}}) * 0
\end{aligned}$$

$$Q_{00} = (Q_{\dot{T}an00} + Q_{\dot{Y}og00} + Q_{\dot{T}200} + Q_{\dot{T}100} + Q_{\dot{T}000} + Q_{\dot{M}or00} + Q_{\dot{R}ec00} + Q_{\dot{R}et00} + Q_{\dot{E}st00}) * \text{convert}(Kj/h; Kw)$$

"Carga a las 01:00 hs"

$$\begin{aligned} Q_{\dot{T}an01} &= m_{\dot{t}an} * C_{p\_agua} * (T_{out\_Tan} - T_{en\_Tan}) \\ Q_{\dot{Y}og01} &= m_{\dot{d}er01} * C_{p\_agua} * (T_{out\_Yog} - T_{en\_Yog}) \\ Q_{\dot{T}201} &= m_{\dot{d}er01} * C_{p\_agua} * (T_{out\_T2} - T_{en\_T2}) \\ Q_{\dot{T}101} &= m_{\dot{d}er01} * C_{p\_agua} * (T_{out\_T1} - T_{en\_T1}) * 0 \\ Q_{\dot{T}001} &= m_{\dot{T}0} * C_{p\_agua} * (T_{out\_T0} - T_{en\_T0}) * 0 \\ Q_{\dot{M}or01} &= m_{\dot{d}er01} * C_{p\_agua} * (T_{out\_Mor} - T_{en\_Mor}) * 0 \\ Q_{\dot{R}ec01} &= m_{\dot{l}ec01} * C_{p\_agua} * (T_{out\_Rec} - T_{en\_Rec}) \\ Q_{\dot{R}et01} &= m_{\dot{l}ec01} * C_{p\_agua} * (T_{out\_Ret} - T_{en\_Ret}) * 0 \\ Q_{\dot{E}st01} &= m_{\dot{l}ec01} * C_{p\_agua} * (T_{out\_Est} - T_{en\_Est}) * 0 \end{aligned}$$

$$Q_{01} = (Q_{\dot{T}an01} + Q_{\dot{Y}og01} + Q_{\dot{T}201} + Q_{\dot{T}101} + Q_{\dot{T}001} + Q_{\dot{M}or01} + Q_{\dot{R}ec01} + Q_{\dot{R}et01} + Q_{\dot{E}st01}) * \text{convert}(Kj/h; Kw)$$

"Carga a las 02:00 hs"

$$\begin{aligned} Q_{\dot{T}an02} &= m_{\dot{t}an} * C_{p\_agua} * (T_{out\_Tan} - T_{en\_Tan}) \\ Q_{\dot{Y}og02} &= m_{\dot{d}er02} * C_{p\_agua} * (T_{out\_Yog} - T_{en\_Yog}) * 0 \\ Q_{\dot{T}202} &= m_{\dot{d}er02} * C_{p\_agua} * (T_{out\_T2} - T_{en\_T2}) * 0 \\ Q_{\dot{T}102} &= m_{\dot{d}er02} * C_{p\_agua} * (T_{out\_T1} - T_{en\_T1}) * 0 \\ Q_{\dot{T}002} &= m_{\dot{T}0} * C_{p\_agua} * (T_{out\_T0} - T_{en\_T0}) * 0 \\ Q_{\dot{M}or02} &= m_{\dot{d}er02} * C_{p\_agua} * (T_{out\_Mor} - T_{en\_Mor}) * 0 \\ Q_{\dot{R}ec02} &= m_{\dot{l}ec02} * C_{p\_agua} * (T_{out\_Rec} - T_{en\_Rec}) * 0 \\ Q_{\dot{R}et02} &= m_{\dot{l}ec02} * C_{p\_agua} * (T_{out\_Ret} - T_{en\_Ret}) * 0 \\ Q_{\dot{E}st02} &= m_{\dot{l}ec02} * C_{p\_agua} * (T_{out\_Est} - T_{en\_Est}) * 0 \end{aligned}$$

$$Q_{02} = (Q_{\dot{T}an02} + Q_{\dot{Y}og02} + Q_{\dot{T}202} + Q_{\dot{T}102} + Q_{\dot{T}002} + Q_{\dot{M}or02} + Q_{\dot{R}ec02} + Q_{\dot{R}et02} + Q_{\dot{E}st02}) * \text{convert}(Kj/h; Kw)$$

"Carga a las 03:00 hs"

$$\begin{aligned} Q_{\dot{T}an03} &= m_{\dot{t}an} * C_{p\_agua} * (T_{out\_Tan} - T_{en\_Tan}) \\ Q_{\dot{Y}og03} &= m_{\dot{d}er03} * C_{p\_agua} * (T_{out\_Yog} - T_{en\_Yog}) * 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Q_{\dot{T}203} &= m_{\dot{d}er03} * C_{p\_agua} * (T_{out\_T2} - T_{en\_T2}) * 0 \\
Q_{\dot{T}103} &= m_{\dot{d}er03} * C_{p\_agua} * (T_{out\_T1} - T_{en\_T1}) * 0 \\
Q_{\dot{T}003} &= m_{\dot{T}0} * C_{p\_agua} * (T_{out\_T0} - T_{en\_T0}) * 0 \\
Q_{\dot{M}or03} &= m_{\dot{d}er03} * C_{p\_agua} * (T_{out\_Mor} - T_{en\_Mor}) * 0 \\
Q_{\dot{R}ec03} &= m_{\dot{l}ec03} * C_{p\_agua} * (T_{out\_Rec} - T_{en\_Rec}) * 0 \\
Q_{\dot{R}et03} &= m_{\dot{l}ec03} * C_{p\_agua} * (T_{out\_Ret} - T_{en\_Ret}) * 0 \\
Q_{\dot{E}st03} &= m_{\dot{l}ec03} * C_{p\_agua} * (T_{out\_Est} - T_{en\_Est}) * 0
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Q_{03} &= (Q_{\dot{T}an03} + Q_{\dot{Y}og03} + Q_{\dot{T}203} + Q_{\dot{T}103} + Q_{\dot{T}003} \\
&\quad + Q_{\dot{M}or03} + Q_{\dot{R}ec03} + Q_{\dot{R}et03} + Q_{\dot{E}st03}) \\
&\quad * \text{convert}(Kj/h; Kw)
\end{aligned}$$

"Carga a las 04:00 hs"

$$\begin{aligned}
Q_{\dot{T}an04} &= m_{\dot{t}an} * C_{p\_agua} * (T_{out\_Tan} - T_{en\_Tan}) * 0 \\
Q_{\dot{Y}og04} &= m_{\dot{d}er04} * C_{p\_agua} * (T_{out\_Yog} - T_{en\_Yog}) * 0 \\
Q_{\dot{T}204} &= m_{\dot{d}er04} * C_{p\_agua} * (T_{out\_T2} - T_{en\_T2}) * 0 \\
Q_{\dot{T}104} &= m_{\dot{d}er04} * C_{p\_agua} * (T_{out\_T1} - T_{en\_T1}) * 0 \\
Q_{\dot{T}004} &= m_{\dot{T}0} * C_{p\_agua} * (T_{out\_T0} - T_{en\_T0}) * 0 \\
Q_{\dot{M}or04} &= m_{\dot{d}er04} * C_{p\_agua} * (T_{out\_Mor} - T_{en\_Mor}) * 0 \\
Q_{\dot{R}ec04} &= m_{\dot{l}ec04} * C_{p\_agua} * (T_{out\_Rec} - T_{en\_Rec}) * 0 \\
Q_{\dot{R}et04} &= m_{\dot{l}ec04} * C_{p\_agua} * (T_{out\_Ret} - T_{en\_Ret}) * 0 \\
Q_{\dot{E}st04} &= m_{\dot{l}ec04} * C_{p\_agua} * (T_{out\_Est} - T_{en\_Est})
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Q_{04} &= (Q_{\dot{T}an04} + Q_{\dot{Y}og04} + Q_{\dot{T}204} + Q_{\dot{T}104} + Q_{\dot{T}004} \\
&\quad + Q_{\dot{M}or04} + Q_{\dot{R}ec04} + Q_{\dot{R}et04} + Q_{\dot{E}st04}) \\
&\quad * \text{convert}(Kj/h; Kw)
\end{aligned}$$

"Carga a las 05:00 hs"

$$\begin{aligned}
Q_{\dot{T}an05} &= m_{\dot{t}an} * C_{p\_agua} * (T_{out\_Tan} - T_{en\_Tan}) * 0 \\
Q_{\dot{Y}og05} &= m_{\dot{d}er05} * C_{p\_agua} * (T_{out\_Yog} - T_{en\_Yog}) * 0 \\
Q_{\dot{T}205} &= m_{\dot{d}er05} * C_{p\_agua} * (T_{out\_T2} - T_{en\_T2}) * 0 \\
Q_{\dot{T}105} &= m_{\dot{d}er05} * C_{p\_agua} * (T_{out\_T1} - T_{en\_T1}) * 0 \\
Q_{\dot{T}005} &= m_{\dot{T}0} * C_{p\_agua} * (T_{out\_T0} - T_{en\_T0}) * 0 \\
Q_{\dot{M}or05} &= m_{\dot{d}er05} * C_{p\_agua} * (T_{out\_Mor} - T_{en\_Mor}) * 0 \\
Q_{\dot{R}ec05} &= m_{\dot{l}ec05} * C_{p\_agua} * (T_{out\_Rec} - T_{en\_Rec}) * 0 \\
Q_{\dot{R}et05} &= m_{\dot{l}ec05} * C_{p\_agua} * (T_{out\_Ret} - T_{en\_Ret}) * 0 \\
Q_{\dot{E}st05} &= m_{\dot{l}ec05} * C_{p\_agua} * (T_{out\_Est} - T_{en\_Est})
\end{aligned}$$

$$Q_{05} = (Q_{\dot{T}an05} + Q_{\dot{Y}og05} + Q_{\dot{T}205} + Q_{\dot{T}105} + Q_{\dot{T}005} \\ + Q_{\dot{M}or05} + Q_{\dot{R}ec05} + Q_{\dot{R}et05} + Q_{\dot{E}st05}) \\ * \text{convert}(Kj/h; Kw)$$

## Anexo K. Análisis desempeño teórico ciclo termodinámico.

### "! ANALISIS MASA DEL REFRIGERANTE"

#### "! Analisis de presiones"

$$P_{succion} = 328 \text{ "kPa"}$$

$$P_{descarga} = 1278 \text{ "kPa"}$$

$$T_{succion} = 0 \text{ "°C"}$$

$$T_{descarga} = 118 \text{ "°C"}$$

$$P_b = P_{succion} - 15 \text{ "presion de succion - perdidas"}$$

$$P_c = P_{descarga} + 30 \text{ "presion de descarga + perdidas"}$$

$$rve = P_b/P_{succion}$$

$$\rho_a = \text{Density}(R717; T = T_{succion}; P = P_{succion})$$

$$v_{esp} = 1/\rho_a$$

#### "! Eficiencia volumetrica REAL"

$$c_p = C_p(\text{Ammonia}; T = T_{succion}; P = P_{succion})$$

$$c_v = C_v(\text{Ammonia}; T = T_{succion}; P = P_{succion})$$

$$k_1 = c_p/c_v$$

$$\eta_{comp} = rve * (1 - 0,07 * ((P_{descarga}/P_{succion})^{(1/k_1)} - 1))$$

#### "COMPRESOR 1 al 100%"

$$D_{p1} = 0,095 \text{ "Diametro del piston"}$$

$$L_{p1} = 0,076 \text{ "Carrera"}$$

$$Z_1 = 6 \text{ "Numero de cilindros"}$$

$$V_{fisico1} = (\pi * D_{p1}^2)/4 * L_{p1} * Z_1$$

$$M_{refciclo1} = \eta_{comp} * V_{fisico1}/v_{esp}$$

$$m_{ref1} = M_{refciclo1} * Rpm1_{c2}/60$$

$$Rpm1_{c1}/Rpm1_{c2} = D1_{c2}/D1_{c1}$$

$$Rpm1_{c1} = 1770 \text{ [Rpm] "Velocidad motor"}$$

$$D1_{c2} = 40 \text{ [cm] "Diametro polea compresor"}$$

$$D1_{c1} = 26 \text{ [cm] "Diametro polea motor"}$$

#### "Compresor 2 al 100%"

$$D_{p2} = 0,095 \text{ "Diametro del piston"}$$

$$L_{p2} = 0,076 \text{ "Carrera"}$$

$$Z_2 = 4 \text{ "Numero de cilindros"}$$

$$V_{fisico2} = (\pi * D_{p2}^2)/4 * L_{p2} * Z_2$$

$$M_{refciclo2} = \eta_{comp} * V_{fisico2}/v_{esp}$$

$$m_{ref2} = M_{refciclo2} * Rpm2_{c2}/60$$

$$Rpm2_{c1}/Rpm2_{c2} = D2_{c2}/D2_{c1}$$

$Rpm2\_c1 = 1760$  [Rpm]  
 $D2\_c2 = 40$ [cm]  
 $D2\_c1 = 21$  [cm]

"Compresor 3 al 100%"

$Dp3 = 0,095$  "Diametro del piston"  
 $Lp3 = 0,076$  "Carrera"  
 $Z3 = 4$  "Numero de cilindros"  
 $V\_fisico3 = (\pi * Dp3^2)/4 * Lp3 * Z3$   
 $M\_refciclo3 = \eta_{comp} * V\_fisico3/v\_esp$   
 $m\_ref3 = M\_refciclo3 * Rpm3\_c2/60$

$Rpm3\_c1/Rpm3\_c2 = D3\_c2/D3\_c1$   
 $Rpm3\_c1 = 1765$  [Rpm]  
 $D3\_c2 = 40$  [cm]  
 $D3\_c1 = 26$  [cm]

"Compresor 4 al 100%"

$Dp4 = 0,095$  "Diametro del piston"  
 $Lp4 = 0,076$  "Carrera"  
 $Z4 = 6$  "Numero de cilindros"  
 $V\_fisico4 = (\pi * Dp4^2)/4 * Lp4 * Z4$   
 $M\_refciclo4 = \eta_{comp} * V\_fisico4/v\_esp$   
 $m\_ref4 = M\_refciclo4 * Rpm4\_c2/60$

$Rpm4\_c1/Rpm4\_c2 = D4\_c2/D4\_c1$   
 $Rpm4\_c1 = 1770$  [Rpm]  
 $D4\_c2 = 40$  [cm]  
 $D4\_c1 = 26$  [cm]

"MASA DEL REFRIGERANTE TOTAL"

$MasaRef\_total = m\_ref3\{+m\_ref4 + m\_ref1 + m\_ref2\}$  "Kg/seg"

"! CICLO TERMODINAMICO"

"Entrada al compresor"

$h\_1 = Enthalpy(R717; x = 1; P = P\_succion)$  "kJ/kg"

$s\_1 = Entropy(R717; x = 1; P = P\_succion)$

"Salida del compresor"

$h\_2real = Enthalpy(R717; T = T\_descarga; P = P\_descarga)$  "kJ/kg"

$h\_2ideal = Enthalpy(R717; s = s\_1; P = P\_descarga)$  "kJ/kg"

"Eficiencia del compresor"

$\eta_{\text{ciclo}} = (h_{2\text{ideal}} - h_1)/(h_{2\text{real}} - h_1)$   
*"Salida del condensador"*  
 $h_4 = \text{Enthalpy}(\text{R717}; x = 0; P = P_{\text{descarga}})$  "kJ/kg"  
 $T_4 = \text{Temperature}(\text{R717}; P = P_{\text{descarga}}; h = h_4)$   
*"Salida de la valvula de expansión"*  
 $T_5 = \text{Temperature}(\text{R717}; h = h_4; P = P_{\text{succion}})$   
 $x_5 = \text{Quality}(\text{R717}; T = T_5; h = h_4)$

*"! ANALISIS DE LA CARGA EN EL BANCO DE HIELO"*  
 $Q_{\text{ciclo}} = \text{MasaRef}_{\text{total}} * (h_1 - h_4)$  "kW"

*"Potencia de los compresores"*  
 $\{\text{Pot1} = m_{\text{ref1}} * (h_{2\text{real}} - h_1)\}$   
 $\text{Pot3} = m_{\text{ref3}} * (h_{2\text{real}} - h_1)$  "kW"  
 $\{\text{Pot4} = m_{\text{ref4}} * (h_{2\text{real}} - h_1)\}$  "kW"  
 $\{\text{Pot2} = m_{\text{ref2}} * (h_{2\text{real}} - h_1)\}$  "kW"

*"POTENCIA TOTAL"*  
 $\text{POT} = \text{Pot3}\{+ \text{Pot4} + \text{Pot1} + \text{Pot2}\}$  "kW"  
*"COP"*  
 $\text{COP}_{\text{real}} = (h_1 - h_4)/(h_{2\text{real}} - h_1)$   
 $\text{COP}_{\text{Ideal}} = (h_1 - h_4)/(h_{2\text{ideal}} - h_1)$

## Anexo L. Calculo de cargas nuevo diseño.

*"Análisis nuevo diseño"*

*"Datos productos del sistema"*

*"Temperaturas de entrada"*

$$T_{inPRec} = 8 [^{\circ}C]$$

$$T_{inPRet} = 27$$

$$T_{inPEstRed} = 35$$

$$T_{inPEstNew} = 35$$

$$T_{inPPasUHT} = 15$$

$$T_{inPTan} = 30$$

$$T_{inPYog} = 30$$

$$T_{inPT0} = 42$$

$$T_{inPT1} = 42$$

$$T_{inPT2} = 42$$

$$T_{inPMor} = 25$$

*"Temperatura de Salida"*

$$T_{outPRec} = 4$$

$$T_{outPRet} = 4$$

$$T_{outPEstRed} = 27$$

$$T_{outPEstNew} = 27$$

$$T_{outPPasUHT} = 4$$

$$T_{outPTan} = 12,5$$

$$T_{outPYog} = 8$$

$$T_{outPT0} = 38$$

$$T_{outPT1} = 38$$

$$T_{outPT2} = 38$$

$$T_{outPMor} = 22$$

*"Cp de los productos"*

$$Cp_{Rec} = 3,89 [Kj/Kg ^{\circ}C]$$

$$Cp_{Ret} = 3,89 [Kj/Kg ^{\circ}C]$$

$$Cp_{EstRed} = 3,89 [Kj/Kg ^{\circ}C]$$

$$Cp_{EstNew} = 3,89 [Kj/Kg ^{\circ}C]$$

$$Cp_{PasUHT} = 3,89 [Kj/Kg ^{\circ}C]$$

$$Cp_{Tan} = 4,1 [Kj/Kg ^{\circ}C]$$

$$Cp_{Yog} = 3,8 [Kj/Kg ^{\circ}C]$$

$$Cp_{T0} = 3,8 [Kj/Kg ^{\circ}C]$$

$$Cp_{T1} = 3,8 [Kj/Kg ^{\circ}C]$$

$$Cp_{T2} = 3,8 [Kj/Kg ^{\circ}C]$$

$$Cp\_Mor = 3,8 [Kj/Kg \text{ } ^\circ C]$$

*"densidad de producto"*

$$\rho_{Rec} = 1030 [Kg/m^3]$$

$$\rho_{Ret} = 1030 [Kg/m^3]$$

$$\rho_{EstRed} = 1030 [Kg/m^3]$$

$$\rho_{EstNew} = 1030 [Kg/m^3]$$

$$\rho_{PasUHT} = 1030 [Kg/m^3]$$

$$\rho_{Tan} = 1010 [Kg/m^3]$$

$$\rho_{Yog} = 1080 [Kg/m^3]$$

$$\rho_{T0} = 1080 [Kg/m^3]$$

$$\rho_{T1} = 1080 [Kg/m^3]$$

$$\rho_{T2} = 1080 [Kg/m^3]$$

$$\rho_{Mor} = 1080 [Kg/m^3]$$

*"Volumen del producto tanques"*

$$Vol_{Yog} = 15,720 [m^3]$$

$$Vol_{T0} = 6,080 [m^3]$$

$$Vol_{T1} = 5,560 [m^3]$$

$$Vol_{T2} = 4,080 [m^3]$$

*"Velocidad de el producto"*

$$V_{Rec} = 22,5 [m^3/h]$$

$$V_{Ret} = 1,2 [m^3/h]$$

$$V_{EstRed} = 15 [m^3/h]$$

$$V_{EstNew} = 4 [m^3/h]$$

$$V_{PasUHT} = 10 [m^3/h]$$

$$V_{Tan} = 4 [m^3/h]$$

$$V_{Yog} = Vol_{Yog}/horasYogurt$$

$$V_{T0} = Vol_{T0}/horasT0$$

$$V_{T1} = Vol_{T1}/horasT1$$

$$V_{T2} = Vol_{T2}/horasT2$$

$$V_{Mor} = 3,6 [m^3/h]$$

*"horas de trabajo"*

$$horasYogurt = 8,25 [m^3]$$

$$horasT0 = 1,92 [m^3]$$

$$horasT1 = 3 [m^3]$$

$$horasT2 = 3,5 [m^3]$$

*"Calculo de cargas del producto"*

$$Q_{PRec} = \rho_{Rec} * V_{Rec} * Cp_{Rec} * (T_{inPRec} - T_{outPRec}) \\ * \text{convert}(Kj/h; Kw)$$

$$Q_{PRet} = \rho_{Ret} * V_{Ret} * Cp_{Ret} * (T_{inPRet} - T_{outPRet}) * \text{convert}(Kj/h; Kw)$$

$$Q_{PEstRed} = \rho_{EstRed} * V_{EstRed} * Cp_{EstRed} * (T_{inPEstRed} \\ - T_{outPEstRed}) * \text{convert}(Kj/h; Kw)$$

$$Q_{PEstNew} = \rho_{EstNew} * V_{EstNew} * Cp_{EstNew} * (T_{inPEstNew} \\ - T_{outPEstNew}) * \text{convert}(Kj/h; Kw)$$

$$Q_{PPasUHT} = \rho_{PasUHT} * V_{PasUHT} * Cp_{PasUHT} * (T_{inPPasUHT} \\ - T_{outPPasUHT}) * \text{convert}(Kj/h; Kw)$$

$$Q_{PTan} = \rho_{Tan} * V_{Tan} * Cp_{Tan} * (T_{inPTan} - T_{outPTan}) \\ * \text{convert}(Kj/h; Kw)$$

$$Q_{PYog} = \rho_{Yog} * V_{Yog} * Cp_{Yog} * (T_{inPYog} - T_{outPYog}) \\ * \text{convert}(Kj/h; Kw)$$

$$Q_{PT0} = \rho_{T0} * V_{T0} * Cp_{T0} * (T_{inPT0} - T_{outPT0}) * \text{convert}(Kj/h; Kw)$$

$$Q_{PT1} = \rho_{T1} * V_{T1} * Cp_{T1} * (T_{inPT1} - T_{outPT1}) * \text{convert}(Kj/h; Kw)$$

$$Q_{PT2} = \rho_{T2} * V_{T2} * Cp_{T2} * (T_{inPT2} - T_{outPT2}) * \text{convert}(Kj/h; Kw)$$

$$Q_{PMor} = \rho_{Mor} * V_{Mor} * Cp_{Mor} * (T_{inPMor} - T_{outPMor}) \\ * \text{convert}(Kj/h; Kw)$$

*"Calculo cargas para el sistema"*

$$Q_{PRec} = \eta_{inter} * Q_{Rec}$$

$$Q_{PRet} = \eta_{inter} * Q_{Ret}$$

$$Q_{PEstRed} = \eta_{inter} * Q_{EstRed}$$

$$Q_{PEstNew} = \eta_{inter} * Q_{EstNew}$$

$$Q_{PPasUHT} = \eta_{inter} * Q_{PasUHT}$$

$$Q_{PTan} = \eta_{inter} * Q_{Tan}$$

$$Q_{PYog} = \eta_{inter} * Q_{Yog}$$

$$Q_{PT0} = \eta_{inter} * Q_{T0}$$

$$Q_{PT1} = \eta_{inter} * Q_{T1}$$

$$Q_{PT2} = \eta_{inter} * Q_{T2}$$

$$Q_{PMor} = \eta_{inter} * Q_{Mor}$$

$$\eta_{inter} = 0,9$$

*"Calculo cargas por horas"*

*"Sistema de baja"*

$$QB_{06} = Q_{Ret} + 0 * Q_{Yog} + 0 * Q_{T0} + 0 * Q_{T1} + 0 * Q_{T2} + Q_{Mor} \\ + Q_{EstNew}$$

$$QB_{07} = Q_{Ret} + 0 * Q_{Yog} + 0 * Q_{T0} + 0 * Q_{T1} + 0 * Q_{T2} + Q_{Mor} \\ + Q_{EstNew}$$

$$\begin{aligned}
QB_{08} &= Q_{Ret} + 0 * Q_{Yog} + 0 * Q_{T0} + 0 * Q_{T1} + 0 * Q_{T2} + Q_{Mor} \\
&\quad + Q_{EstNew} \\
QB_{09} &= Q_{Ret} + 0 * Q_{Yog} + 0 * Q_{T0} + 0 * Q_{T1} + 0 * Q_{T2} + Q_{Mor} \\
&\quad + Q_{EstNew} \\
QB_{10} &= Q_{Ret} + 0 * Q_{Yog} + 0 * Q_{T0} + 0 * Q_{T1} + 0 * Q_{T2} + Q_{Mor} \\
&\quad + Q_{EstNew} \\
QB_{11} &= Q_{Ret} + 0 * Q_{Yog} + 0 * Q_{T0} + 0 * Q_{T1} + 0 * Q_{T2} + Q_{Mor} \\
&\quad + Q_{EstNew} \\
QB_{12} &= Q_{Ret} + 0 * Q_{Yog} + 0 * Q_{T0} + 0 * Q_{T1} + 0 * Q_{T2} + Q_{Mor} \\
&\quad + Q_{EstNew} \\
QB_{13} &= Q_{Ret} + 0 * Q_{Yog} + 0 * Q_{T0} + 0 * Q_{T1} + 0 * Q_{T2} + Q_{Mor} \\
&\quad + Q_{EstNew} \\
QB_{14} &= Q_{Ret} + 0 * Q_{Yog} + 0 * Q_{T0} + 0 * Q_{T1} + 0 * Q_{T2} + Q_{Mor} \\
&\quad + Q_{EstNew} \\
QB_{15} &= Q_{Ret} + 0 * Q_{Yog} + 0 * Q_{T0} + 0 * Q_{T1} + 0 * Q_{T2} + 0 * Q_{Mor} \\
&\quad + Q_{EstNew} \\
QB_{16} &= Q_{Ret} + 0 * Q_{Yog} + 0 * Q_{T0} + 0 * Q_{T1} + 0 * Q_{T2} + 0 * Q_{Mor} \\
&\quad + Q_{EstNew} \\
QB_{17} &= Q_{Ret} + 3/4 * Q_{Yog} + 0 * Q_{T0} + 0 * Q_{T1} + Q_{T2} + 0 * Q_{Mor} \\
&\quad + Q_{EstNew} \\
QB_{18} &= Q_{Ret} + Q_{Yog} + 0 * Q_{T0} + 0 * Q_{T1} + Q_{T2} + 0 * Q_{Mor} + Q_{EstNew} \\
QB_{19} &= 0 * Q_{Ret} + Q_{Yog} + 0 * Q_{T0} + Q_{T1} + 0 * Q_{T2} + 0 * Q_{Mor} \\
QB_{20} &= 0 * Q_{Ret} + Q_{Yog} + 0 * Q_{T0} + Q_{T1} + 0 * Q_{T2} + 0 * Q_{Mor} \\
QB_{21} &= 0 * Q_{Ret} + Q_{Yog} + 0 * Q_{T0} + Q_{T1} + 0 * Q_{T2} + 0 * Q_{Mor} \\
QB_{22} &= 0 * Q_{Ret} + Q_{Yog} + Q_{T0} + 0 * Q_{T1} + 0 * Q_{T2} + 0 * Q_{Mor} \\
QB_{23} &= 0 * Q_{Ret} + Q_{Yog} + Q_{T0} + 0 * Q_{T1} + 0 * Q_{T2} + 0 * Q_{Mor} \\
QB_0 &= 0 * Q_{Ret} + Q_{Yog} + Q_{T0} + 0 * Q_{T1} + 0 * Q_{T2} + 0 * Q_{Mor} \\
QB_{01} &= 0 * Q_{Ret} + 1/2 * Q_{Yog} + 1/2 * Q_{T0} + 0 * Q_{T1} + 0 * Q_{T2} + 0 * Q_{Mor} \\
QB_{02} &= 0 * Q_{Ret} + 0 * Q_{Yog} + Q_{T0} + 0 * Q_{T1} + 0 * Q_{T2} + 0 * Q_{Mor} \\
QB_{03} &= 0 * Q_{Ret} + 0 * Q_{Yog} + Q_{T0} + 0 * Q_{T1} + 0 * Q_{T2} + 0 * Q_{Mor} \\
QB_{04} &= 0 * Q_{Ret} + 0 * Q_{Yog} + Q_{T0} + 0 * Q_{T1} + 0 * Q_{T2} + 0 * Q_{Mor} \\
QB_{05} &= 0 * Q_{Ret} + 0 * Q_{Yog} + Q_{T0} + 0 * Q_{T1} + 0 * Q_{T2} + 0 * Q_{Mor}
\end{aligned}$$

*"Sistemas de alta"*

$$\begin{aligned}
QA_{06} &= Q_{Rec} + Q_{EstRed} + Q_{PasUHT} + 0 * Q_{Tan} \\
QA_{07} &= Q_{Rec} + Q_{EstRed} + Q_{PasUHT} + 0 * Q_{Tan} \\
QA_{08} &= Q_{Rec} + Q_{EstRed} + Q_{PasUHT} + 0 * Q_{Tan} \\
QA_{09} &= Q_{Rec} + Q_{EstRed} + Q_{PasUHT} + 0 * Q_{Tan} \\
QA_{10} &= Q_{Rec} + Q_{EstRed} + Q_{PasUHT} + 0 * Q_{Tan} \\
QA_{11} &= Q_{Rec} + Q_{EstRed} + Q_{PasUHT} + 0 * Q_{Tan} \\
QA_{12} &= Q_{Rec} + Q_{EstRed} + Q_{PasUHT} + 0 * Q_{Tan} \\
QA_{13} &= Q_{Rec} + Q_{EstRed} + Q_{PasUHT} + 0 * Q_{Tan} \\
QA_{14} &= Q_{Rec} + Q_{EstRed} + Q_{PasUHT} + 0 * Q_{Tan} \\
QA_{15} &= Q_{Rec} + Q_{EstRed} + Q_{PasUHT} + 0 * Q_{Tan}
\end{aligned}$$

$QA_{16} = Q_{Rec} + Q_{EstRed} + Q_{PasUHT} + 0 * Q_{Tan}$   
 $QA_{17} = Q_{Rec} + Q_{EstRed} + Q_{PasUHT} + 0 * Q_{Tan}$   
 $QA_{18} = Q_{Rec} + Q_{EstRed} + Q_{PasUHT} + 0 * Q_{Tan}$   
 $QA_{19} = Q_{Rec} + 0 * Q_{EstRed} + Q_{PasUHT} + 0 * Q_{Tan}$   
 $QA_{20} = Q_{Rec} + 0 * Q_{EstRed} + Q_{PasUHT} + 0 * Q_{Tan}$   
 $QA_{21} = Q_{Rec} + 0 * Q_{EstRed} + Q_{PasUHT} + 0 * Q_{Tan}$   
 $QA_{22} = 0 * Q_{Rec} + 0 * Q_{EstRed} + Q_{PasUHT} + 1/2 * Q_{Tan}$   
 $QA_{23} = 0 * Q_{Rec} + 0 * Q_{EstRed} + Q_{PasUHT} + Q_{Tan}$   
 $QA_{00} = 0 * Q_{Rec} + 0 * Q_{EstRed} + 0 * Q_{PasUHT} + Q_{Tan}$   
 $QA_{01} = 0 * Q_{Rec} + 0 * Q_{EstRed} + 0 * Q_{PasUHT} + Q_{Tan}$   
 $QA_{02} = 0 * Q_{Rec} + 0 * Q_{EstRed} + 0 * Q_{PasUHT} + Q_{Tan}$   
 $QA_{03} = 0 * Q_{Rec} + 0 * Q_{EstRed} + 0 * Q_{PasUHT} + 2/3 * Q_{Tan}$   
 $QA_{04} = 0 * Q_{Rec} + 0 * Q_{EstRed} + 0 * Q_{PasUHT} + 0 * Q_{Tan}$   
 $QA_{05} = 0 * Q_{Rec} + 0 * Q_{EstRed} + 0 * Q_{PasUHT} + 0 * Q_{Tan}$

Anexo M. Diagramas AutoCAD

