

**PROPUESTA DE MEJORA DEL SISTEMA DE SECADO DE PRODUCTO
GRANULADO EMPLEADO EN LA EMPRESA PUNTO NATURAL ZAMORA
PRIETO S.A.S**

CINDY PAOLA PEREZ CARRILLO

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C.
2017**

**PROPUESTA DE MEJORA DEL SISTEMA DE SECADO DE PRODUCTO
GRANULADO EMPLEADO EN LA EMPRESA PUNTO NATURAL ZAMORA
PRIETO S.A.S**

CINDY PAOLA PEREZ CARRILLO

**Proyecto integral de grado para optar el título de:
INGENIERO QUÍMICO**

**Director
JULIAN ZAMORA PRIETO
Ingeniero Químico**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C.
2017**

Nota de aceptación

Ing. Diego Nicolás Rodríguez
Presidente del Jurado

Ing. Nubia Liliana Becerra
Jurado

Ing. Claudio Alberto Moreno
Jurado

Bogotá, D.C., Marzo de 2017

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro.

Dr. JAIME POSADA DÍAZ

Vicerrector de Desarrollo y Recursos Humanos.

Dr. LUIS JAIME POSADA GARCÍA-PEÑA

Vicerrectora Académica y de Posgrados.

Dra. ANA JOSEFA HERRERA VARGAS

Secretario General.

Dr. JUAN CARLOS POSADA GARCÍA-PEÑA

Decano Facultad de Ingenierías.

Ing. JULIO CESAR FUENTES ARISMENDI

Director Programa de Ingeniería Química.

Ing. LEONARDO DE JESÚS HERRERA GUTIERREZ

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo de docentes no son responsables por los criterios ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo inicialmente a Dios, por ser mi guía, mi gran apoyo, mi fiel pastor, por brindarme la oportunidad de culminar esta etapa de la vida, gracias. A mis padres Mauricio Pérez y Alexandra Carrillo, por apoyarme y acompañarme en todo momento, por su amor y absoluta confianza, por brindarme la oportunidad de crecer profesional y personalmente. A mis hermanas por su compañía en este largo camino, por su amor y apoyarme a cumplir este sueño. A mi novio por llenar de alegría cada día pasado, por estar junto a mí y animarme a ser una mejor persona en el transcurso de este largo camino.

Cindy Paola Pérez Carrillo.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar agradeceré a Dios, por acompañarme a lo largo de la carrera, por las bendiciones y oportunidades que me ha dado, por hacer posible la elaboración de este proyecto de grado.

A mis padres por su amor y apoyo incondicional, por la oportunidad que me dieron para formarme como profesional.

A la empresa Punto Natural Zamora Prieto S.A.S, por la oportunidad ofrecida para desarrollar el proyecto de grado, en especial al director y gerente de la empresa, Julián Zamora Prieto, por hacer préstamo del área de producción, equipos, insumos y personal para el desarrollar con éxito los objetivos del proyecto.

Al profesor Luis Ignacio Rodríguez Varela, profesor de la Universidad Nacional por la orientación, dedicación, asesorías y recomendaciones brindadas en el proceso del desarrollo del proyecto.

Al asesor de Tesis Diego Nicolás Rodríguez por su completa disposición y ayuda durante las asesorías brindadas.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	20
OBJETIVOS	21
1. MARCO TEÓRICO	22
1.1 GENERALIDADES	22
1.1.1 Secado	22
1.1.2 Secadores de productos termolábiles	24
1.2 FUNDAMENTOS DEL SECADO AL VACÍO	25
1.2.1 Principio de proceso de secado	26
1.2.2 Etapas del proceso de secado al vacío	26
1.2.2.1 Calentamiento producto	27
1.2.2.2 Vaporización de la humedad del producto	27
1.2.2.3 Cristalización – condensación de la humedad	27
1.2.3 Transferencia de masa y calor	28
1.2.4 Subsistemas del secador al vacío	28
1.2.4.1 Cámara de trabajo	28
1.2.4.2 Sistema de bandejas	30
1.2.4.3 Sistema de calentamiento del producto	30
1.2.4.4 Sistema de vacío	30
1.2.4.5 Sistema de refrigeración	30
2. DIAGNÓSTICO DEL PROCESO DE SECADO EN LA PRODUCCIÓN DE PRODUCTO GRANULADO	33
2.1 GENERALIDADES	33
2.2 DESCRIPCIÓN ACTUAL DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DEL ENDULZANTE GRANULADO	34
2.2.1 Formulación del producto	34
2.2.2 Mezclado	35
2.2.3 Granulación	35
2.2.4 Proceso de secado	35
2.2.4.1 Sistema de calentamiento	38
2.2.4.2 Sistema de refrigeración	39
2.2.4.3 Sistema de Vacío	42
2.2.4.4 Equipo auxiliar	42
2.3 DIAGNÓSTICO AL PROCESO DE PRODUCCIÓN	43
2.3.1 Análisis de causa de los procesos	44
2.3.1.1 Formulación del producto	45
2.3.1.2 Mezclado	45
2.3.1.3 Granulación	45

2.3.1.4 Secado	45
2.3.2 Alternativas propuestas de mejora	47
2.3.2.1 Propuesta de ajuste	47
2.3.2.2 Alternativa de diseño de secador de bandejas al vacío	48
3. BASES DE DISEÑO PARA EL PLANTEAMIENTO DEL SECADOR AL VACÍO	50
3.1 PRINCIPIO DE OPERACIÓN DE UN SECADOR AL VACÍO	50
3.1.1 Conservación de la materia	50
3.2 CONSIDERACIONES PRELIMINARES	52
3.2.1 Factores de diseño	52
3.2.1.1 Condiciones térmicas y presión	52
3.2.1.2 Capacidad del equipo de secado	53
3.2.1.3 Sistema de refrigeración	53
3.3 METODOLOGÍA	54
3.3.1 Cálculos del sistema de calentamiento	54
3.3.1.1 Cantidad de agua a evaporar	55
3.3.1.2 Flujos másicos del líquido y sólido	55
3.3.1.3 Medias térmicas logarítmicas MLDT	56
3.3.1.4 Cargas caloríficas del sistema	57
3.3.1.5 Coeficiente global de transferencia de calor	58
3.3.1.6 Área superficial ajustada por la carga	59
3.3.1.7 Carga total del secador	59
3.3.2 Cálculos del sistema de refrigeración	60
3.3.2.1 Cálculo de la potencia frigorífica	61
3.3.2.2 Carga refrigerante	61
3.3.2.3 Potencia de compresión	62
4. DISEÑO BÁSICO DEL SECADOR AL VACÍO PROPUESTO	63
4.1 SISTEMA DE CALENTAMIENTO DEL EQUIPO	63
4.1.1 Cálculo de la masa de agua a evaporar	63
4.1.2 Cálculos flujos másicos del líquido y sólido	64
4.1.3 Cálculo de las Medias térmicas logarítmicas MLDT	64
4.1.4 Cálculo de las cargas caloríficas del sistema	65
4.1.5 Cálculo coeficiente global de transferencia de calor	66
4.1.6 Cálculo área superficial de transferencia de calor total	66
4.1.7 Cálculo de carga total del secador	68
4.1.8 Dimensionamiento resistencias de calentamiento	69
4.2 SISTEMA DE REFRIGERACIÓN	71
4.2.1 Cálculo de la potencia frigorífica	71
4.2.2 Cálculo de la carga refrigerante	72
4.2.3 Cálculo potencia teórica de compresión	72
4.2.4 Dimensionamiento del sistema de refrigeración	73
4.2.4.1 Evaporador	73
4.2.4.2 Compresor	77

4.2.4.3 Condensador	77
4.3 DISEÑO DE LA CÁMARA DE SECADO	83
4.4 AISLAMIENTO DE LA CÁMARA	84
4.5 SISTEMA DE VACÍO	85
4.5.1 Volumen de la cámara	85
4.5.2 Tiempo para obtener el vacío	86
4.5.3 Selección de la bomba de vacío	86
4.6 FUNCIONAMIENTO Y MANEJO BÁSICO DEL EQUIPO DE SECADO PROPUESTO.	87
5. EVALUACIÓN DE COSTOS RELACIONADOS CON LA CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO DE SECADO PROPUESTO	89
5.1 COSTOS DE EQUIPOS	89
5.1.1 Cámara de Trabajo	89
5.1.2 Sistema de refrigeración	90
5.1.3 Sistema de vacío	91
5.1.4 Sistema de calentamiento	91
5.2 COSTOS DE MONTAJE	92
5.3 COSTO TOTAL	92
6. CONCLUSIONES	93
7. RECOMENDACIONES	94
BIBLIOGRAFÍA	95
ANEXOS	97

LISTA DE CUADROS

	pág.
Cuadro 1. Características generales del secador actual.	37
Cuadro 2. Especificaciones de la cámara de secado.	38
Cuadro 3. Sistema de calentamiento (resistencia).	39
Cuadro 4. Especificaciones de la bomba de vacío actual.	42
Cuadro 5. Especificaciones del soplador.	43
Cuadro 6. Propuestas de ajuste del secador actual.	47
Cuadro 7. Especificaciones técnicas de diseño.	49
Cuadro 8. Información para el cálculo del sistema de calentamiento.	56
Cuadro 9. Especificaciones sistema de refrigeración.	60
Cuadro 10. Propiedades del aire a la presión de 1 atm	80
Cuadro 11. Especificaciones de las bombas de vacío.	86

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Formulación de bandeja de endulzante granulado.	34
Tabla 2. Área superficial del evaporador.	41
Tabla 3. Parámetros iniciales.	54
Tabla 4. Temperaturas para las zonas de operación de calentamiento.	57
Tabla 5. Cálculo MLDT.	65
Tabla 6. Cálculo de cargas térmicas por zona.	65
Tabla 7. Cálculo de áreas superficiales totales en el secador.	68
Tabla 8. Dimensionamiento del evaporador.	76
Tabla 9. Parámetros de diseño del condensador.	82
Tabla 10. Tabla de costos de la construcción de la cámara de trabajo.	90
Tabla 11. Tabla de costos para el sistema de refrigeración.	90
Tabla 12. Tabla costos sistema de vacío.	91
Tabla 13. Tabla costos sistema de calentamiento.	91
Tabla 14. Tabla costos totales.	91
Tabla 15. Costos mano de obra.	92
Tabla 16. Costo total de implementación del equipo.	92

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Contenido de agua en equilibrio para diferentes materiales a 25°C.	23
Figura 2. Curva de calentamiento del agua.	27
Figura 3. Cámara rectangular para proceso de liofilización en laboratorio.	29
Figura 4. Maquina Secadora al vacío tipo cilíndrica.	29
Figura 5. Esquema y diagrama P-h para el ciclo de refrigeración ideal por compresión de vapor.	31
Figura 6. Ubicación de la planta.	33
Figura 7. Diagrama de producción de endulzante granulado.	34
Figura 8. Método de secado actual del producto.	36
Figura 9. Secador al vacío actual de la empresa.	37
Figura 10. Ciclo de refrigeración por compresión.	39
Figura 11. Serpentín del sistema de condensación del agua.	40
Figura 12. Condensador y compresor.	41
Figura 13. Equipo auxiliar presente en el equipo actual.	42
Figura 14. Diagrama de flujo del secador al vacío propuesto.	51
Figura 15. Dimensiones para las bandeja propuestas.	58
Figura 16. Diagrama Presión- Entalpía para R134a.	61
Figura 17. Resistencias eléctricas planas.	69
Figura 18. Distribución de resistencias sobre placas portabandejas.	70
Figura 19. Diagrama P-h diseño de refrigerante 134 ^a diseño .	73
Figura 20. Construcción del evaporador.	74
Figura 21. Dimensionamiento del evaporador.	76
Figura 22. Esquema de construcción del condensador.	78
Figura 23. Convección forzada a lo largo de una placa plana.	80
Figura 24. Vista frontal y lateral de la estructura del liofilizador piloto.	83
Figura 25. Conductividad térmica del aislante seleccionado.	84

LISTA DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1. Balance global.	52
Ecuación 2. Balance de masa del agua.	55
Ecuación 3. Flujo másico del sólido en la alimentación.	55
Ecuación 4. Flujo másico del líquido en la alimentación.	55
Ecuación 5. Cálculo de MLDT para el calentamiento.	57
Ecuación 6. Carga de calor de los líquidos.	57
Ecuación 7. Carga de calor aportada por los sólidos.	57
Ecuación 8. Carga de calor aportada por la evaporación.	57
Ecuación 9. Coeficiente global de transferencia de calor.	58
Ecuación 10. Área superficial en cada zona.	59
Ecuación 11. Calor total requerido por lote.	60
Ecuación 12. Balance de energía y masa	61
Ecuación 13. Carga refrigerante.	62
Ecuación 14. Potencia teórica del compresor.	62
Ecuación 15. Calor total real del secador.	68
Ecuación 16. Carga de calor real por placa.	70
Ecuación 17. Longitud del serpentín.	75
Ecuación 18. Potencia real del compresor.	77
Ecuación 19. Capacidad del condensador.	78
Ecuación 20. Flujo másico de aire del ventilador.	79
Ecuación 22. Número de Reynolds.	81
Ecuación 23. Coeficiente de Nuselt.	81
Ecuación 24. Coeficiente de película sobre las placas del radiador.	81
Ecuación 25. Área de transferencia de calor del condensador.	82
Ecuación 26. Volumen de la cámara.	85
Ecuación 27. Tiempo de alcance de vacío.	86

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Tabla de presiones de vapor del agua líquida diferentes temperaturas	98
Anexo B. Diagrama (presión – entalpía) carta para el refrigerante Tetrafluoroethane (refrigerant 134a).	99
Anexo C. Tabla de propiedades del refrigerante R134 a.	100
Anexo D. Cotización de resistencias planas para implementar en el sistema de calentamiento del equipo propuesto.	101
Anexo E. Especificaciones de la unidad de condensación establecida para el sistema refrigerante del equipo.	102
Anexo F. Cotización sistema de refrigeración por la empresa TECHUMSEH.	103
Anexo G. Cotización bombas de vacío en diferentes empresas para implementación en la construcción del secador al vacío propuesto.	104

GLOSARIO

ACUMULADOR: (sistema refrigeración) recipiente encargado de recolectar el refrigerante condensado, una vez este ha salido de la unidad de condensación.

AGUA LIBRE: es aquel porcentaje de agua máxima extraíble de un producto por métodos mecánicos (exprimir, cortar o presionar) la cual se debe retirar para evitar alteraciones en el producto final.

AGUA LIGADA: porcentaje de agua cuyas moléculas existe una cantidad superior de uniones estructurales que el agua libre, de modo que el grado de extracción de esta es mayor y se requieren de métodos específicos, para reducir el porcentaje de humedad del producto inercialmente. Sin embargo, en ciertas ocasiones es necesario ser removida, para garantizar la estabilidad del producto final.

ALETA: también llamada superficie extendida, hace referencia a un cuerpo sólido que experimenta una transferencia de calor por conducción de otro cuerpo más grande, así como una transferencia de calor por convección dentro de sus límites.

BOMBA DE VACÍO: Dispositivo de compresión que ejerce fuerza de succión a un volumen de aire determinado, regulable mediante un sistema de ajuste, lo que permite disponer de una presión inferior a la presión atmosférica dentro de un volumen de control.

CALOR ESPECÍFICO: está definido como la cantidad de energía que se le debe suministrar a un cuerpo de un volumen determinado para elevar un grado la temperatura.

CALOR LATENTE: definido como la cantidad de energía que se le debe suministrar a un cuerpo de un volumen determinado para cambiar de estado.

CONDENSACIÓN: consiste en el cambio de estado de un material en estado gaseoso a estado líquido, a ciertas condiciones de presión y temperatura dependiendo del material.

CONDENSADOR: intercambiador de calor que permite disipar el calor absorbido por el fluido refrigerante en su paso por el evaporador y el compresor.

CONDUCCIÓN: consiste en la transferencia de calor entre 2 cuerpos que están en contacto a diferentes temperaturas.

DESORCIÓN: se presenta en un cuerpo sólido sometido a una temperatura, y liberando el gas que éste contiene.

EVAPORADOR: intercambiador de calor el cual permite atrapar el vapor de agua retirado del producto expresado como humedad del mismo, durante el proceso de secado de un material.

EVAPORACIÓN: consiste en el cambio de estado de un material en estado líquido o sólido a estado gaseoso, a ciertas condiciones de presión y temperatura dependiendo del material.

GRANULACIÓN: proceso mediante el cual las partículas primarias de polvo por medio de una solución aglomerante, forman estructuras más grandes con múltiples partículas.

HUMEDAD: cantidad de agua presente en un cuerpo, ya sea en estado gaseoso o líquido.

HUMEDAD EN EQUILIBRIO: es el contenido de humedad de una sustancia que está en el equilibrio con una presión parcial dada del vapor del líquido en estado puro.

POTENCIA FRIGORÍFICA: es la capacidad de extracción de calor dentro del volumen de control.

PROCESO ISOENTRÓPICO: también llamado isotrópico, es un proceso reversible y adiabático en el cual la entropía permanece constante debido al cambio de presión que se está ejerciendo sobre el fluido.

REFRIGERANTE: fluido encargado de absorber o disipar calor a lo largo del ciclo de refrigeración, a fin de reducir la temperatura sobre el evaporador, para su posterior uso en un sistema externo.

SECADOR AL VACÍO: dispositivo que permite secar productos a muy baja temperatura, en ausencia de oxígeno, con opción de recuperación de solvencia y sirve para secar materiales que se oxidan fácilmente durante el secado.

SONDA DE TEMPERATURA: dispositivo que trasmite la temperatura a un controlador por medio de emisores y receptores.

SUBLIMACIÓN INVERSA: también llamado cristalización, es el proceso de cambiar directamente de estado gaseoso a estado sólido.

TERMOLÁBIL: sustancia que tiene a perder estabilidad y naturaleza en presencia de calor, una vez deformado, el material no puede volver a su estado original.

TUBO CAPILAR: tubo de diámetro muy pequeño y corta longitud. El diámetro interno del tubo es utilizado para demostrar los efectos de la capilaridad. Puede

ser de varios materiales como vidrio, cobre, aleaciones metálicas etc.

VACÍO: herramienta usada por el secador para reducir el punto de ebullición del agua, al extraer de un espacio determinado la cantidad de aire contenido en éste.

VÁLVULA DE ESTRANGULAMIENTO: Regulan la velocidad de avance y retroceso del émbolo, funciona únicamente en la dirección del flujo del fluido.

RESUMEN

Este proyecto se desarrolló en la empresa Punto Natural Zamora Prieto S.A.S en donde se propuso mejorar el sistema de secado de producto granulado, mediante el diseño básico de un secador por lotes de bandejas al vacío. Para esto fue necesario en principio diagnosticar el sistema de secado empleado actualmente por la empresa para la deshidratación del producto granulado, a fin de establecer cuáles eran las fallas involucradas en el proceso de secado y sobre el equipo instalado. Para el diagnóstico se realizó una descripción detallada del actual proceso de secado, especificando tiempos de secado, condiciones operacionales, modos de operación del secador, potencias y capacidades de cada componente y subsistemas del secador. Adicionalmente se realizó una breve descripción del proceso productivo del producto, a fin de determinar las causas involucradas en el excesivo tiempo de secado del producto mediante un análisis de causas del proceso de secado. Partiendo del análisis descrito, se propuso el diseño de un nuevo equipo de secado con base a la demanda establecida por la empresa, adicionalmente se propone acciones sobre el sistema actual que permita mejorar el comportamiento de secado existente.

Para el desarrollo del diseño del equipo de secado propuesto, se establecieron las condiciones teóricas de los subsistemas involucrados dentro del funcionamiento de un secador al vacío, junto con la metodología a seguir. Por ende a partir de una revisión bibliográfica se establecieron los parámetros de diseño y dimensionamiento del equipo. Como resultados obtenidos en el dimensionamiento del equipo, se diseñó un secador discontinuo al vacío con sistema de bandejas el cual contará con una cámara de trabajo de forma cúbica con 68cm de alto, 68 cm de ancho y profundidad de 75 cm; adicionalmente este dispositivo contará 5 bandejas, las cuales serán calentadas por resistencias eléctricas de 114 V con área de transferencia de calor de 1414 cm^2 . Paralelamente para definir los requerimientos del sistema refrigerante debe trabajar con una capacidad de 1240.21 kJ/h para el evaporador de área superficial de transferencia de calor igual a 1532 cm^2 .

Palabras clave: Secado al vacío, producto granulado, diseño sistema de refrigeración, termolábil, dimensionamiento de un secador, diseño sistema de calentamiento

INTRODUCCIÓN

La industria de alimentos cada vez presenta tecnologías innovadoras para la transformación y conservación de materias primas en productos alimenticios, a fin de cumplir con las exigencias del consumidor, sin embargo hay productos que exigen procesos más específicos para las personas con problemas de salud, debido a su alto contenido químico o su incompatibilidad con el cuerpo humano, por lo tanto se deben desarrollar nuevas tecnologías que suplan la demanda de productos aptos para todo el público.

El proceso de secado, es considerado un método apropiado para tratar alimentos de manera que conserve sus propiedades y le dé estabilidad al producto, no obstante hay productos que requieren condiciones específicas de procedimiento, por lo que los procesos de secado convencionales no son aptos para cumplir con los requerimientos de dicho producto, para ello se desarrollan técnicas que mejoran este proceso, haciendo que los alimentos termosensibles alcancen menores rangos de humedad sin deteriorar su integridad estructural, para ello se utiliza la técnica del secado al vacío, la cual provee un medio adecuado al producto para que llegue las condiciones de humedad deseadas.

El propósito del trabajo de grado radica en integrar los conocimientos teóricos y prácticos, a fin de proponer mejoras en el proceso de secado de un endulzante granulado a base de Stevia, para ello se propuso una alternativa de diseño que permite adquirir un nuevo equipo de secado, a fin de obtener un producto eficiente que aumente tanto la rentabilidad como la disponibilidad de este producto para la empresa y para el mercado.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Desarrollar una propuesta de mejora del proceso de secado de producto granulado en la empresa PUNTO NATURAL ZAMORA PRIETO S.A.S.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Diagnosticar el funcionamiento del equipo para la deshidratación de producto granulado.
2. Establecer las condiciones teóricas del proceso de secado para la deshidratación de producto granulado en la empresa Punto natural.
3. Diseñar el secador para deshidratar producto granulado de acuerdo con las condiciones anteriormente establecidas.
4. Evaluar los costos de implementación de la propuesta para el funcionamiento del secador al vacío.

1. MARCO TEÓRICO

Con el objetivo de dar un panorama general a los temas relacionados al contenido del proyecto, en este capítulo se realiza una breve conceptualización tanto de las generalidades de los productos termosensibles, como la operación de secado, con el fin de vincularlos en el proceso de secado al vacío y establecer los fundamentos de operación del equipo involucrado, para la deshidratación de productos alimenticios termosensibles, a partir de la operación de secado al vacío.

1.1 GENERALIDADES

Como uno de los propósitos fundamentales en la industria de alimentos, la conservación o preservación de productos alimenticios, es en general el punto focal de esta industria, de manera que a fin de conseguir este objetivo, son incluidos dentro de los procesos productivos de tratamientos y transformaciones de productos, medios que comprenden calor, frío o químicos; a fin de inhibir la proliferación de microorganismos y mantener íntegras las propiedades de los alimentos¹. Sin embargo no todas las materias primas y productos alimenticios son aptos para estos procesos de transformaciones convencionales, puesto que a causa de la naturaleza en sus componentes, estos productos pueden ver afectadas sus propiedades como respuesta a los cambios en su entorno o condiciones de operación tales como los productos basados en componentes naturales.

Se definen los productos termosensibles, como aquellos productos que requieren de procesos de transformación y secado especializados, a fin de evitar efectos negativos o deterioros precipitados sobre los mismos, durante la transición del proceso de transformación del producto. No obstante existen otros métodos de conservación tales como la deshidratación, liofilización, desecación, irradiación y envasado al vacío, los cuales además de brindarle al producto las condiciones idóneas de conservación, poseen tecnologías especializadas para la preservación de productos alimenticios denominados sensibles.

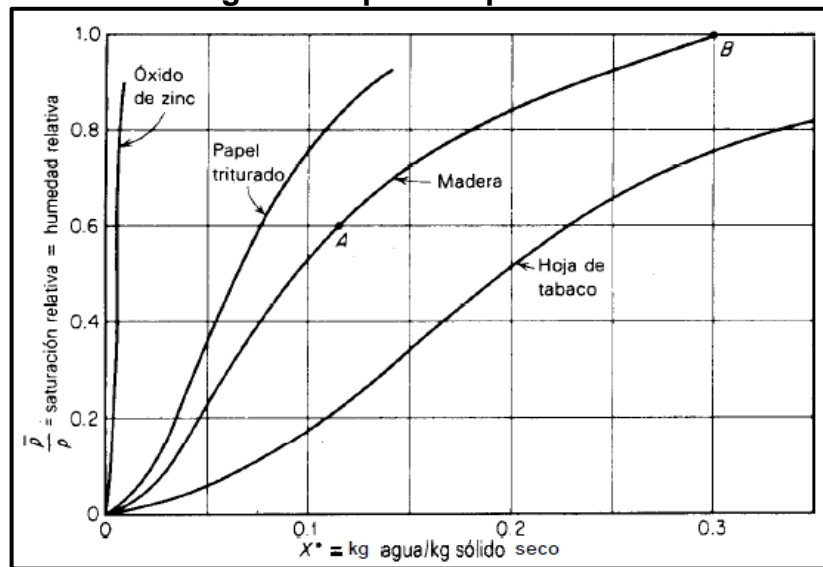
1.1.1 Secado. El término secado puede reducirse como la eliminación de la humedad de un cuerpo, sin embargo esta definición no es del todo completa, dado que en ella no se especifica el medio por el cual se debe realizar dicha eliminación para poder ser denominado secado. El secado de sólidos es un proceso de la industria en general, en el cual se lleva a cabo la evaporación del agua de un sólido mediante procesos de transferencia de masa y calor. Pese a lo anterior, es apropiado mencionar que dependiendo del material a secar, la

¹ ROSS, Alexander IV, et al. Combining nonthermal technologies to control foodborne microorganisms. *International journal of food microbiology*, 2003, vol. 89, no 2, p. 125-138.

humedad presente en éste y las condiciones finales que se esperan obtener sobre el producto, el método de extracción de humedad varía, lo cual hace que cada material tenga su propia curva de secado y sea tratado de una manera diferente.

Como se evidencia en la Figura 1, existen comportamientos específicos para las curvas de secado de los diferentes materiales. Esto se debe a que la evaporación del agua depende según el autor Treybal², tanto de la naturaleza del agua ligada en el producto como el producto mismo.

Figura 1. Contenido de agua en equilibrio para diferentes materiales a 25°C.



Fuente: TREYBAL, R. Operaciones de transferencia de masa, 1988.

Así mismo, el proceso de secado se puede especificar como la cantidad de agua expresada en porcentaje de humedad, que se consigue extraer de un cuerpo mediante los fenómenos de transporte anteriormente enunciados, los cuales por diferenciales de presión entre el vapor del agua contenida en el sólido y los alrededores, es eliminada el contenido de agua sobre producto, hasta alcanzar un equilibrio entre estas.

Según varios autores, se dice que cuando un sólido húmedo se somete a un proceso de secado, se presentan dos fenómenos:

- Transferencia de calor definida por la energía suministrada desde los alrededores al producto a fin de llevar a cabo la evaporación de la humedad.
- Transferencia de masa definida como la transferencia de humedad interna hacia la superficie del sólido, en su mismo estado.

² TREYBAL, Robert E. Operaciones de transferencia de masa. México: McGraw-Hill, 1988. p 724.

Dicho esto, es posible que cierta cantidad de agua ligada al material, pueda no ser eliminada mediante los métodos convencionales de evaporación, dado que una vez se alcance el equilibrio entre la presión de vapor del agua en el producto y la presión de vapor del medio secante, consiguiendo así la remoción total de humedad superficial, la cantidad de humedad restante a eliminar se encuentra entre los intersticios del producto. Para ello existen métodos especializados en extraer dicha humedad y de los cuales se necesitan de ambientes inertes para poder ejercer su función.

1.1.2 Secadores de productos termolábiles. Los tipos de secadores involucrados en los procesos de secado de productos termosensibles, según como lo explica el profesor y experto en secado industrial Arun Mujumdar³, son los secadores que operan en vacío e involucran en ellos medios de calentamiento indirectos, debido a que gracias a su principio de funcionamiento, estos secadores operan a bajas temperaturas evitando la degradación posible en las propiedades de los productos, por lo que además aportan la energía necesaria al producto para realizar el proceso de vaporización del agua, a través de un medio de calentamiento el cual no entra en contacto directo con el material a secar, sino que por el contrario emite el calor a una superficie conductora de calor de modo que esta sumista posteriormente esta energía al producto. En este tipo de secadores el calor se transporta al producto por medio de transferencia de calor por conducción.

Entre los tipos de secadores indirectos al vacío se encuentran los secadores de bandejas por lotes, secadores de tambor rotatorio y liofilizadores.⁴

- Secadores de bandejas por lote: en este tipo de secador el producto es esparcido sobre un sistema de bandejas ubicadas sobre portabandejas, en donde el material base de estos componentes es generalmente metales buenos conductores de calor, las cuales poseen el medio de calentamiento que abastece el calor necesario al material. Estos tipos de secadores pueden operar a presiones bajas por lo que consecuentemente a bajas temperaturas, lo que hacen ideales a estos tipos de secadores para la deshidratación de productos sensibles al calor, a fin de reducir la temperatura de evaporización del líquido, es reducida la presión.
- Secadores de tambor rotatorio: este equipo consiste fundamentalmente en una base cilíndrica o tambor rotatorio, en el cual se realiza la operación de secado. Este dispositivo es usado en el proceso de secado de productos a base de polvos, materiales granulados y cristales. Consistente en una cámara de vacío

³ MUJUMDAR, A. S. Handbook of Industrial Drying. En CRC Press. Boca Ratón. Ed 4. 2014. p 20

⁴ NONHEBEL, Gordon y MOSS, Arnold Alec Henri. El secado de sólidos en la industria química. Barcelona: Reverté, 1979. p 72.

en la cual el medio de calentamiento aplicado sobre éste, es suministrado por medio de una chaqueta de calentamiento.

- Liofilizador: equipo elegido para desecar productos sensibles a partir del principio de sublimación, este tipo de secador opera a condiciones de vacío alto y ultra vacío. Generalmente es usado en industria de alimentos como método de conservación al eliminar la humedad del producto y mantener intactas las propiedades de estos los productos alimenticios, además es usada en la industria farmacéutica para la conservación de medicamentos.

En general estos equipos operan con el mismo principio de funcionamiento, en donde se expone que entre más baja sea la presión de operación, menor será el punto de ebullición del agua a evaporar; adicionalmente, a fin de mantener el vacío al interior de la cámara, se deben eliminar los vapores que son generados durante el proceso de evaporación o sublimación del agua por medio de la acción de la bomba de vacío, el cual, el secado al vacío proporciona un medio conveniente para la recuperación del disolvente. Sin embargo debido a las diferencias en las estructuras y mecanismos de evaporación del agua para el caso de los secadores de bandejas al vacío y el secador rotatorio al vacío, o sublimación para el liofilizador, se difieren en los productos a tratar.

1.2 FUNDAMENTOS DEL SECADO AL VACÍO

El secado al vacío es un proceso por el cual lleva a cabo la eliminación parcial de la humedad contenida en un sólido en condiciones de vacío, empleado para deshidratar productos termolábiles de alto valor comercial, este método es usado para reducir el contenido de humedad, al tiempo que conserva las propiedades de un material sensible mediante la combinación ente calor y vacío. Identificado según el autor Mehta RM⁵ como uno de los únicos procesos en los que se consigue alcanzar humedades finales de 10 hasta 2% sobre el producto, las tecnologías asociadas son escasas y su aplicación en la industria es limitada ya que aparte de ser un proceso discontinuo, el mantenimiento de los equipos involucrados es alta y haciendo que el coste para el funcionamiento sea elevado.

El proceso de secado al vacío consiste en desecar un producto, mediante proceso de evaporación (sublimación para el caso del liofilizador) del agua bajo condición de vacío, con el fin de disminuir el punto de ebullición del agua⁶. Para ello, a causa del gradiente de presión generado, entre el vapor de agua o humedad del producto y los alrededores, se realizan procesos de transferencia de masa y calor, los cuales permiten el proceso de secado del producto, manteniendo un nivel bajo

⁵ R.M Mentha. *Pharmaceutics-I: introduction to the drying process*. Nueva Delhi: Vallabh Publicaciones (1996). p190.

⁶ FELLOWS, Peter y SALA, F. *Tecnología del procesado de los alimentos: principios y prácticas*. Acribia, 1993. p 53.

de temperatura siendo ideal para los métodos de transformación de productos termolábiles. Este método logra la deshidratación del material al calentar de forma indirecta, al crear un gradiente de presión de vapor entre el agua ligada al producto y el del entorno que se encuentra éste.

1.2.1 Principio de proceso de secado. El proceso de secado realizado en un secador de vacío independiente de la estructura y del medio de calentamiento que se use, basa su operación en la obtención de productos secos por lotes, por lo cual los materiales a secar se caracterizan por tener de gran valor comercial o sensibles al calor⁷, debido que en esta tecnología se reduce la presión interna de la cámara, lo que permite disminución en el punto de ebullición de agua muy por debajo de la temperatura de ebullición a condiciones normales.

El fundamento básico de un secador que trabaja a condiciones de vacío, radica en calentar y secar el producto a través de medios indirectos, los cuales se basan en el principio de conducción. El tiempo de secado depende esencialmente del material que se está secando, la cantidad de disolvente o agua a ser eliminada representada en humedad, la humedad final deseada del producto y el rango de temperaturas permisibles por los componentes del producto.

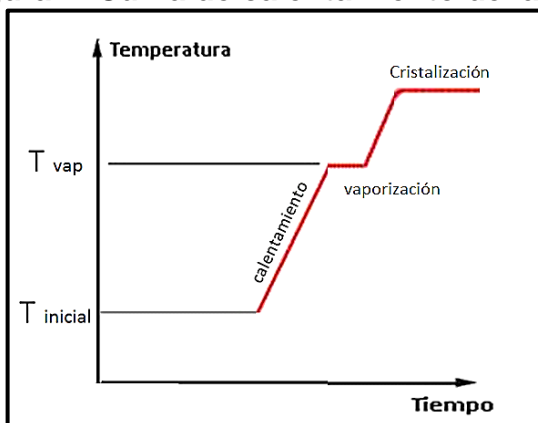
La cámara de trabajo indicada para procesos de secado a bajas temperaturas, al utilizar el principio de vacío, construye su estructura mediante placas de espesor grueso a fin de garantizar hermeticidad en la cámara y evitar un colapso al interior de esta. Adicionalmente la cámara debe contar de una puerta pesada a fin de garantizar hermeticidad dentro de esta, evitando aumentos de presión y pérdidas del vacío generado por el sistema de vacío.

1.2.2 Etapas del proceso de secado al vacío. En el proceso de secado al vacío se distinguen 3 etapas fundamentales que son necesarias para poder llevar a cabo el proceso de secado de productos naturales o productos sensibles, como se evidencia en la figura estas consisten en el calentamiento del producto, evaporación del agua expresada como humedad del producto y por último la cristalización del vapor de agua de la humedad.

La Figura 2 se evidencia el comportamiento del agua durante las etapas relacionadas al proceso de secado global, en donde se evidencian la etapa de calentamiento del producto y la humedad contenida en la producción de la humedad y la cristalización del agua como etapa final.

⁷ BARRETO, H, F. Liofilización Un Metodo de Secado Para Alimentos. Perú: Instituto interamericano de ciencias agrícolas de la OEA zona andina. 1966. p 22

Figura 2. Curva de calentamiento del agua.



Fuente: NONHEBEL, G. El secado de Sólidos en la industria química, (1979).
Editada por autor.

1.2.2.1 Calentamiento producto. En esta primera etapa del proceso, se eleva la temperatura del producto y la del agua contenida en este por medio de sistemas de calentamiento indirecto, mediante un proceso de transferencia de calor por conducción en donde el medio de calentamiento según sea definido como de resistencias, fluidos térmicos, chaquetas de calentamiento entre otros, se transfiere el calor tanto al recipiente que contiene al producto como al producto mismo. Esta etapa es limitada por el calor sensible del producto y del agua, la cual a su vez se define por el intercambio de calor producido entre el sistema y el producto a fin suministrar la energía necesaria al material a secar y elevar la temperatura dependiendo de la cantidad de masa de este sin producir un cambio de fase. Es decir es la fase preparatoria para la evaporización de la humedad contenida en el producto.

1.2.2.2 Vaporización de la humedad del producto. En esta etapa, la humedad expresada como cantidad de agua libre pasa al estado vapor. La cantidad de energía que es requerida para la eliminación del agua se define por el nivel de vacío aplicado en la cámara de trabajo, se establece la presión interna dentro de la misma a fin de definir la temperatura máxima que debe alcanzar el producto durante esta etapa. Esta consiste en elevar la temperatura del producto desde la temperatura inicial de ingreso, es decir desde la temperatura ambiente hasta la temperatura establecida para la evaporación.

1.2.2.3 Cristalización – condensación de la humedad. A fin de evitar el retorno del vapor de agua que es retirado en la etapa anterior al producto, en esta etapa el agua evaporada es cristalizada al ser enviada al exterior de la cama de trabajo junto con los gases no condensables producidos. Una vez se termina el proceso, esta agua en forma sólida se fusiona a fin de recuperar el solvente retirado del producto.

1.2.3 Transferencia de masa y calor.⁸ Los fenómenos de transporte involucrados en el proceso secado engloban la transferencia de masa y calor, estos son observados en el proceso de vaporización del agua, al verse asociados durante este proceso, la difusión del agua contenida en un producto hacia los alrededores y la conducción de calor producida por el sistema de calentamiento de la placa resistida hacia el producto.

La transferencia de masa sucede durante el proceso de calentamiento del producto mismo, al permitir el paso del vapor de agua o humedad del producto a través de la capa seca del mismo, este fenómeno está estrechamente ligado con el diferencial de presión, el cual entre mayor sea este gradiente mayor será la transferencia de masa. Asimismo para poder ocasionar el cambio de fase del agua requerido para eliminar la humedad del producto, es necesario elevar la temperatura de este, mediante un proceso de transferencia de calor conductivo definido por un secado de tipo indirecto. De modo que según lo anterior la transferencia de masa y calor se realiza de manera simultánea.

1.2.4 Subsistemas del secador al vacío. El equipo destinado para el proceso de secado al vacío, es un dispositivo operado en discontinuo, el cual se caracteriza por llevarse a cabo dentro de una cámara sin movimiento del producto a secar para el caso de los liofilizadores y secadores de bandejas al vacío, consta básicamente de los siguientes componentes:

- Cámara de trabajo o área de secado.
- Sistema de bandejas.
- Sistema de calentamiento.
- Sistema de refrigeración.
- Sistema de vacío.

A continuación, se realizará una breve descripción y las características principales de los distintos sistemas y componentes especificados para un secador al vacío.

1.2.4.1 Cámara de trabajo. Es destinada como el área de secado, la cámara de trabajo es el lugar donde se lleva a cabo la deshidratación de producto al evaporar el agua expresada como la humedad del producto, dentro de este dispositivo se encuentran el sistema de bandejas y el sistema de calentamiento el cual proveerá al producto el calor necesario para la etapa de calentamiento y evaporación del agua.

En vista del tipo de aplicación que se requiera definir para el secador al vacío existen dos tipos configuraciones geométricas para este tipo de secadores; las

⁸ NONHEBEL, Gordon y MOSS, Arnold Alec Henri. El secado de sólidos en la industria química. Barcelona: Reverté, 1979. p 334

cámaras de tipo rectangular o cilíndricas. Estas geometrías para ambos casos la configuración permite una ventaja.

- **Cámara rectangular:** En las cámaras de sección rectangular se permite colocar las bandejas todas de igual tamaño en su interior por lo que hay un aprovechamiento del más adecuado del espacio, sin embargo si no hay un control adecuado en el momento del montaje de las placas componentes, pueden quedar pequeños orificios entre las uniones lo que genera pérdidas de presión al interior. Este tipo de configuración es utilizado en secadores para tipo piloto, para secar productos granulares o solidos compuestos por materias primas sensibles, debido a su diseño práctico y dimensionamiento, además de su costo económico en relación con la otra alternativa.

Figura 3. Cámara rectangular para proceso de liofilización en laboratorio.



Fuente: Catálogo de Zirbus thecnology, directindustry.es

- **Cámara cilíndrica:** Por el contrario, aunque la cámara de secado tipo cilíndrica no se tiene un aprovechamiento apropiado del espacio para la distribución del producto, el interés de la forma cilíndrica se debe a la estructura compacta, la cual ofrece menos uniones en la construcción de esta, lo que resulta una mejor resistencia a la presión de vacío, debido a que esta cámara posee un sello hermético perfecto. Sin embargo, el costo asociado con su construcción e instalación es mayor comparado con la configuración tipo rectangular.

Figura 4. Máquina Secadora al vacío tipo cilíndrica.



Fuente: Catalogo fitotsentr Kharkiv-Ucrania, stccc-phoenix.com.ua

1.2.4.2 Sistema de bandejas. Este sistema se define como los compartimientos necesarios para depositar el producto a secar, este sistema se encuentra tanto en los liofilizadores como en los secadores de bandejas al vacío.

El sistema de bandejas por lo general se diseña de acuerdo a la capacidad de almacenamiento y requerimientos del producto a secar, teniendo en cuenta adicionalmente la geometría y la distribución de estos sobre la superficie. De la misma manera considerando que este componente del sistema de secado está diseñado para transmitir el calor requerido por el producto es esencial especificar el material de construcción de este, el cual por su contacto directo y constante con agua y solventes, debe cumplir las normas asociadas El CODEX ALIMENTARIUS para el manejo de alimentos.

El sistema de control sobre las bandejas consiste en sensores de temperaturas las cuales hacen parte de una termocupla que se ubican estratégicamente sobre la bandeja, de manera que el valor leído por este dispositivo, permita un control de temperatura adecuado durante el proceso de secado, evitando grandes diferenciales de temperaturas entre el producto y la bandeja, con el propósito de que sea homogénea.

1.2.4.3 Sistema de calentamiento del producto. Este sistema es el encargado de proveer el calor necesario al producto para llevar a cabo el proceso de secado, este sistema se puede transmitir el calor por medio de placas con circulación de fluidos o por resistencias eléctricas incorporadas directamente al sistema de bandejas, de modo que las placas actúan como un mecanismo de calentamiento indirecto. Este sistema es empleado durante las dos primeras etapas del secado al vacío el calentamiento del producto y la evaporación de la humedad.

1.2.4.4 Sistema de vacío. Como parte fundamental en este tipo de tecnologías, el sistema de vacío busca retirar en principio la cantidad de aire contenida en la cámara de secado, además del exceso de humedad representada en vapor de agua desprendida del producto a secar. Este sistema se compone de una bomba de vacío que difiere por el caudal que maneja esta, a través del cual se establece la presión de operación del equipo.

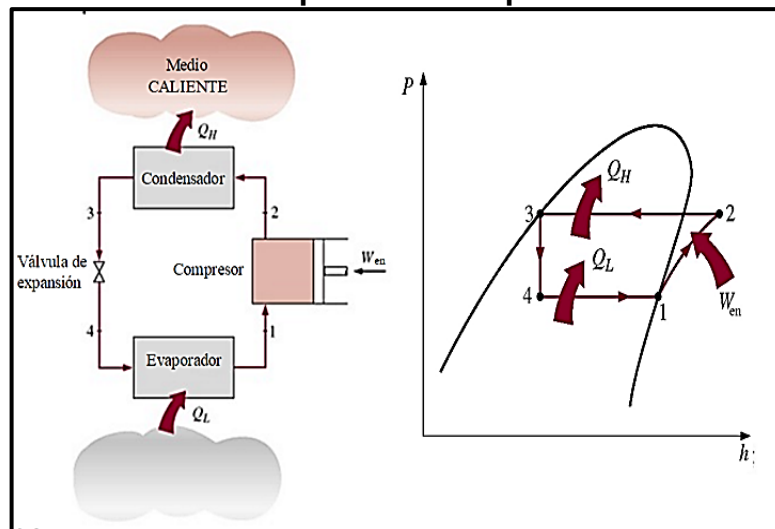
La ubicación de este sistema es crucial para garantizar un efectivo proceso de secado, debido que se debe evitar el paso de la humedad sobre la bomba de vacío, para ello, la bomba debe ir conectada directamente al sistema de condensación del agua, de manera que al absorber el vapor de agua retirado del producto es trasladado al exterior de la cámara, pasando en principio por el condensador de agua, para capturar dicha humedad eliminada del producto, sobre la superficie del mismo en forma de cristales.

1.2.4.5 Sistema de refrigeración. El sistema de refrigeración en secadores al vacío dependiendo de la aplicación que se establece para este, cristalización de la

producto al interior de la cámara para el proceso de sublimación o cristalización de la humedad retirada del producto, se puede definir como sistema de compresión doble o compresión simple.

Compuesto por un compresor, condensador, evaporador y válvula de estrangulamiento; este sistema es el encargado de extraer el calor suministrado al agua durante el proceso de ebullición para el paso de líquido a vapor, para lo cual se hace uso de un fluido refrigerante el cual circula por un sistema cerrado, impulsado por un compresor. A continuación en la Figura 5 se exponen las etapas o los equipos de un sistema refrigerante.

Figura 5. Esquema y diagrama P-h para el ciclo de refrigeración ideal por compresión de vapor.



Fuente: CENGEL, Yunus. Termodinámica. 2003.

En este ciclo el refrigerante en primera medida gracias a sus características frigoríficas, eleva su presión y temperatura, mediante un compresor en un proceso isentrópico, como se evidencia entre los puntos 1 y 2 en la Figura 5, a fin de alcanzar la presión de condensación, seguidamente mediante un proceso de transferencia de calor a fin de retomar su temperatura de líquido refrigerante, es condensado mediante un intercambiador de calor el cual disipa su energía en forma de calor hacia el ambiente, evidenciados en los puntos 2 y 3 de la figura anterior. A continuación mediante un dispositivo de expansión, caracterizado por su capacidad de generar la caída de presión necesaria entre el condensador y el evaporador en el sistema, reduce la presión del refrigerante a fin de alcanzar la temperatura de evaporación en este dispositivo⁹. Para finalmente poder disipar el calor adquirido por el agua en el proceso de secado por medio de un intercambiador de calor, el cual operara de forma contraria al intercambiador

⁹ RAPIN, Pierre J.; JACQUARD, Patrick. Instalaciones frigoríficas. Barcelona: Marcombo editores, 1997. p 459.

especificado para la condensación del refrigerante, lo que define la necesidad de introducir al equipo de secado el sistema refrigerante.

Para el proceso de secado operado con vacío, el sistema refrigerante se diseña con compresores de dos etapas a fin de bajar la temperatura dependiendo del producto a secar lo cual permite mayor precisión en el control de secado y mayor calidad e higiene en el secador. El sistema de refrigeración para secadores al vacío por bandejas se caracteriza por refrigeración de compresión simple en el cual la temperatura mínima manejada por este sistema es aproximadamente -40°C para la parte del evaporador.

2. DIAGNÓSTICO DEL PROCESO DE SECADO EN LA PRODUCCIÓN DE PRODUCTO GRANULADO

Con el objetivo de establecer las causas relacionadas con el proceso de secado actual del producto granulado, y plantear las posibles alternativas de mejora sobre la baja eficiencia del proceso, el siguiente capítulo se centra en el proceso de secado del endulzante granulado perteneciente a la línea de endulzante natural Vitaliah. Para ello, se realizó la verificación sobre el estado del sistema de calentamiento, sistema de enfriamiento, el modo operativo del equipo involucrado estableciendo sobre este definir las fallas.

2.1 GENERALIDADES

Punto Natural Zamora Prieto SAS es una empresa dedicada a la fabricación de alimentos saludables hechos a base de Stevia; ubicada en el barrio el Samper Mendoza de la ciudad de Bogotá D.C. (Figura 5), consta de una planta física en la que se produce y distribuye a nivel nacional, productos 100% naturales que suplen las necesidades de personas que por algún problema de salud o por prevención requieran suplementar o complementar su dieta.

Figura 6. Ubicación de la planta.



Fuente: <https://www.google.com.co/maps>

En la planta se producen diversos productos alimenticios, tales como endulzantes naturales y productos naturales, los cuales ofrecen al cliente beneficios en la salud dependiendo de sus necesidades. Dichos productos integran la línea de alimentos suplementarios y complementarios de Punto Natural Zamora Prieto SAS, Vitaliah.

Con más de 3 años de experiencia en el mercado, esta compañía propone innovar sus procesos productivos, mediante el uso de tecnologías limpias que permitan la elaboración de productos íntegros; por ello acorde con su ideología, la empresa

implemento un equipo especializado en el secado de alimentos termolábiles, a fin efectuar la deshidratación de un endulzante granulado.

2.2 DESCRIPCIÓN ACTUAL DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DEL ENDULZANTE GRANULADO

El proceso de producción de endulzante granulado como se evidencia en la Figura 7, comprende desde la formulación del producto hasta el proceso de secado. A continuación se presentará una breve descripción de las distintas etapas u operaciones unitarias, involucradas en el proceso de producción del producto granulado, realizando una descripción detallada del proceso de secado del mismo junto con la tecnología involucrada.

Figura 7. Diagrama de producción de endulzante granulado.



2.2.1 Formulación del producto. Las materias primas usadas en la formulación del endulzante granulado, fueron suministradas por los operarios de la empresa según las cantidades específicas para la elaboración del producto granulado. A continuación, en la Tabla 1 se presentan las materias primas y las respectivas dosificaciones necesarias para secar una bandeja de 1,5 kg del endulzante granulado. Esta formulación fue obtenida a partir de un estudio previo realizado por la misma empresa.

Tabla 1. Formulación de bandeja de endulzante granulado.

Materia Prima	Peso (g)	%
Azúcar	1228.2	81.83
Stevia	151.8	10.11
Agua	121	8.06
Bandeja Muestra	1501	100

Como se observa en la formulación, Tabla 1, el contenido de agua descrita pertenece a la humedad inicial con la que ingresa el producto al secador, correspondiente a un 8% de humedad; la cual mediante un análisis gravimétrico reducirá su peso al final del proceso de secado, hasta alcanzar un 3% de humedad final sobre el producto.

2.2.2 Mezclado. El procedimiento de preparación del endulzante granulado en la planta se lleva a cabo según el orden que se evidencia en la Figura 7; para ello existen dos tipos de mezclados, un mezclado seco y uno húmedo o granulación. El proceso de mezclado seco, consiste en pesar las cantidades respectivas de Stevia pulverizada y azúcar por separado, en una balanza y posteriormente mezclarlas en un recipiente a 35rpm durante 15 minutos.

2.2.3 Granulación. El proceso de granulación o mezclado 2 se lleva a cabo sobre el recipiente utilizado para el paso anterior. Este proceso consiste en adicionar una cantidad de agua equivalente al 8% en peso de humedad sobre la mezcla anterior, 120 g de agua por cada 1,5 kg de mezcla de producto húmedo. Durante esta operación a medida que es adicionada gradualmente el agua con un atomizador sobre la mezcla, se va mezclando el agua con los polvos de forma manual hasta obtener gránulos de tamaño similar con diámetro de partícula mayor al poro de la malla que lo contendrá.

2.2.4 Proceso de secado. Como objeto de estudio del presente proyecto, se detallará de manera exhaustiva, las etapas del proceso de secado actual y el equipo involucrado actualmente para ejecutar la deshidratación del endulzante granulado en la empresa. Para ello, el proceso de secado actual consta de 3 etapas de secado: etapa preparatoria, etapa de secado y etapa de limpieza del condensador de agua.

En la etapa preparatoria a fin de acondicionar el secador para el ingreso del producto granulado, se ajustan los rangos de temperatura para el sistema de calentamiento y el sistema de refrigeración, acorde con la presión de vacío a la que trabaja la cámara; a continuación se enciende el sistema de calentamiento suministrando calor necesario a los elementos internos de la cámara tales como placas, bandejas y porta bandejas, con el objetivo de alcanzar las condiciones deseadas de temperatura en la cámara y homogeneizar la temperatura en todas las bandejas de la carga.

Posteriormente al calentamiento de la cámara, se procede a la etapa de secado la cual se divide por el proceso de evaporación del agua y la operación de extracción del vapor de agua producido. En esta etapa se busca reducir el contenido de humedad del producto, siguiendo la pauta previamente elegida por la empresa, hasta lograr el contenido de humedad final deseado del 3%. En esta etapa el sistema de vacío es fundamental puesto que además de definir la temperatura de evaporación del agua, su ejercicio evita el sobrecalentamiento de la cámara y el regreso de la humedad retirada al producto.

Finalmente con el objetivo de remover la escarcha o cristales de agua formados sobre el condensador durante el proceso de la sublimación inversa del agua, se accede sobre el sistema de control del equipo a la opción de descongelamiento manual, la cual obliga a apagar el sistema de refrigeración permitiendo que el

refrigerante tome la temperatura del ambiente y se descongele de forma natural los cristales de agua.

A continuación, en la Figura 8 se muestra de forma esquemática y jerárquica, las operaciones o etapas que componen el método actual de secado propuesto por la empresa para la deshidratación del endulzante granulado, además de los tiempos y especificaciones de operación en cada una de estas.

Figura 8. Método de secado actual del producto.



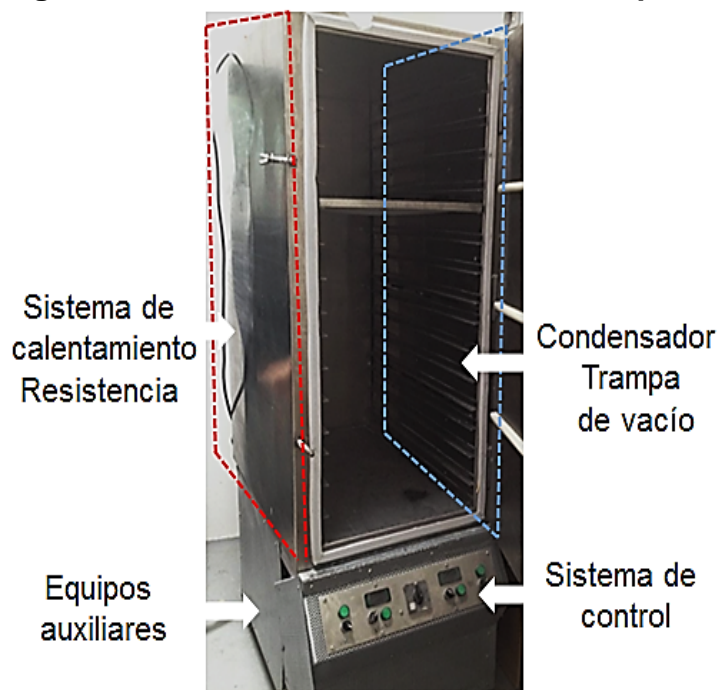
El proceso de secado del endulzante granulado se lleva a cabo en un secador de platos al vacío, el cual fue diseñado inicialmente para secar 24 kilogramos de endulzante granulado por lote, repartidos entre 12 bandejas. El secador involucrado en el proceso de secado presenta en el Cuadro 1 sus características generales.

Cuadro 1. Características generales del secador actual.

Ítem	Especificación
Tipo de operación	Operación discontinua por contacto indirecto
Tipo de calentamiento	Resistencias por conducción
Temperatura de operación	73°C- 80°C
Tipo de refrigeración	Compresión
Presión de operación	254 mm Hg / 10 in Hg*

Como se muestra en la Figura 8 el proceso de secado, este consta de 8 fases, donde 2 de ellas son retomadas, con el objetivo de asegurar que se elimine la cantidad de agua indeseada sobre el producto. Para ello, los procesos de evaporación y condensación operan de forma independiente y contraria a lo largo del proceso de secado, de manera que cuando una esté operando la otra está inactiva. En la Figura 9 se ilustra la distribución de los sistemas dentro del equipo de secado.

Figura 9. Secador al vacío actual de la empresa.



* Medida en presión absoluta

A continuación, se describen los sistemas involucrados en un proceso de secado que son críticos, y están directamente relacionadas con el tiempo de secado del endulzante granulado evaluado con el equipo actual.

2.2.4.1 Sistema de calentamiento. El proceso de calentamiento de la cámara radica, en adicionar el calor suficiente sobre ésta, elevando así su temperatura interna y la de los elementos que la componen, alcanzando así la temperatura de evaporación del agua a la presión ajustada por el sistema de vacío. Esta operación se realiza por medio de una resistencia y un soplador, los cuales con ayuda de un controlador y una sonda de temperatura, mantienen la temperatura del producto en un rango de 70°C a 80°C entre el encendido y el apagado del sistema. Para ello, inicialmente se accede a la opción de ajuste o set point de las temperaturas máximas y mínimas en el controlador, dependiendo de la condición de presión de vacío que se establezca en principio¹⁰.

Como se expuso en la Figura 8, el sistema de calentamiento es encendido intermitentemente, 3 horas activo y 2 hora inactivo. Durante el tiempo de operación de este sistema, el producto es calentado por conducción por medio del calor emitido por las resistencias que a su vez calientan, las paredes de la cámara y las placas que contienen el producto, elevando la temperatura de este, hasta el punto de evaporación del agua.

- **Área de secado.** La cámara de secado especificada como el área de secado del producto, se compone de espaciamientos o anaqueles los cuales son dispuestos para colocar las bandejas a medida con el material a secar como se ve en la Figura 9. A continuación en la Cuadro 2 se describe el dimensionamiento de la cámara de secado.

Cuadro 2. Especificaciones de la cámara de secado.

Ítem	Descripción
Material	Acero inoxidable
Numero de separaciones	3
Dimensiones (l/h/a)	86 cm / 129cm / 65 cm
Numero de bandejas	12
Espesor placas	2 mm

- **Resistencia.** El sistema de calentamiento consiste de una única resistencia eléctrica tubular con aletas, la cual actúa como intercambiador de calor del aire inicial y vapores producidos por el producto, como medio de calentamiento al interior de la cámara y las placas que conforman la estructura de la misma

¹⁰ Anexo 1

conduciendo el calor posteriormente a las placas y al producto en un rango de temperatura especificado anteriormente. Este sistema se encuentra en la parte inferior de la placa izquierda y comunica el calor producido a toda la cámara. En la Cuadro 3 se evidencia las especificaciones de la resistencia anteriormente descrita.

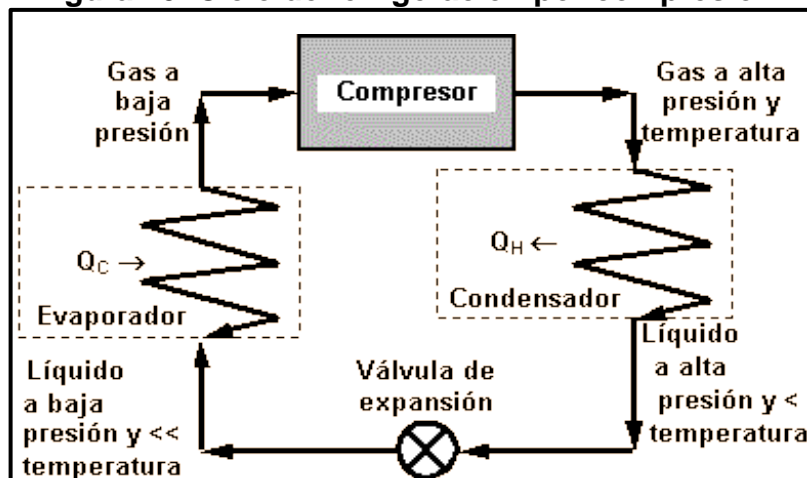
Cuadro 3. Sistema de calentamiento (resistencia).

Ítem	Descripción
Número de unidades	1
Tipo de conexión	Monofásica
Resistencia	6.9 ohmios
Voltaje	110 V

2.2.4.2 Sistema de refrigeración. Similar al sistema de calentamiento, se inicia ajustando las temperaturas mínima, máxima e ideal sobre el controlador acorde con la presión establecida al interior de la cámara. Luego como se evidencia en la Figura 8 al igual que el sistema de calentamiento, este permanece encendido en parte del proceso de secado.

Durante la operación de este sistema, el condensador o trampa de vacío, atrapa la humedad retirada del producto, formando sobre sí mismo, cristales de agua o escarcha; este proceso se realiza por medio de un intercambiador de calor de doble tubo, donde el fluido refrigerante pasa por medio del tubo interno y el fluido caliente (aire con humedad) pasa por la cavidad exterior. Sin embargo, con el fin de mantener el fluido refrigerante a la temperatura de ajuste, este es enfriado por compresión siguiendo el ciclo de refrigeración tal como se muestra en la Figura 10.

Figura 10. Ciclo de refrigeración por compresión.



Fuente: FisicaNet. Ciclo de refrigeración. <http://www.fisicanet.com.ar>

Por último, una vez es finalizado el proceso de secado del producto granulado, el sistema de refrigeración concluye su operación, al acceder a la opción de descongelamiento sobre el condensador de agua para comenzar la limpieza del condensador de agua, el cual se debe ser ejecutado, ajustando manualmente en la opción en el controlador del sistema frío.

Este sistema consiste de una serie de elementos que funcionan en conjunto, para condensar el vapor de agua producido durante el proceso de calentamiento del producto. Dentro de este sistema se encuentra el evaporador o condensador de agua, una unidad de compresión, un condensador de refrigerante y un tubo capilar.

- **Evaporador.** Como dispositivo destinado para condensar vapor de agua, se define como un intercambiador de calor de doble tubo, con forma de serpentín aleteado el evaporador se encuentra distribuido a lo largo de la pared o cavidad derecha del secador, tal y como se evidencia en la Figura 11.

Figura 11. Serpentín del sistema de condensación del agua.



Este dispositivo cuenta con un área superficial de transferencia de calor encontrada de 3327.25 cm^2 ó 0.33 m^2 . Los parámetros considerados en la determinación del área superficial del condensador y el cálculo relacionado, se encuentran descritos en la Tabla 2.

Tabla 2. Área superficial del evaporador.

Elemento	N°/ longitud (cm)	Diámetro externo (cm)	Diámetro interno (cm)	Área cm ²	
				Unitaria	Total
Aletas	403	2.77	1.27	4.76	1916.84
Tubo	353.5	1.27	-	-	1410.40
Área neta					3327.25

- **Compresor.** Adicionalmente para comprimir el refrigerante una vez es terminado el proceso de evaporación de éste, entre el sistema de refrigeración se cuenta con una unidad de compresión de potencia de ¼ Hp.
- **Condensador.** Establecido como un intercambiador de calor tipo serpentín enfriado por aire a temperatura ambiente, el cual se compone de un serpentín de 578 cm de largo, con diámetro exterior de 1.2 cm, correspondiente a un área superficial de intercambio de calor estimada de 2306.12 cm² ó 0.23 m².

A continuación en la Figura 12 se evidencia el condensador de refrigerante con su acumulador, el compresor y el tubo capilar, componentes del sistema de refrigeración del equipo actual de secado.

Figura 12. Condensador y compresor.



- **Tubo capilar.** Este se define como el dispositivo de estrangulamiento, el cual consiste en un tubo de cobre que se encuentra conectado al acumulador del sistema de refrigeración.

2.2.4.3 Sistema de Vacío. Con el fin de remover la humedad indeseada del producto a condiciones de temperatura bajas ($\leq 40^{\circ}\text{C}$), una de las partes fundamentales que constituyen el secador es el sistema de vacío; este sistema se compone de una bomba de vacío, la cual su función principal es extraer el volumen de aire inicial al cámara de trabajo de 0.72 m^3 (determinada por las dimensiones interna de esta), con el fin de reducir el punto de evaporación del agua sobre el producto. Además este sistema se encarga de extraer el vapor de agua producido una vez se inicia el proceso de evaporación del agua, conduciendo este del interior de la cámara al sistema condensador de agua, a fin de evitar sobrecalentamientos en la interior de la cámara o retornos de la humedad extraída del producto.

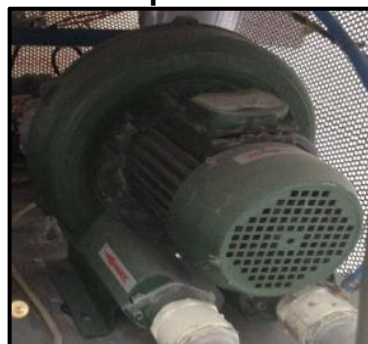
A continuación en la Cuadro 4 se evidencian las especificaciones encontradas para el funcionamiento de la bomba de vacío.

Cuadro 4. Especificaciones de la bomba de vacío actual.

Especificación	Rango
Potencia	$\frac{1}{2}$ HP
Caudal	2.5 CFM
Voltaje	110 V
N° Fases	1
Vacío último	254 mm Hg

2.2.4.4 Equipo auxiliar. Para poder remover la humedad indeseada del producto, el secador además de la cámara de secado y los subsistemas calentamiento, refrigerante y vacío, cuenta con un soplador que funciona como equipo auxiliar el cual pertenece a la operación del sistema de calentamiento, este equipo se acondicionó sobre el secador, a fin de homogenizar el calor repartido por la resistencia para mantener una temperatura uniforme a lo largo de la cámara. El soplador a diferencia de la bomba de vacío, inicial antes de ser encendida la bomba para retirar completamente el aire dentro de la cámara. En la Figura 13 se puede evidenciar el equipo auxiliar incorporado a la unidad secadora.

Figura 13. Equipo auxiliar presente en el equipo actual.



A continuación, en la Cuadro 5 se evidencian las especificaciones encontradas para el soplador.

Cuadro 5. Especificaciones del soplador.

Ítem	Descripción
Potencia	7,5kW/10 Hp
Caudal	1,9 m ³ /h
Voltaje	220/440
N° etapas / N° Fases	3
Presión de descargue	12 kPa

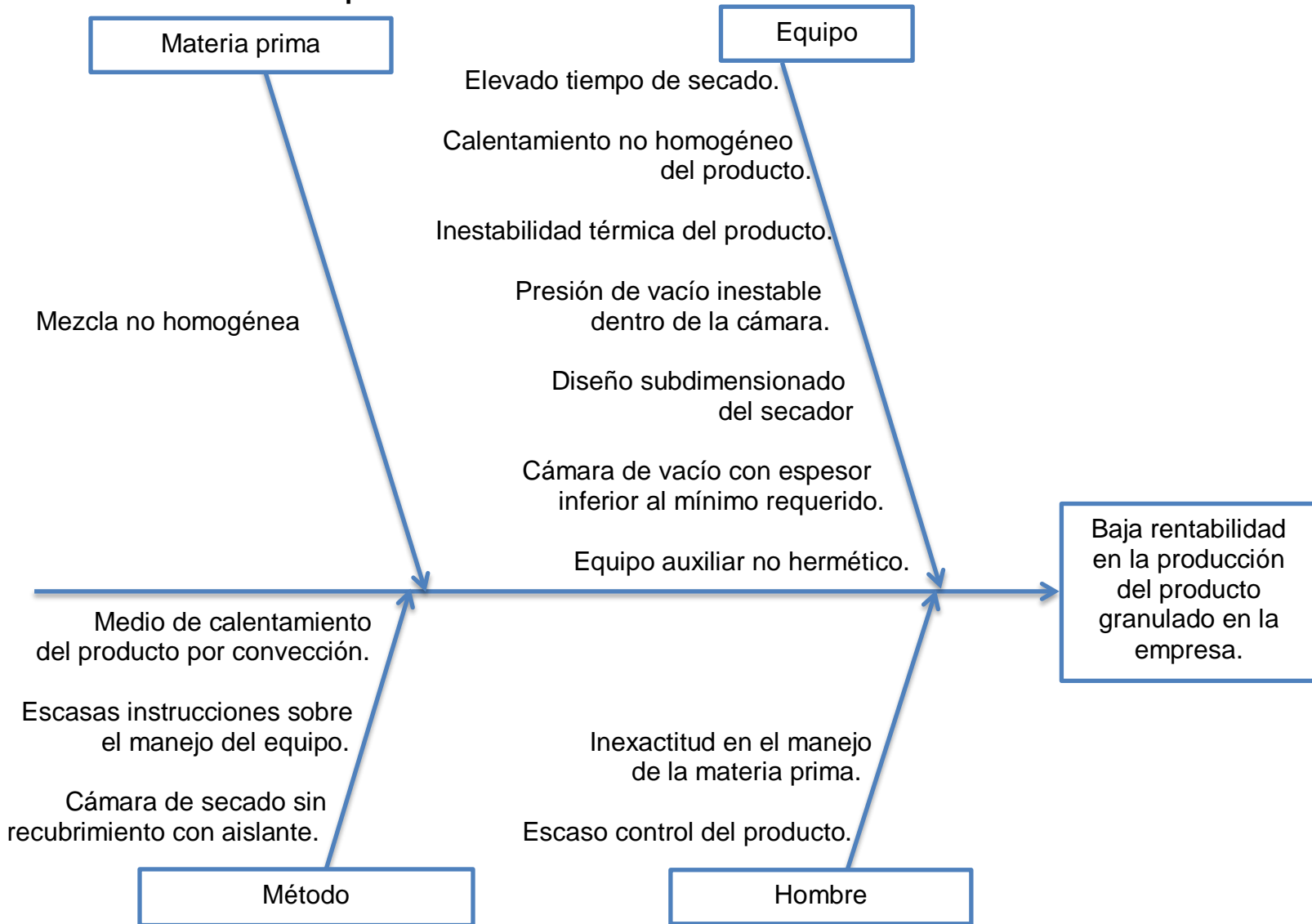
2.3 DIAGNÓSTICO AL PROCESO DE PRODUCCIÓN

Siguiendo la metodología de análisis de causa-efecto, se identificaron las causas potenciales que involucran problemáticas sobre el proceso de secado del endulzante granulado, por medio de la herramienta del diagrama de espina de pescado, del cual se obtuvo un análisis de causa raíz detallado.

Éste al ser una representación gráfica componente con información básica pero concisa, ayuda a visualizar las principales causas del problema del tiempo de secado, ampliando además la visión sobre las posibles causas del problema que no se involucraban directamente con la mejora del proceso de secado. Para su realización se tuvieron en cuenta las siguientes recomendaciones.

- Establecer claramente el problema que va a ser analizado y colocarlo en la cabeza del pez.
- Posteriormente con base en las observaciones y datos recogidos, se identificó las causas que están contribuyendo a generar este problema. Respondiendo a la pregunta ¿Por qué está sucediendo...?
- Agrupar las causas anteriormente identificadas por categorías.

2.3.1 Análisis de causa de los procesos.



2.3.1.1 Formulación del producto. Las materias primas usadas y la proporción de estas para la formulación del endulzante granulado es adecuada, ya que se produce un producto endulzante granulado bajo en calorías cumpliendo con los parámetros requeridos por la empresa para la elaboración del endulzante granulado.

2.3.1.2 Mezclado. En el proceso de mezclado del endulzante granulado, se evidenció mediante una prueba visual que no hay uniformidad en la distribución de las materias primas, (azúcar - Stevia) para la mezcla seca.

2.3.1.3 Granulación. La proporción de agua usada para la granulación del producto es apropiada para humedecer la totalidad de la mezcla sólida, y realizar la formación gránulos con tamaño ideal, sin embargo en el proceso de granulación se evidenció a simple vista, que al momento de verter el producto del mezclador a las bandejas, gran cantidad de producto se queda sobre las paletas del mismo.

2.3.1.4 Secado. La tecnología seleccionada por la empresa para deshidratar endulzante granulado se establece conveniente, conociendo de antemano su modo de operación a bajas temperaturas, es decir inferiores al punto normal de ebullición del agua en Bogotá ($\leq 92.6 \text{ }^\circ\text{C}$)¹¹.

Sin embargo, en el proceso de secado se evidenció mediante pruebas visuales, que el principio de funcionamiento adaptado para el secador actual, no fue del todo correcto, y a pesar de que el equipo fue diseñado en un principio para procesar 24 kg de producto húmedo, para reducir la humedad del producto de un 8% a un 3%, este no cumplió con lo esperado. Para ello teniendo en cuenta lo anterior, y para determinar las variables críticas del sistema, los criterios y parámetros que se evaluaron en el funcionamiento del secador fueron: área de secado, sistema de calentamiento, sistema de refrigeración, sistema de vacío y el equipo auxiliar.

Partiendo del diseño original de un secador al vacío, el modo de funcionamiento actual del equipo es impertinente, puesto que al encontrarse en secciones del proceso de secado, el sistema de refrigeración apagado y la bomba de vacío encendida, el evaporador del sistema refrigerante que tiene la función evitar el paso de la humedad al sistema de vacío, no logra condensar la humedad retirada del producto a su paso por el intercambiador, lo que ocasiona problemas posteriores sobre la bomba de vacío y el producto al permitir retornos de humedad sobre estos.

A continuación se evidencia el diagnóstico evaluado para los subsistemas y equipos que se involucran en el proceso de secado, el área de secado, sistema de

¹¹ Anexo A

calentamiento, sistema de refrigeración y los equipos auxiliares del proceso general de secado.

- **Área de secado.** El tamaño de la cámara y el área de contacto con material húmedo por bandeja, no son los adecuados para la cantidad total de producto que se requiere secar por lote, considerando una capacidad por bandeja de 2 kg. Adicionalmente, para que se cumpla el vacío al interior de la cámara, las condiciones de ensamblaje actuales no son apropiadas, esto se evidencia al no encontrarse un sistema hermético que mantenga los niveles de presión requeridos del proceso; igualmente el espesor de las paredes de la cámara no cumplen los requerimientos para sostener la presión interna del sistema, por lo que tienden a colapsarse.
- **Sistema de calentamiento.** En este sistema, las sondas de temperatura no se encuentran ubicadas correctamente, ya que estas envían al controlador la temperatura a la que se encuentra la resistencia más no la del producto. Por otra parte, se evidencia que al haber solo una resistencia para suministrar el calor a la totalidad la cámara y sus componentes, esta no era lo suficientemente potente para proporcionar el calor requerido, a fin de elevar la temperatura de las placas perforadas homogéneamente a lo largo de la cámara. Esto se evidencia en los diferenciales de temperaturas en las placas.
- **Sistema de refrigeración.** El ciclo de refrigeración está bien definido para el sistema relacionado; sin embargo, aunque la potencia especificada por el compresor es suficiente para llevar a cabo el ciclo de refrigeración, se encontró que el área de transferencia de calor del condensador y el evaporador o trampa de vacío, eran muy bajas con relación a la cantidad de agua que se debía cristalizar sobre dicha superficie a la capacidad máxima del equipo de 24 kg, lo que ocasiona un problema directo con el vacío y daño sobre la bomba, al dejar pasar parte de la humedad retirada del producto, directamente a esta.
- **Sistema de vacío.** La bomba de vacío utilizada para este sistema no es la más adecuada, debido a que el caudal que maneja el dispositivo es muy bajo, respecto al caudal de operación de bombas de vacío para este tipo de aplicaciones¹². Adicionalmente teniendo en cuenta la cantidad de aire que debe extraer dentro de la cámara de trabajo y la ineficiencia en la estructura, lo que puede ocasionar que el vapor de agua retirado en la etapa de vaporización de la humedad retorne al producto. Adicionalmente se estableció que la bomba al ser de una sola etapa no abastece con el vacío que se requiere para

¹²NONHEBEL, Gordon y MOSS, Arnold Alec Henri. El secado de sólidos en la industria química. Barcelona: Reverté, 1979. p 118,119.

disminuir el punto de ebullición del agua a 40 °C según lo recomendado por los autores Denisse Jeria y Andrés Pozo¹³.

- **Equipo auxiliar.** El uso de un soplador para proveer calor homogéneo tanto al interior de la cámara como a lo largo de las bandejas, no es un medio apropiado para este tipo de tecnología, puesto que el proceso de secado al vacío se caracteriza por su funcionamiento en ausencia de aire. Esto se evidencia en los gradientes de temperatura entre bandejas y en su extensión.

2.3.2 Alternativas propuestas de mejora. Con el objetivo de establecer una alternativa que mejore el proceso de secado, se plantean a continuación dos propuestas, la primera se basará en los ajustes que se deben realizar sobre el sistema de secado actual, a fin de mejorar tiempos de secado y condiciones del sistema. Por otra parte se plantea una propuesta de diseño de un nuevo equipo de secado que mejore el proceso de secado del endulzante granulado.

2.3.2.1 Propuesta de ajuste. Teniendo en cuenta las fallas presentes en el sistema de secado; a continuación en el Cuadro 6 se muestran las propuestas de ajuste al secador actual, considerando los diferentes sistemas y componentes a cambiar, con el objetivo de obtener mejoras sobre el proceso general de secado.

Cuadro 6. Propuestas de ajuste del secador actual.

Sistema / componente	Propuestas	Ventaja
Sistema de calentamiento	<ul style="list-style-type: none"> *Cambiar la resistencia electro tubular por resistencias planas. *Ubicar el medio calefactor en la parte inferior de cada placa portabandeja. 	<ul style="list-style-type: none"> *Contacto directo entre resistencia y sistema de bandejas. *Calentamiento homogéneo del producto a lo largo de la bandeja. *Temperatura interna de la cámara estable durante el proceso.
Sistema de refrigeración	<ul style="list-style-type: none"> *Separar el sistema de refrigeración de la cámara de calentamiento. *Colocar condensador independiente de la cámara o sistema de calentamiento. 	<ul style="list-style-type: none"> *Formación de cristales producidos por la cristalización de agua retirada del producto sobre la superficie del evaporador. *Recuperación total de la capacidad del refrigerante por el paso en el condensador.

¹³ JERIA, Denisse. M y POZO, Alberto. Estudio del secado conectivo de hojas de Stevia rebaudiana y factibilidad técnico-económica de una planta elaboradora de edulcorante a base de Stevia. Trabajo de grado Ingeniero de alimentos. Santiago: Universidad de Chile. 2011. p 122.

(Continuación cuadro 6)

Sistema / componente	Propuestas	Ventaja
Sistema de refrigeración	<ul style="list-style-type: none"> *Aumentar área de transferencia de calor del evaporador, condensador de agua. *Aumentar el área de transferencia de calor del condensador. 	<ul style="list-style-type: none"> *Se alcanzan las temperaturas requeridas y definidas por el sistema de refrigeración tanto para la cristalización del agua sobre el evaporador como la de condensación del refrigerante en el condensador.
Sistema de vacío	<ul style="list-style-type: none"> **Cambiar bomba de vacío por una de doble etapa. *Aumentar caudal de la bomba. *Cambiar conexiones entre las uniones de la bomba de vacío y el secador. *Usar vaselina de alto vacío entre empaques de las conexiones. 	<ul style="list-style-type: none"> *Se mantiene el vacío al interior de la cámara. *Mayor presión de vacío la cual disminuye el punto de ebullición del agua hasta un valor permitido. *Mejor transferencia de calor del producto húmedo a los alrededores. *Menor tiempo de secado.
Equipo auxiliar	<ul style="list-style-type: none"> *Eliminar el uso del soplador como elemento para homogenizar la temperatura en la cámara. 	<ul style="list-style-type: none"> *Evita riesgo de ocasionar orificios o puntos de no vacío en la cámara. *Evita retornos de humedad al producto.

2.3.2.2 Alternativa de diseño de secador de bandejas al vacío. Como se evidencia a lo largo del capítulo, el equipo adquirido por la empresa está subdimensionado debido a que aunque en principio se diseñó para procesar 24 kg de producto húmedo este equipo solo alcanzaba a secar un total de producto húmedo igual a 1,5 kg, por lo que se necesitan realizar varios cambios y ajustes a fin de mejorar el proceso de secado actual, en la empresa para la producción de producto granulado, puesto que esto hace que el proceso sea menos rentable y que la inversión realizada sea difícil de recuperar. Por ello se optó por realizar un diseño para un nuevo secador partiendo de los principios de diseño para estos tipos de secadores.

Para el diseño básico y descripciones relacionadas con los diferentes subsistemas que constituyen el secador al vacío, se definió algunas especificaciones técnicas teniendo en cuenta principalmente los requerimientos de la empresa y al tipo de producto a usar sobre esta tecnología, los cuales fueron los necesarios para el cálculo y selección de los componentes del equipo.

Cuadro 7. Especificaciones técnicas de diseño.

Criterio	valor
Carga de producto húmedo	10 kg
Superficie útil de carga por placa	4200 cm ²
Número de placas	5
Rango de temperatura de la cámara	40°C a 60°C
Presión de vacío ultimo	56 mm Hg*

* Presión de vacío absoluta a la cual evapora el agua a 40°C

3. BASES DE DISEÑO PARA EL PLANTEAMIENTO DEL SECADOR AL VACÍO

Este capítulo muestra el principio de operación, de un secador al vacío junto a los parámetros a tener en cuenta para su diseño; para ello, en el desarrollo de éste se definirá una metodología que para llevar a cabo el diseño del secador al vacío.

3.1 PRINCIPIO DE OPERACIÓN DE UN SECADOR AL VACÍO

El objetivo principal de un secador al vacío es reducir la temperatura de evaporización del agua a un valor tan bajo como sea posible, esta caída de temperatura es posible debido a la reducción en la presión de operación del sistema. El proceso de secado está ligado además a la cantidad de agua a retirar del producto definida para el cálculo del sistema refrigerante y el sistema de calentamiento como ya se ha mencionado.

En este tipo de secadores existen dos etapas básicas que definen el proceso de secado. La primera ocurre directamente sobre el producto, durante ésta, es transferido el calor de las resistencias mediante conducción y radiación al producto, calor que aparece como calor sensible y latente sobre la mezcla producto- agua; el agua evaporada durante esta etapa, es redirigida por acción de la bomba de vacío al exterior de la cámara, para ser condensada por el evaporador del sistema refrigerante.

La segunda etapa tiene lugar en el sistema de refrigeración, en ésta, el líquido refrigerante luego de evaporarse al absorber todo el calor transferido del vapor de agua, pasa por un compresor con el objetivo de elevar la presión del fluido refrigerante del mismo modo que la temperatura de saturación, a fin de alcanzar una temperatura superior a la del medio ambiente. Posteriormente el gas refrigerante es enfriado en un condensador a presión constante, pasando éste al estado de líquido saturado, por último se disminuye la presión del líquido refrigerante de manera isotrópicamente y se comienza nuevamente el ciclo de refrigeración.

3.1.1 Conservación de la materia. La conservación de materia en el secador se basa en la Figura 14.

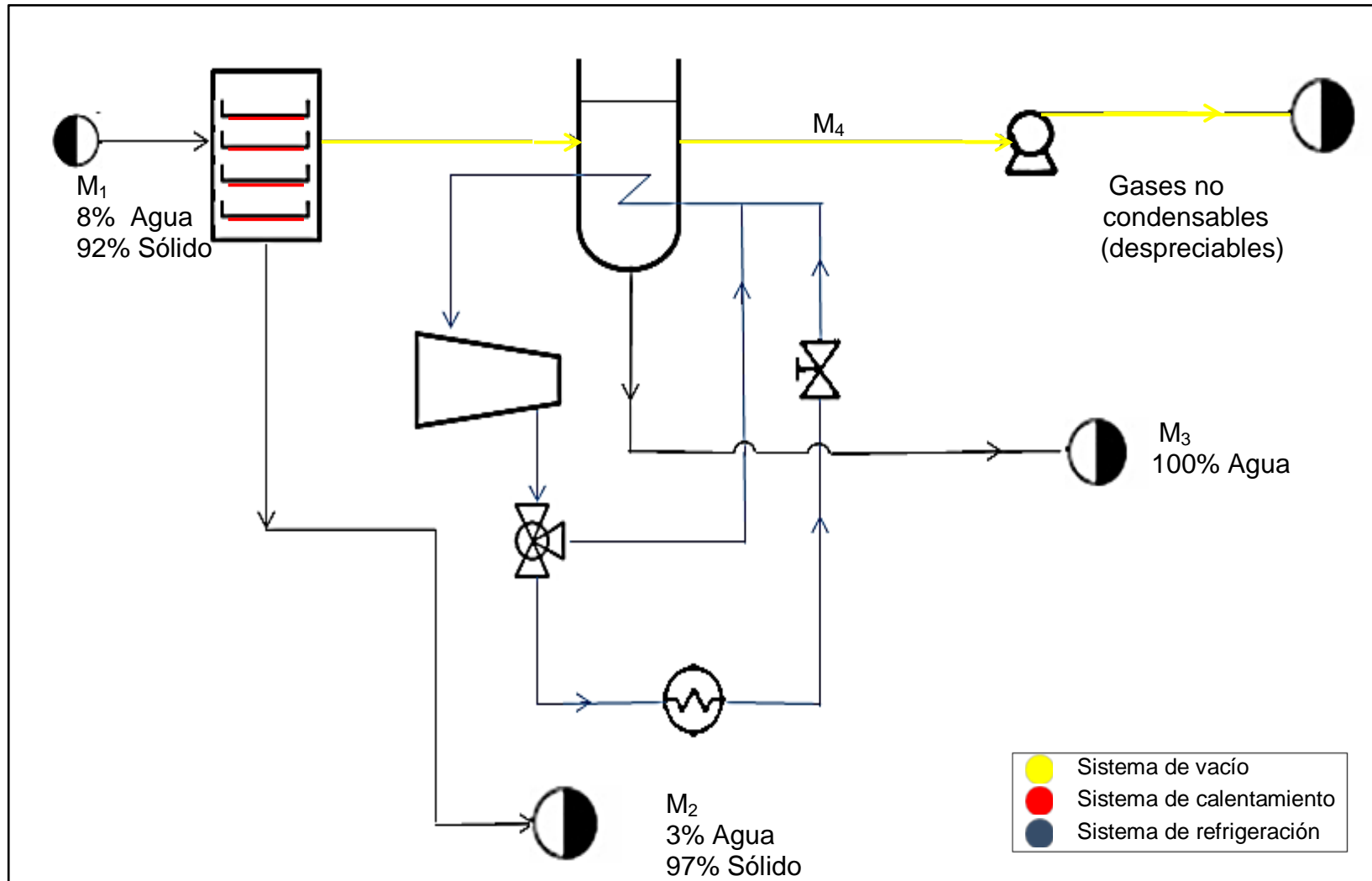
Dónde:

M_1 : Flujo másico de la mezcla producto agua en la entrada.

M_2 : Flujo másico del producto seco a la salida.

M_3 : Flujo másico de agua retirada del proceso.

Figura 14. Diagrama de flujo del secador al vacío propuesto.



El balance global de masa se realiza teniendo en cuenta que no hay transferencia de masa desde el exterior, además se considerará que no hay acumulaciones y la cantidad de gases no condensables que sale por la corriente 3 son despreciables. Teniendo en cuenta lo anterior como se evidencia en la Ecuación 1 el balance que describe el proceso se reduce a:

Ecuación 1. Balance global.

$$M_1 = M_2 + M_{H_2O}$$

En donde para el componente agua el balance por componente quedaría de la siguiente manera:

$$W_e = M_1(x_1 - x_2)$$

Donde x_1 y x_2 son las fracciones de agua en base seca sobre la mezcla agua-producto a la entrada y salida del secador, y W_e es igual a la masa de agua evaporada.

3.2 CONSIDERACIONES PRELIMINARES

En el diseño de un secador al vacío, intervienen los principios de transferencia de masa y energía, estos delimitan la rapidez con la que es posible evaporar el agua asociada con un producto expresada en forma de humedad; para ello, es imprescindible determinar de manera simultánea, la necesidad del sistema refrigerante para eliminar el calor del vapor de agua, aportado durante el proceso de evaporación de esta; por ello a continuación se evidenciarán las consideraciones relacionadas con los factores de diseño, que se han de tener en cuenta antes de realizar el diseño del secador .

3.2.1 Factores de diseño. Para el desarrollo de la propuesta de diseño del equipo de secado que deshidratará endulzante granulado en la empresa, se tuvieron en cuenta diversos factores asociados al proceso, tales como condiciones térmicas, condiciones de presión, capacidad del equipo y componentes del sistema refrigerante.

3.2.1.1 Condiciones térmicas y presión. El equipo considerado para el proceso de secado, debe ser construido a fin de que pueda trabajar a presiones de vapor inferiores al punto de ebullición del agua en Bogotá, a fin de evitar altas temperaturas que se relacionen con la degradación de las propiedades del endulzante granulado dentro del proceso; por ende es necesario especificar la presión interna de la cámara respecto la temperatura establecida de evaporación del agua adecuada para el proceso de secado del producto. Esto con el fin de garantizar que la cámara considerada para el proceso de secado, posea hermeticidad y resistencia suficiente en la estructura externa de esta para evitar

colapsos en su interior. Por lo que el proceso se especificó, que trabajará a una presión de 56 mm de Hg, correspondiente a la temperatura de vaporización del agua a 40°C.

La presión de operación del proceso y las temperaturas relacionadas, se basan en el cálculo de la carga total de agua a extraer por lote, para ello, se establecerán las temperaturas relacionadas con el proceso de secado, según especificaciones del sistema de refrigeración, tanto para absorber el calor proporcionado por la carga total de vapor de agua a condensar, como para disipar dicho calor absorbido por el fluido refrigerante. Con base a ello, se definen las condiciones de temperatura de la siguiente manera:

- Temperatura de entrada del producto: 15°C.
- Temperatura de operación de la cámara: 40°C.

3.2.1.2 Capacidad del equipo de secado: Para la producción del endulzante granulado, como se indicó anteriormente, la capacidad de procesamiento del secador se determinó según la necesidad de la empresa; sin embargo, teniendo en cuenta los recursos financieros de ésta, se consideró una capacidad de procesamiento inferior a la actualmente diseñada. Como se describió en la tabla de especificaciones del anterior capítulo, la capacidad de producto húmedo a procesar es de 10 kg de materia prima, en donde para una tasa de alimentación de 5 kg/h de producto húmedo, permitiendo obtener al final del proceso de secado, una cantidad de producto final seco aproximada de 9,49 kg por lote; esto evidencia un rendimiento alto en la producción del endulzante.

3.2.1.3 Sistema de refrigeración. El sistema de refrigeración como parte fundamental dentro del proceso de secado al vacío, encargado de realizar la segunda etapa del proceso, consiste en condensar el agua eliminada del producto, disminuyendo la temperatura del vapor de agua generado en la etapa inicial, hasta alcanzar un valor igual o inferior a 0°C, cerca al punto triple del agua. De manera que, para realizar la condensación del vapor de agua, éste es conducido al exterior de la cámara por acción de la bomba de vacío.

Para el diseño del sistema de refrigeración teniendo en cuenta como criterio principal, la carga de agua total a extraer, que definirá posteriormente la capacidad del secador, dependiendo simultáneamente de las condiciones de operación de éste; adicionalmente la selección del evaporador es un factor importante para definir el sistema de refrigeración, considerando que por medio de este dispositivo, se condensará la totalidad del agua extraída del producto para llevar a cabo el proceso de secado.

Los parámetros iniciales o de entrada son un factor esencial en el diseño del sistema de refrigeración, de manera que a continuación en la Tabla 3 se definen dichos parámetros.

Tabla 3. Parámetros iniciales.

Parámetro	Valor
Temperatura exterior	15°C -20°C
Temperatura de operación	40°C
Temperatura de condensación del refrigerante	40°C
Temperatura de evaporación del refrigerante	-20°C

3.3 METODOLOGÍA

Con el objetivo de estructurar el diseño y dimensionamiento de los equipos que comprenden el sistema de calentamiento y refrigeración, se planteó el diseño señalado para los sistemas partiendo de la metodología encontrada en la literatura, a fin de ejecutar su desarrollo y el dimensionamiento involucrado en los equipos para los sistemas compuestos.

3.3.1 Cálculos del sistema de calentamiento. El sistema de calentamiento en el diseño de los equipos de secado al vacío y semejantes, es el encargado de realizar la primera etapa del proceso de secado, éste consiste en elevar la temperatura del producto a una temperatura de evaporación del agua establecida como 40°C, la cual corresponde a una presión absoluta de 56mm Hg, presión que se deberá fijar al interior de la cámara.

Durante esta etapa se genera el desprendimiento de la humedad del producto en forma de vapor, para ello una vez es reducida la presión interna de la cámara hasta alcanzar 56mm Hg absolutos, se comienza a suministrar el calor al producto a través de unas resistencias de calentamiento que estarán ubicadas debajo de cada portabandejas.

El proceso de transmisión de calor entre las resistencias y el producto, se realiza por medio de conducción, de manera que el calor pasa a través de los portabandejas hacia las bandejas que contienen el producto, de forma permanente a lo largo del proceso, originando pérdidas de peso sobre el producto. Por lo cual, el diseño y la selección de las resistencias se desarrollan mediante ecuaciones de balance de masa y energía. A continuación siguiendo la metodología del diseño de secadores indirectos planteada por Edward Cook¹⁵, se plantearán los pasos y criterios para el diseño de dicho sistema para el secador al vacío propuesto.

¹⁵ COOK, Edward M y DUMONT, Harman D. Process drying practice. New York: McGraw-Hill Companies, 1991. p. 55 – 59.

3.3.1.1 Cantidad de agua a evaporar. Para determinar la cantidad de calor que se debe suministrar en cada bandeja, es preciso como se mencionó anteriormente, conocer la cantidad de agua a retirar sobre el producto; para ello mediante el balance de masa por componente del proceso, se halla la cantidad de agua a extraer sobre el producto. Como se evidencia en la Ecuación 2, para determinar la cantidad de agua a evaporar durante el proceso de secado, es necesario tener en cuenta la cantidad el flujo másico de alimentación del producto, la humedad inicial y la humedad final.

Ecuación 2. Balance de masa del agua.

$$W_e = M_1(x_{1,bs} - x_{2,bs})$$

Donde

W_e : Flujo másico de evaporación del agua, kg/h

M_1 : Flujo másico de alimentación en base seca, kg/h*

$X_{1,bs}$: Fracción de agua en base seca a la entrada del proceso.

$X_{2,bs}$: Fracción de agua base seca a la salida del proceso.

3.3.1.2 Flujos másicos del líquido y sólido. Gran parte del diseño del secador, se centra en el cálculo del calor requerido para la evaporación del agua, por esta razón es importante diferenciar 2 zonas de calentamiento que ocurren en la mayoría de los secadores indirectos, el calentamiento y el secado a velocidad constante del producto.

Para ello adicional al cálculo del agua a evaporar W_e , es necesario conocer los flujos másicos del líquido y el sólido, los cuales describen la zona anterior al secado constante, el calentamiento del inicial del producto, como se evidencia en la Ecuación 3 y 4.

Ecuación 3. Flujo másico del sólido en la alimentación.

$$W_s = F(1 - x_{1,bh})$$

Ecuación 4. Flujo másico del líquido en la alimentación.

$$W_l = F - W_s$$

Donde:

F: Flujo másico de alimentación en base húmeda, kg/h

$X_{1,bh}$: Fracción de agua en base húmeda a la entrada del proceso.

Para realizar los cálculos anteriormente descritos y los faltantes para el desarrollo del diseño de calentamiento del equipo, se presenta a continuación en la Cuadro

* $M_1 = F(1 - X_{1,bh})$

8, la información básica requerida para realizar los cálculos del sistema de calentamiento definido para un secador indirecto por lotes.

Cuadro 8. Información para el cálculo del sistema de calentamiento.^{16, 17}

Parámetro	Valor
Entrada de alimento húmedo	10 kg
Tasa de alimento base húmeda	5 kg/h
Humedad entrada base húmeda	8 %
Temperatura de entrada	15 °C
Humedad final producto	3 %
Cp sólidos promedio (89% Azúcar)	1.306 J/g°C
Cp agua	4.18 J/g°C
Temperatura medio calefactor	60 °C
Entalpía a (60°C)	2357.69 kJ/kg
Entalpía Vaporización	2406 kJ/kg
Entalpía agua líquida	167.54 kJ/kg
Entalpía vapor de agua promedio (40 - 60) °C	2591.195 kJ/kg
Temperatura producto a secado constante	40 °C

Es necesario destacar que la temperatura de operación asumida para el medio calefactor, se estableció como la máxima admitida por la Stevia¹⁸, a fin de elevar la temperatura del producto hasta los 40 °C, haciendo efectivo el cambio fase, hasta culminar la vaporización total del agua no deseada sobre el producto.

3.3.1.3 Medias térmicas logarítmicas MLDT. Como base del diseño térmico, el cálculo de las diferencias medias logarítmicas de temperaturas, son un factor fundamental para determinar la cantidad de energía requerida por el sistema, para llevar a cabo la eliminación del agua asociada al producto. Para ello al definir los rangos de temperatura descritos a lo largo del proceso de secado, tales como las temperaturas, entrada del producto, vaporización del agua y medio de calefacción (resistencia). En consecuencia, se calculan 2 diferentes medias térmicas logarítmicas, con base a la zona en la cual se encuentren; siendo estas calculadas entre la temperatura del producto y la temperatura de las resistencias, correspondientes a cada zona del secado descrito anteriormente. Mediante la Ecuación 5 se halla dichas medias térmicas logarítmicas.

¹⁶ REISER, P. Sucrose: properties and applications. Paris: Springer Science & Business Media, 1994. p. 208

¹⁷ CENGEL, Yunus A. Boles, et al. Termodinámica. México: Mc Graw Hill, 2003. p. 908-910.

¹⁸ JERIA, Denisse. M y POZO, Alberto. Estudio del secado conectivo de hojas de Stevia rebaudiana y factibilidad técnico-económica de una planta elaboradora de edulcorante a base de Stevia. Trabajo de grado Ingeniero de alimentos. Santiago: Universidad de Chile. p 122.

Ecuación 5. Cálculo de MLDT para el calentamiento.

$$MLDT_1 = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\log\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)}$$

Donde

ΔT_1 : Temperatura del medio calefactor- temperatura de entrada del sólido.

ΔT_2 : Temperatura del medio calefactor- temperatura de sólido en la evaporación.

Para la zona de secado constante como su nombre lo indica, no se realizará el cálculo de la MLDT con la ecuación anterior, sino que se hallará por la diferencia entre la temperatura del medio caliente y la del producto en la fase de evaporación. Las temperaturas que rigen las dos zonas anteriormente explicadas se evidencian en la Tabla 4.

Tabla 4. Temperaturas para las zonas de operación de calentamiento.

Operación	1		2	
	calentamiento		Secado constante	
Temperaturas °C				
Resistencias	60	60	60	60
Producto	15	40	40	40

3.3.1.4 Cargas caloríficas del sistema. El cálculo de las cargas del sistema para el diseño de un secador indirecto, se define según el autor Edward Cook¹, como las fuentes de calor que producen un aumento sobre la temperatura interna del sistema, para ello como se plantea en su metodología, mediante el uso de las ecuaciones 6 y 7, se evalúan las cargas expedidas por los componentes del producto al inicio del proceso de secado; por otra parte como indica el autor, mediante el desarrollo de la ecuación 8 se evalúa la carga necesaria para llevar a cabo el proceso de evaporación, haciendo así posible la disminución de humedad sobre el producto.

Ecuación 6. Carga de calor de los líquidos.

$$Q_l = W_l C_l (t_0 - t_1)$$

Ecuación 7. Carga de calor aportada por los sólidos.

$$Q_s = W_s C_s (t_0 - t_1)$$

Ecuación 8. Carga de calor aportada por la evaporación.

$$Q_e = W_e L_v$$

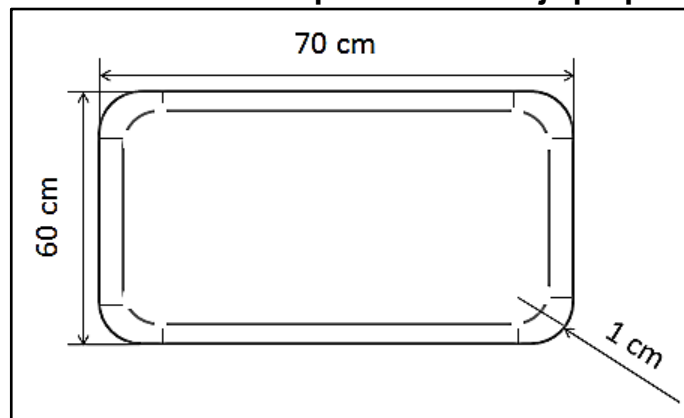
Dónde:

Q_l, Q_s, Q_e : cargas de calor del líquido, el sólido y la evaporación respectivamente, kW

t_i, t_o : temperatura del líquido o sólido a la entrada y salida, °C
 L_v : calor latente de vaporización del líquido, agua, kJ/h

3.3.1.5 Coeficiente global de transferencia de calor. Identificado como la suma de resistencias, ya sea por conducción, convección, radiación o combinadas¹⁹; este coeficiente se calcula de acuerdo a la geometría y las propiedades de los materiales que comprenden el espacio de estudio. Considerando esto, es necesario definir el área superficial por bandeja, la cual en principio se estableció un área 4200 cm² por bandeja, distribuidas en 70 cm de largo por 60 cm de ancho (Ver Figura 15).

Figura 15. Dimensiones para las bandejas propuestas.



Sin embargo, considerando que el área superficial propuesta por bandeja, debe ser considerablemente mayor al área mínima de esparcimiento del producto, se procedió a establecer este último parámetro; para ello con base a la cantidad máxima de producto húmedo a secar por bandeja, 2 kg, y la densidad a granel determinada para el producto granulado, 0.58 kg/L; se obtuvo un volumen mínimo por bandeja de 3.44 L ó 3440 cm³. Finalmente suponiendo un espesor de esparcimiento del material igual a 1 cm de alto, se obtuvo que el área superficial de la bandeja propuesta de 4200 cm², era mayor al área mínima requerida en un 18 %.

Con base a la geometría y dimensionamiento de las bandejas anteriormente descrito, se tiene finalmente para determinar que para determinar el coeficiente global de transferencia de calor se usa la Ecuación 9.

Ecuación 9. Coeficiente global de transferencia de calor.¹⁹

$$\frac{1}{U} = \frac{z_m A}{k_m A_w} + \frac{z_s A}{k_s A}$$

¹⁹ TREYBAL, Robert E. Operaciones de transferencia de masa. México: McGraw-Hill, 1988. p 744.

Donde:

z_m : espesor del material conductor de calor, m

z_s : espesor del producto, m

A: área superficial de contacto entre producto húmedo y bandeja, m^2

A_w : área superficial total por bandeja*, m^2

U: Coeficiente global de transferencia de calor, $W/m^2\text{°C}$

k_m : conductividad térmica del medio o material conductor (acero inoxidable 304), $(W/m K)^{20}$

k_s : conductividad térmica del producto, $(W/m K)$

Para establecer las propiedades anteriormente descritas asociadas al producto, se consideró que al no haber los datos suficientes de estas propiedades para el componente del producto de menor proporción, la Stevia; las propiedades establecidas para el producto son relacionadas con el azúcar, debido a que la cantidad de azúcar en el producto es del 89% en base seca, por lo que se puede hacer esta consideración. Sin embargo, cabe aclarar que para esta suposición no se tuvo en cuenta la porosidad del producto.

3.3.1.6 Área superficial ajustada por la carga. Teniendo en cuenta que, para lograr la vaporización de la humedad indeseada del producto, existen dos zonas o etapas mencionadas en un inicio, las cuales proveen al producto las condiciones necesarias para elevar la temperatura tanto del sólido como del agua; mediante el uso de la Ecuación 10 se determinan las áreas superficiales necesarias para llevar a cabo el ajuste entre la placa y el medio de calentamiento.

Ecuación 10. Área superficial en cada zona.

$$A_i = \frac{Q_i}{(MLDT) U L}$$

Donde

A_i : Área superficial requerida en las dos zonas (calentamiento y secado velocidad constante), m^2

Q_i : Carga de calor aportado por líquido sólido y evaporación, kW

L: Cobertura del material a secar sobre la bandeja, %

3.3.1.7 Carga total del secador. Por último para conocer la cantidad de calor que debe suministrar el medio de calentamiento sobre el producto, teniendo en cuenta la evaluación de los parámetros anteriormente descritos, se realiza la suma de los calores exigidos por parte del líquido, el sólido y la evaporación en cada zona. En la Ecuación 11 se considera la carga total de calor del sistema como la sumatoria de las cargas independientes.

* $A_w = A +$ área de laterales.

²⁰ HOUGEN, Olaf A y WATSON, Kenneth M. Principios de los procesos químicos. España: Reverté, 1982. p 26.

Ecuación 11. Calor total requerido por lote.

$$Q_t = Q_l + Q_s + Q_e$$

3.3.2 Cálculos del sistema de refrigeración. Como parámetro principal en el diseño del secador, el sistema refrigerante se define primordialmente en función del condensador y el evaporador, elementos que son esenciales ya que limitan el diseño de éste; esto se evidencia respecto a la función principal definida por este sistema, de retirar el vapor de agua de los gases generados por la evaporación del agua al interior de la cámara antes de ingresar al sistema de vacío.

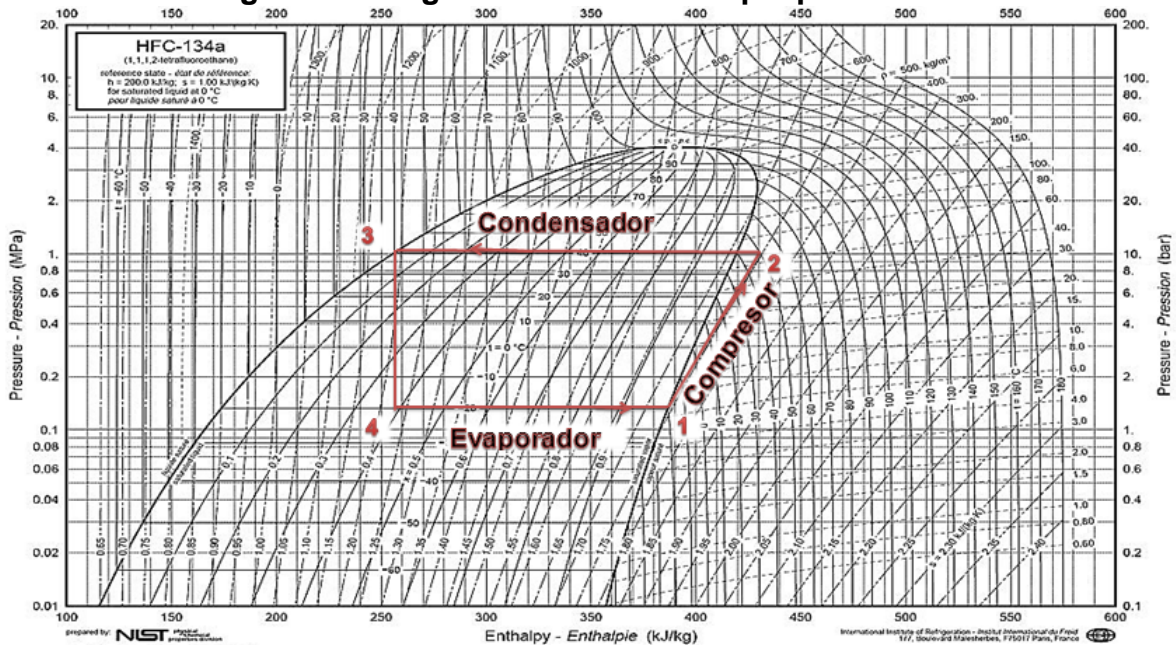
Para definir el sistema refrigerante que retirará el vapor de agua generado en la vaporización de este, se consideró utilizar el refrigerante R-134a. Con base a los parámetros iniciales evidenciados en la Tabla 3, interpolando en el diagrama de Mollier (P-h) para el refrigerante saturado R-143a (Figura 16), se encuentran las condiciones que definen a los componentes del sistema refrigerante tal y como se evidencia en la Cuadro 9.

Cuadro 9. Especificaciones sistema de refrigeración.²¹

Estado	Ubicación	Temperatura, °C	Entalpía, kJ/kg	Presión, kPa
1	Salida del evaporador	-20	386.55	132.76
2	Salida del compresor	50	432	1017.1
3	Salida del condensador	40	256.41	1017.1
4	Entrada del evaporador	-20	256.41	132.76

²¹ Anexo B

Figura 16. Diagrama Presión- Entalpía para R134a.



Fuente: The International Institute of Refrigeration (IIR) - Institut International du Froid, Paris, France. Modificada por autor.

3.3.2.1 Cálculo de la potencia frigorífica. Para el diseño del evaporador, es preciso conocer la cantidad de vapor de agua que se requiere congelar en la superficie de éste; para ello, mediante la ecuación de balance de materia por componente, se determina el flujo másico del agua dividiendo la masa sobre el tiempo que se necesita que demore el proceso por lote. A continuación considerando que la potencia del sistema refrigerante se es igual al calor requerido para evaporar la cantidad de agua ligada al producto, se calcula la potencia frigorífica mediante la ecuación de balance de masa y energía (Ecuación 12).

Ecuación 12. Balance de energía y masa

$$Q = \dot{m}_{H_2O} * \lambda_{vap}$$

Donde

Q: carga térmica (kJ)

λ_{vap} : Calor latente de vaporización (kJ/kg)

\dot{m}_{H_2O} : Flujo másico de agua

3.3.2.2 Carga refrigerante. Para el cálculo de la masa del refrigerante que circulará por los componentes del sistema de refrigeración, considerando las especificaciones enunciadas anteriormente en el Cuadro 9 se tomó una temperatura de evaporación de -20°C según criterio profesional. El flujo másico del

refrigerante se calcula de acuerdo a la ecuación de la carga térmica del secador al vacío (Ver Ecuación 13).

Ecuación 13. Carga refrigerante.

$$\dot{Q}_f = \dot{m}_R (h_1 - h_2)$$

Donde:

\dot{Q}_f : Potencia frigorífica. (kW)

\dot{m}_R : Caudal másico del refrigerante. (kg/s)

h_1 : Entalpía del vapor saturado del refrigerante. (kJ/kg)

h_2 : Entalpía del vapor sobrecalentado del refrigerante. (kJ/kg)

3.3.2.3 Potencia de compresión. La potencia del compresor, es una parte fundamental para que se cumpla el ciclo de refrigeración establecido, debido que esté dispositivo es el encargado de recircular el refrigerante, además de aumentar la presión para los puntos 1 y 2 anteriormente explicados a fin de realizar efectivamente el proceso de condensación del refrigerante. A continuación en la Ecuación 14 se evidencia el cálculo para hallar la potencia teórica del compresor

Ecuación 14. Potencia teórica del compresor.

$$P_c = \dot{m}_R (h_2 - h_1)$$

Dónde:

P_c : Potencia del trabajo de compresión (kW)

4. DISEÑO BÁSICO DEL SECADOR AL VACÍO PROPUESTO

Para dar inicio al capítulo de diseño básico del equipo de secado que realizará la deshidratación de endulzante granulado, con fin de mejorar las condiciones de secado actuales, se tomaron en cuenta las condiciones y especificaciones definidas en el capítulo anterior.

Con base a la metodología presentada anteriormente para el desarrollo del diseño, el presente capítulo se desarrollará en cinco partes. La primera parte corresponde al diseño del sistema de calentamiento, el cual es definido a partir de los calores sensible y latente del producto y agua. La segunda parte se destinó para la selección y diseño del sistema de refrigeración, evaluando las especificaciones y condiciones con las que debe contar éste, para ser implementado en el proceso de secado. La tercera parte hace referencia al diseño de la estructura de la cámara de secado. En el cuarto apartado del presente capítulo se realiza el cálculo del espesor del aislante que aislará el calor de la cámara al entono para obtener menores pérdidas de energía en el equipo durante el proceso de secado. Finalmente la selección de la bomba para el sistema de vacío y el tiempo de obtención del vacío máximo se definirá para la quinta y última parte.

4.1 SISTEMA DE CALENTAMIENTO DEL EQUIPO

El sistema de calentamiento del equipo de secado, basa su diseño en la demanda de calor requerida por lote para calentar las bandejas y efectuar la evaporación del agua expresada como humedad del producto; acorde con lo anterior se define el sistema de calentamiento de las bandejas, como un sistema compuesto por una serie de resistencias eléctricas, las cuales permiten alcanzar de manera seccionada la temperatura de evaporación del agua sobre cada una de estas.

A continuación mediante una sucesión de cálculos relacionados entre sí, con el fin de diseñar y dimensionar el sistema descrito, se establecen en principio los parámetros de diseño de los componentes del sistema de calentamiento, a fin de determinar el porcentaje del área de transferencia de calor sobre las bandejas las cuales deben estar en contacto directo con resistencias.

4.1.1 Cálculo de la masa de agua a evaporar. Considerando, la tasa de alimentación de ingreso al secador como el flujo másico M_1 y las fracciones molares del agua del producto al inicio y final del proceso de secado expresadas en base seca, se obtiene mediante la ecuación 2 la cantidad de agua a evaporar.

$$W_e = M_1(x_{1,bs} - x_{2,bs})$$

$$W_e = 4.6 \text{ kg} \frac{\text{ss}}{\text{h}} \left(\frac{8 \text{ kg } H_2O}{92 \text{ kg ss}} - \frac{3 \text{ kg } H_2O}{97 \text{ kg ss}} \right)$$

$$W_e = 4.6 \frac{\text{ss}}{\text{h}} \left(0.087 \frac{\text{kg } H_2O}{\text{kg ss}} - 0.0309 \frac{\text{kg } H_2O}{\text{kg ss}} \right)$$

$$W_e = 0.2577 \text{ kg/h } H_2O$$

Esto significa que por cada hora de operación del secador, se condensan sobre el serpentín del evaporador propuesto, 0.2577 kg de agua que inicialmente se evidencian en forma cristales, o en su defecto 0.5154 kg de agua por lote.

4.1.2 Cálculos flujos máxicos del líquido y sólido. Además de conocer la cantidad de agua a evaporar de producto por lote, es necesario determinar de manera simultánea, los flujos máxicos del sólido y del líquido inicial del proceso de secado, ya que a partir de su estimación, se determinan los calores necesarios para elevar la temperatura del producto desde la de entrada hasta la de evaporación del agua. A continuación haciendo el uso de las ecuaciones 3 y 4, se determinan los flujos de sólidos y líquidos al inicio del proceso de secado. Recordando que el flujo máxico de alimentación del sólido se identifica con la variable W_s equivalente a M_1 en el balance anterior.

$$W_s = F (1 - x_{1,bh})$$

$$W_s = 5 \text{ kg/h } (1 - 0.08)$$

$$W_s = 4.6 \text{ kg/h}$$

$$W_l = F - W_s$$

$$W_l = 5 \text{ kg/h} - 4.6 \text{ kg/h}$$

$$W_l = 0.4 \text{ kg/h}$$

Las tasas de sólidos y de agua respectivamente que ingresan al secador son 4,6 kg y 0,4 kg por cada hora de operación de éste y de los cuales corresponden la tasa total de alimentación del secador.

4.1.3 Cálculo de las Medias térmicas logarítmicas MLDT. Conociendo las temperaturas establecidas sobre las distintas zonas que definen el calentamiento del producto, se determinan las diferencias de temperatura medias logarítmicas, a partir del desarrollo de la Ecuación 5; las temperaturas que rigen dichas zonas se encuentran en la tabla 6 del anterior capítulo.

A continuación en la Tabla 5, se observan los resultados obtenidos al desarrollo de la Ecuación 5, en la cual se evidencian las dos zonas que componen el

calentamiento del producto, desde su temperatura inicial hasta alcanzar la temperatura de la evaporación del agua en condiciones de vacío indicadas. Es necesario aclarar que para el cálculo de las diferencias de temperatura, se asume flujo paralelo para el cambio de temperatura respecto al medio calefactor y cómo influye ésta sobre el producto a lo largo del proceso.

Tabla 5. Cálculo MLDT.

Zona/ Operación	1		2	
	Calentamiento		Secado constante	
Temperaturas °C				
Resistencias	60	60	60	60
Producto	15	40	40	40
Diferencias	45	20	20	20
MLDT	30.83		20.00	

Como se percibe en la Tabla 5, el cálculo de las medias térmicas logarítmicas, diferencian las dos zonas del proceso de calentamiento del producto, en la cual para la zona de calentamiento hay más demanda de temperatura que en la zona de secado constante, ya que en secado constante tanto las temperaturas del medio calefactor como las del producto permanecen constantes a causa del cambio de estado que se produce durante este lapso.

4.1.4 Cálculo de las cargas caloríficas del sistema. Partiendo del cálculo de los flujos másicos involucrados durante el proceso de secado del endulzante granulado, se determinan las cargas del sistema para el calentamiento del mismo, para ello mediante el uso de las ecuaciones 6, 7 y 8 descritas en el capítulo anterior, se obtienen las cargas caloríficas del líquido, el sólido y de la evaporación respectivamente. Para la evaluación de dichas cargas caloríficas, se debe tener en cuenta además las temperaturas definidas para cada zona, tal y como se evidencia en la Tabla 6 y los calores específicos involucrados en el proceso de secado del producto (sólido y agua).

Tabla 6. Cálculo de cargas térmicas por zona.

Zona / Operación	1	2
	Calentamiento	Secado constante
Cargas térmicas kJ/h		
Sólidos	180.23	-
Líquido	50.18	-
Evaporación	-	619.85
Total por zonas	230.41	619.85

Esto nos indica que para lograr elevar la temperatura del producto, de una temperatura inicial hasta la temperatura de evaporación del agua, es necesario de acuerdo con la zona de calentamiento, adicionar un calor en forma de energía de 230.412 kJ por hora de operación del secador, mientras que en la zona de secado constante para llevarse a cabo el proceso de evaporación del agua la temperatura constante es necesario suministrar 619.95 kJ por hora de operación.

4.1.5 Cálculo coeficiente global de transferencia de calor. Como se propuso en el capítulo anterior, para especificar el coeficiente global de transferencia de calor, es necesario conocer algunas dimensiones del secador, específicamente las relacionadas con el dimensionamiento de las bandejas del equipo (Ver Figura 15); para ello es necesario definir el área superficial total por bandeja como la suma entre el área superficial especificada para el contacto con producto y los bordes de estas. Con base a estas consideraciones y datos requeridos, encontradas en el Cuadro 9 del anterior capítulo; la evaluación del factor de transmisión de calor, se obtiene mediante el desarrollo de la Ecuación 9.

$$\frac{1}{U} = \frac{z_m A}{k_m A_w} + \frac{z_s A}{k_s A}$$

$$\frac{1}{U} = \frac{(0.00244 \text{ m})(0.42 \text{ m}^2)}{(16 \text{ W/m}^\circ\text{C})(0.4660 \text{ m}^2)} + \frac{(0.01 \text{ m})(0.42 \text{ m}^2)}{(0.173 \text{ W/m}^\circ\text{C})(0.42 \text{ m}^2)}$$

$$U = 17.257 \text{ W/m}^2\text{ }^\circ\text{C} = 62.1256 \text{ kJ/h m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$$

Esto nos indica que para elevar un grado de temperatura en centígrados, son requeridos 17.257 watts por cada metro cuadrado, a fin de que el rendimiento del secador sea el necesario para poder obtener la carga de calor suficiente y secar así la cantidad de producto especificada.

4.1.6 Cálculo área superficial de transferencia de calor total. Mediante el uso de los datos y factores de diseño anteriormente calculados, se evalúa el área de transferencia de calor requerida a fin de llevar a cabo la deshidratación del producto. Esta área es establecida mediante el uso de la Ecuación 10, en la cual dependiendo la zona en la que se encuentre se toman valores distintos de carga y fracción de cobertura en términos de área, sobre la cual se encuentra en contacto directo el producto con la placa o transferencia de calor.

El cálculo de área superficial de transferencia de calor requerida para la primera zona que corresponde al calentamiento del producto, según como propone el autor, Edward Cook²², se tuvo en cuenta un porcentaje de cobertura del producto como el 100%.

²²COOK, Edward M y DUMONT, Harman D. Process drying practice. New York: McGraw-Hill Companies, 1991. p. 55 – 59.

$$A_1 = \frac{Q_i}{(\text{MLDT})_i U L_i}$$

$$A_1 = \frac{230.412 \text{ kJ/h}}{(30.83 \text{ }^\circ\text{C}) * (62.1256 \text{ kJ/h m}^2 \text{ }^\circ\text{C}) * (1.0)}$$

$$A_1 = 0.1203 \text{ m}^2$$

Lo cual indica que para realizar el proceso de calentamiento del producto y elevar la temperatura de éste, desde los 15 °C* hasta alcanzar la temperatura de evaporación del agua, es necesario garantizar que se encuentre 0.1203 m² de contacto directo de la placa o portabandeja con las resistencias.

Posteriormente, para definir el área superficial de transferencia de calor necesaria que llevará a cabo la segunda zona o secado constante, se emplea la misma Ecuación 10, teniendo en cuenta la variación en los requerimientos tales como las cargas, las diferencias de temperaturas y el porcentaje de carga del producto sobre la bandeja, el cual para este caso se tomará como el 85%.

$$A_2 = \frac{Q_2}{(\text{MLDT})_2 U L_2}$$

$$A_2 = \frac{619.25 \text{ kJ/h}}{(20 \text{ }^\circ\text{C}) * (62.1256 \text{ kJ/h m}^2 \text{ }^\circ\text{C}) * (0.85)}$$

$$A_2 = 0.5869 \text{ m}^2$$

Como se evidencia en ambos cálculos de las áreas, el coeficiente global de transferencia de calor permanece constante para ambos casos, esto se debe a que las resistencias que deben vencer el calor son las mismas para lograr su objetivo.

Sin embargo, el área definida para la zona dos revela que el área superficial que precisa ser resistida para que el producto pueda realizar el proceso de evaporación es de 0.5869 m², este valor es mayor al de calentamiento, por lo que para definir una misma área resistida total necesaria para suministrar el calor estimado por las resistencias, se debe tener en cuenta la suma de estas dos.

$$A_t = \sum A_i$$

* Temperatura ambiente promedio en Bogotá.

Tabla 7. Cálculo de áreas superficiales totales en el secador.

ZONA	Área superficial Total m ²	Área por bandeja, m ²	%
Zona 1	0.1203	-	-
Zona 2	0.5869	-	-
TOTAL	0.7072	0.1414	33.68

Finalmente de acuerdo a los datos obtenidos por la Tabla 7, se ratifica que para poder cumplir con el requerimiento de calor por parte del sistema de calentamiento, es preciso cubrir un área de 0.1414 m² por bandeja, correspondiente al 33.68% de las mismas, según el área establecida en un comienzo de 4200 cm² (70 cm x 60 cm). Esta última área fue calculada teniendo en cuenta las especificaciones técnicas de diseño definidas en la tabla 3 del capítulo diagnóstico.

4.1.7 Cálculo de carga total del secador. El cálculo que define la cantidad de calor necesario para realizar la deshidratación del endulzante granulado, en donde se prevé alcanzar el 3 % de humedad sobre el producto final, se deben tener en cuenta simultáneamente los calores o cargas caloríficas necesarias para el calentar el líquido, el sólido y llevar a cabo la evaporación del agua correspondiente en cada zona, tal y como se expresa en la Ecuación 11 presentada en el anterior capítulo.

$$Q_{teorico} = Q_l + Q_s + Q_e$$

$$Q_{teorico} = 180.228 \text{ kJ/h} + 50.184 \text{ kJ/h} + 619.85 \text{ kJ/h}$$

$$Q_{teorico} = 850.26 \text{ kJ/h}$$

Sin embargo a pesar del significado ante el valor obtenido que determina la carga de calor total del proceso de secado; expresando que por cada hora de funcionamiento del equipo, es necesario suministrar 850.26 kJ en todo el secador; se debe tener en cuenta que aparte de suministrar ese calor teórico, el sistema de calentamiento debe tener una capacidad mayor a la estipulada, a fin de evitar sobredimensionamientos en el sistema y cubrir de esta manera las fugas posibles que pueden ocasionar pérdidas de calor dentro del equipo, para ello se aconseja tomar un factor de seguridad del 20 %²³ para el desarrollo de la Ecuación 15.

Ecuación 15. Calor total real del secador.

$$Q_{real} = Q_{teorico} + (Q_{teorico} * f_{seguridad})$$

$$Q_{real} = 850.26 \text{ kJ/h} + (850.26 \text{ kJ/h} * 0.20)$$

²³ Se tomó el factor de 20 correspondiente a el factor promedio basado para las cargas de secadores.

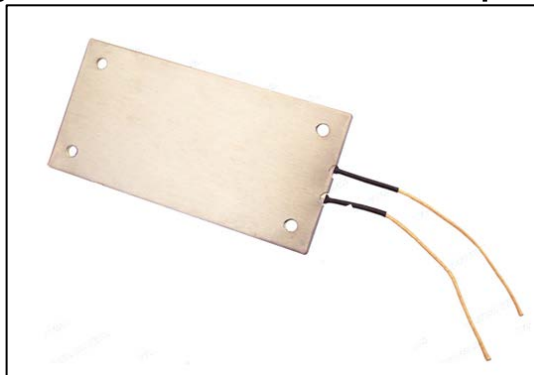
$$Q_{real} = 1020.309 \text{ kJ/h}$$

Este valor nos indica que por cada hora que mantiene en operación el equipo, es necesario suministrar a través del sistema de calentamiento una carga igual a 1020.309 kJ por lote de producto.

4.1.8 Dimensionamiento resistencias de calentamiento. El sistema de calentamiento empleado en el funcionamiento de secadores al vacío, radica en suministrar el calor necesario al producto a través de un medio de calentamiento indirecto; para ello el material a secar es ubicado sobre una superficie conductora de calor, la cual se abastece de calor mediante diferentes métodos de tales como resistencias eléctricas, calentamiento con fluidos, celdas solares entre otros.

Para la ejecución del sistema de calentamiento sobre el nuevo equipo de secado a adquirir, se propone emplear una serie de resistencias eléctricas planas o micas (nombre comercial), para definir el medio de calentamiento del producto. Como se muestra en la Figura 17, este tipo de resistencias poseen un diseño compacto y una alta área de transferencia de calor, lo que representa que a través de su instalación sobre el material conductor, se logre un calentamiento homogéneo sobre las placas. Para ello las resistencias referidas se ubicarán en la parte inferior de las placas portabandejas, estas últimas a diferencia de las bandejas, permanecerán fijas en el secador.

Figura 17. Resistencias eléctricas planas.

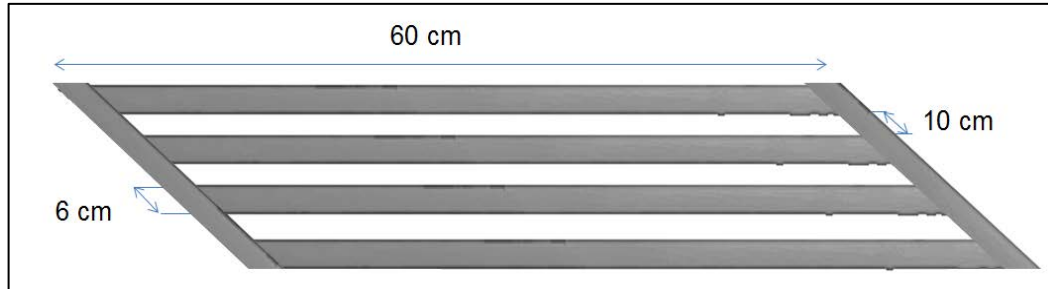


Fuente: Muestras de Resistencias de Calentamiento. www.termokew.mx

El dimensionamiento de las resistencias electricas, se determinan de acuerdo a las extension de las placas portabandejas, que conducirán el calor requerido a los recipientes con producto; para ello, teniendo en cuenta como se especifico anteriormente, estas deben distribuirse de manera que alcancen un area de contacto con las con las placas igual al 33.68% que corresponde a un area de 0,1414 m² por portabandeja. A continuación como se puede observar en la Figura 18, se propone una distribución y ubicación de las resistencias, a fin de cumplir la condición de transferencia de calor del area superficial resistida definida

anteriormente, y mantener así la distribución de calor a lo largo de las bandejas sin que hallan pérdidas.

Figura 18. Distribución de resistencias sobre placas portabandejas.



Con el fin de determinar las especificaciones de las resistencias para definir el modo de operación de estas sobre las bandeja, se tomó el valor de la temperatura máxima de los productos, 60 °C, como la temperatura máxima a la cual deben operar las resistencias; de esta manera se busca evitar fundir los productos durante el proceso de calentamiento. Asimismo para determinar la potencia de las resistencias, teniendo en cuenta la carga de calor total real obtenido según la demanda del secador, se halla la potencia necesaria a la cual debe operar el sistema de calentamiento, considerando además que las bandejas al poseer el mismo tamaño, capacidad y material, se puede proponer dividir dicha capacidad del secador entre las 5 bandejas especificadas para el diseño del secador, como se observa en la Ecuación 16.

Ecuación 16. Carga de calor real por placa.

$$Q_{placa} = \frac{Q_{real}}{N^{\circ} placas}$$

$$Q_{placa} = \frac{1020.309 \frac{kJ}{h}}{5 placas}$$

$$Q_{placa} = 204.062 kJ/h$$

Con base a lo anterior, se halla la potencia en *watts* de las resistencias de la siguiente manera.

$$Potencia = 1kJ/h * (1h/3600) * (1000W/1kW)$$

$$Potencia = 56,68 W$$

De manera que se propone construir el sistema de calentamiento a partir de 5 resistencias eléctricas planas, donde considerando una eficiencia del 50%, se

sugiere colocar las 5 resistencias de 114 watts a 220 Voltios, a fin de garantizar que la carga de calor se cumpla sobre el secador.

4.2 SISTEMA DE REFRIGERACIÓN

El sistema de refrigeración que propondrá la ejecución del equipo planteado para la deshidratación de endulzante granulado, se define por la capacidad del refrigerante para retirar la energía aportada en el proceso de vaporización del agua sobre el producto. A partir de esto, es necesario considerar para el diseño del sistema refrigerante, un equipo dotado con los diferentes componentes del sistema, el cual se definió como sistema por compresión, con el objetivo principal de condensar el vapor de agua y evitar que retorne al producto. Para ello este sistema se definirá mediante el dimensionamiento y diseño de un evaporador, un condensador y un compresor. A continuación teniendo en cuenta lo anterior, se procederá a evaluar la potencia frigorífica del refrigerante, la carga del refrigerante, potencia del compresor y el dimensionamiento del sistema.

4.2.1 Cálculo de la potencia frigorífica. El calor que ha de retirar el refrigerante por medio del evaporador, se define por la cantidad de calor aportado al producto necesaria para vaporizar del agua asociada a la humedad indeseada de éste; teniendo en cuenta lo anterior, es cabe destacar que este calor definido, es el mismo calor que requiere absorber el fluido refrigerante sobre el evaporador para llevar a cabo la cristalización del vapor de agua. Para ello se define la potencia frigorífica según la Ecuación 12; esta Ecuación adicionalmente se multiplicará por un factor de diseño, el cual para este diseño se tomará un valor de 2, duplicando los valores obtenidos para el diseño del secador. Evitando así un subdimensionamiento en el funcionamiento final del secador.

$$Q_f = \dot{m}_{H_2O} * \lambda_{vap} * f$$

$$Q_f = 0.577 \text{ kg/h} * 2406 \text{ kJ/kg} * 2$$

$$Q_f = 1240.21 \text{ kJ/h}$$

Lo cual nos indica que por cada hora de funcionamiento del sistema refrigeración se debe suministrar por parte del refrigerante 1240.21 kJ, a fin de condensar al final del proceso de secado, la totalidad del agua una vez ésta es retirada del producto en forma de vapor, ya que el calor cedido por el agua debe ser igual al calor recibido por el refrigerante, y realizar así satisfactoriamente la condensación del agua sobre el serpentín del evaporador.

4.2.2 Cálculo de la carga refrigerante. Dando ejecución a la metodología planteada para el cálculo de la masa refrigerante a partir de la carga térmica en el secador durante el proceso de vaporización, se determina la carga de refrigerante a usar por medio de la Ecuación 13. Para realizar este cálculo, se tuvieron en cuenta las entalpías definidas en el capítulo anterior evidenciadas en el Cuadro 9.

$$\dot{m}_R = \frac{Q_f}{(h_1 - h_2)}$$

$$\dot{m}_R = \frac{1240.21 \text{ kJ/h}}{(386.55 \text{ kJ/kg} - 130.14 \text{ kJ/kg})}$$

$$\dot{m}_R = 9.5298 \text{ kg/h}$$

Con base al valor obtenido para la carga de refrigerante se especifica que cada hora de operación de este sistema, son necesarios 9.5298 kg de refrigerante para lograr el correcto funcionamiento de dicho sistema.

4.2.3 Cálculo potencia teórica de compresión. A partir de la carga refrigerante y las entalpías halladas en el diagrama de Mollier sobre la línea isoentrópica para el R134a²⁴, las cuales se pueden evidenciar en el Cuadro 9, presentado en el anterior capítulo, y haciendo uso de la Ecuación 14, se obtiene la potencia de compresión teórica necesaria para hacer efectivo el ciclo de refrigeración.

$$P_c = \dot{m}_R(h_2 - h_1)$$

$$P_c = 9.5298 \text{ kg/h} (429 \text{ kJ/kg} - 386.55 \text{ kJ/kg})$$

$$P_c = 433.13 \text{ kJ/h} = 121.3 \text{ W}$$

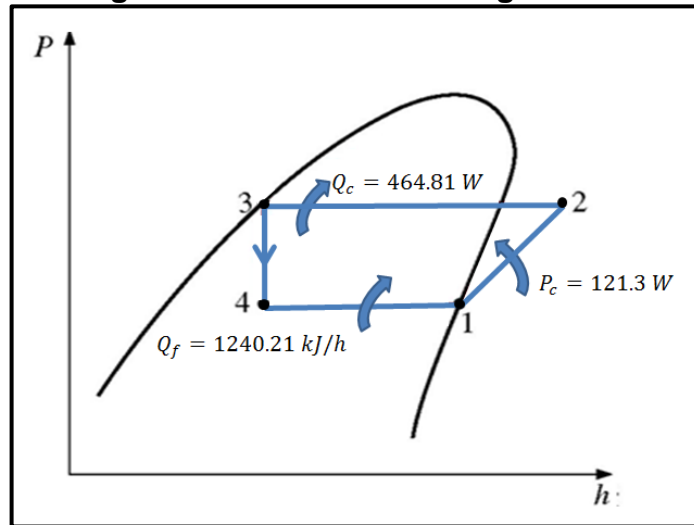
Indicando que para manejar dicho caudal es necesario utilizar un compresor con potencia mínima de 121.3 watts es decir 0.1622 HP, sin embargo considerando los compresores no poseen eficiencias del 100%, se recomienda considerar un compresor con potencia mayor.

No obstante teniendo en cuenta que las diferencias de entalpías formuladas en la Ecuación 14 para el proceso de compresión, son causadas por el cambio de presión en parte del sistema, es preciso aclarar que dicho cambio de presión es necesario para crear un delta de temperatura mayor entre la temperatura de condensación del refrigerante y la temperatura del aire para el condensador, dado que de esta manera se puede eliminar la misma cantidad de calor adquirido en el proceso de evaporación del refrigerante.

²⁴ Anexo B

A continuación, para mejorar la comprensión de los datos y valores anteriormente determinados, en la Figura 19, se evidencia el diseño básico, en donde se muestran las cargas caloríficas del evaporador y el condensador y el trabajo teórico del compresor propuesto para el sistema de refrigeración del equipo a construir.

Figura 19. Diagrama P-h diseño de refrigerante 134^a diseño .



Fuente: CENGEL, Yunus. Termodinámica. 2003, editada por autor.

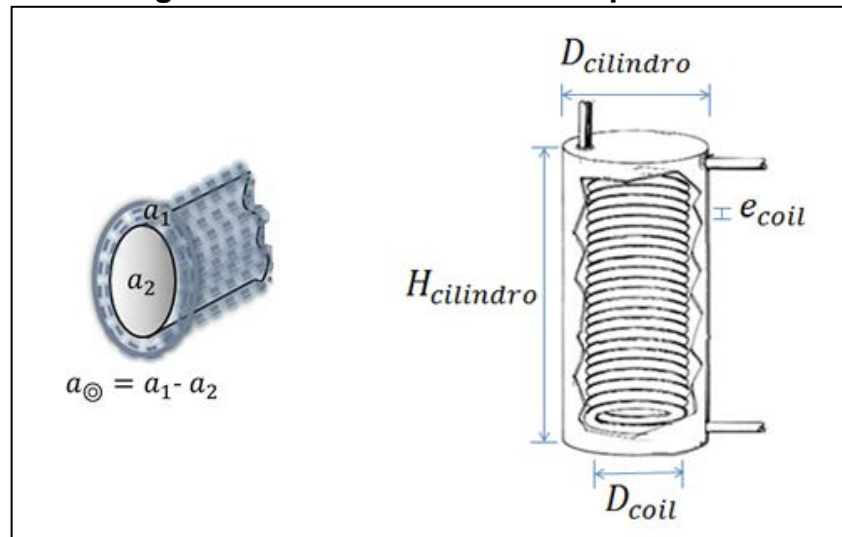
4.2.4 Dimensionamiento del sistema de refrigeración. A continuación con el objetivo de realizar el dimensionamiento del sistema refrigerante con base a las cantidad de agua que se espera condensar y las potencias caloríficas para el sistema de refrigeración, se hallan las áreas de transferencia de calor necesarias por el condensador y evaporador, además de la potencia de compresión real requerida para el funcionamiento del ciclo de refrigeración.

4.2.4.1 Evaporador. Para establecer el diseño y dimensionamiento del evaporador presente en el sistema de refrigeración, es necesario identificar el tipo de evaporador que realizará el proceso de sublimación inversa o cristalización del vapor de agua, así como las variables y parámetros de diseño que intervienen en dicho proceso.

En consecuencia, la selección del evaporador es una parte importante para el diseño del sistema de refrigeración. En este paso tanto el área superficial como la limpieza del evaporador juegan un papel fundamental para el proceso de cristalización y posterior descongelación del agua; así pues con base a lo anterior, el evaporador seleccionado consiste de un recipiente cilíndrico en el cual es sumergido un serpentín o tubo de cobre doblado en forma de espiral, por donde circula el refrigerante R134a. Posteriormente a fin de llevar a cabo el dimensionamiento del dispositivo, se requiere establecer los parámetros de diseño de éste, como lo son el diámetro exterior propuesto del tubo, el espesor de hielo

que se espera formar sobre éste y la cantidad de vapor de agua que se debe cristalizar por lote; a partir de las cuales se permite definir las variables de dimensionamiento tal y como se evidencia en la Figura 20.

Figura 20. Construcción del evaporador.



Fuente: The Manual for the Home and Farm Production of Alcohol Fuel, editada por autor.

En donde para la construcción de evaporador es necesario definir tanto el dimensionamiento externo como el interior; para el cual los parámetros de diseño: diámetro del cilindro ($D_{cilindro}$), altura del cilindro ($H_{cilindro}$), diámetro del espiral formado por el tubo de cobre (D_{coil}), espaciamiento o separaciones entre una vuelta de otra para formar el espiral (e_{coil}).

El intercambiador de serpentín sumergido es seleccionado como evaporador del sistema de refrigeración, debido a las características halladas para este tipo de intercambiadores de calor:

- Aplicación del enfriamiento de gases a alta presión.
- Buen rendimiento en el intercambio de calor.
- Bastante económico.
- Obtiene altas superficies de transferencia de calor en espacios reducidos.
- Simple proceso de descongelamiento o de descarchado, haciendo uso del mismo refrigerante y una válvula de tres vías ubicada entre la tubería que conecta al compresor con el condensador.

Por otra parte con relación a la ubicación del evaporador, como se recomendó en las alternativas de ajuste del equipo de secado actual en el capítulo diagnóstico, se propone construir el evaporador independiente al área de calentamiento o

cámara de secado, de tal manera que no interfiera con la eficiencia de calentamiento. En efecto, al aislar el evaporador, éste deberá alcanzar las temperaturas deseadas en la superficie del espiral con el propósito de condensar el agua extraída en forma de vapor a lo largo del mismo. Para ello, considerando la cantidad de agua que se debe condensar sobre éste, se propone usar un serpentín de tubería OD flexible de cobre, por sus siglas en inglés *outer diameter*, con diámetro de $\frac{1}{4}$ de pulgada lo cual permite fácil manejo al momento de enrollarlo.

Posteriormente mediante las siguientes variables de diseño, se especifican los parámetros del dimensionamiento del evaporador de la siguiente manera:

- Diámetro externo del *coil*: 6.35 mm*
- Espesor de hielo: 0.5 mm**
- Masa de hielo: 515.43 g***
- Densidad hielo: $0.917 \text{ (g/cm}^3\text{)}^{25}$
- Volumen hallado de hielo: 562.24 cm^3

En principio para definir el dimensionamiento del tubo o serpentín, es necesario determinar la longitud requerida para cristalizar el vapor de agua que es retirado del producto, Ecuación 17. Para ello considerando el diámetro externo especificado por el serpentín y el espesor de hielo formado debido al proceso de cristalización o sublimación inversa que ocurre sobre el evaporador, se determina el área transversal del hielo que debe formarse sobre éste. Paralelamente el volumen de hielo formado sobre el tubo al final del proceso de secado, se determina teniendo en cuenta la densidad del hielo y la masa de agua que se requiere extraer del producto por lote. Una vez teniendo el largo del dispositivo se procede a calcular el número de vueltas y los espaciamientos necesarios para formar la espiral dependiendo del diámetro definido para su construcción.

Ecuación 17. Longitud del serpentín.

$$V = A_{\text{HIELO}} * L$$

Adicionalmente a fin de establecer el dimensionamiento de la estructura exterior del evaporador, a partir de los datos obtenidos en las especificaciones del serpentín, se determina el diámetro y altura del cilindro que lo contendrá, tal y como se evidencia en la Figura 20.

* Tomando el espesor mínimo permitido en tubería de refrigeración.

** Espesor de hielo mínimo que se deberá formar en la superficie del evaporador.

*** Cantidad de agua final que se deberá desprender del producto por lote.

²⁵ MARTÍNEZ, Pedro. Termodinámica básica y aplicada. España: Escuela Universitaria Politécnica de Albacete, 1984. p 94

A continuación la Tabla 8 se especifican los datos tanto los teóricos como los reales obtenidos para el dimensionamiento del evaporador seleccionado.

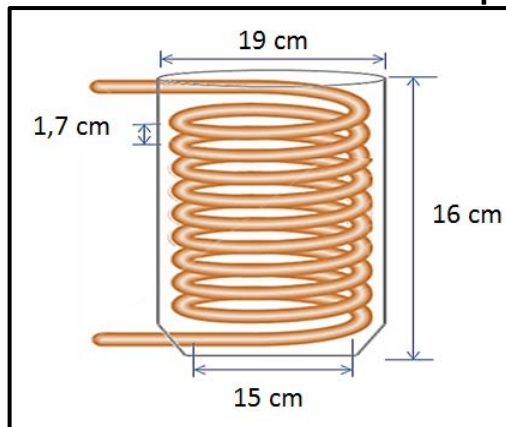
Tabla 8. Dimensionamiento del evaporador.

Parámetro	Valor teórico	Valor definido
Área transversal del hielo (a_1)	2.10 cm ²	-
Área transversal del tubo (a_2)	0.32 cm ²	-
Área corona de hielo ($a_2 - a_1$)	1.78 cm ²	1.8 cm ²
Longitud serpentín	315.36 cm	384 cm
Diámetro del serpentín	15 cm	15 cm
Circunferencia serpentín	47.12 cm	48 cm
Numero de vueltas	6,7	8

Por consiguiente para la construcción del evaporador definido anteriormente, se estableció formar la superficie de transferencia de calor o serpentín, a partir del uso de tubo de cobre flexible de ¼ de pulgada; con una longitud de 384 cm, éste deberá formar un espiral o *coil* de diámetro 15 cm, el cual para evitar el efecto de la corrosión producido por el contacto continuo con agua, se galvanizará en caliente.

Adicionalmente, el exterior del evaporador delimitado por el dimensionamiento del serpentín, se especificó como un recipiente cilíndrico de acero inoxidable con terminal cónica, el cual consta de un reservorio de agua destinado para el proceso de descongelación o descarche. Para determinar la altura se tomó en cuenta el número de vueltas formadas por el serpentín y el espesor máximo formado durante el proceso; de igual modo para establecer el diámetro del recipiente exterior, conforme al diámetro establecido para la formación del serpentín, se consideró además el espesor máximo a fin de hallar el diámetro óptimo que obligue al vapor de agua condensarse sobre la superficie. A continuación en la Figura 21 se puede ver el dimensionamiento del evaporador propuesto.

Figura 21. Dimensionamiento del evaporador.



4.2.4.2 Compresor. Como se evidenció anteriormente, la potencia mínima requerida por el compresor para comprimir el vapor del refrigerante en HP es de 0.1622. Sin embargo la potencia anteriormente determinada, representa un sistema con 100% de eficiencia, por ello considerando que la potencia real se calcula aumentando la potencia teórica de un 30 a 50%²⁶, se definió la potencia real del compresor como la potencia teórica más el 50 % de la misma como factor de seguridad.

Ecuación 18. Potencia real del compresor.

$$P = P_c + (P_c * 0.5)$$

Donde:

P_c : Potencia teórica del compresor, HP

$$P = 0.1622 \text{ HP} + (0.1622 \text{ HP} * 0.5) = 0,2433 \text{ HP}$$

De manera que teniendo en cuenta todos los factores, un compresor de ½ HP sería la opción correcta para el sistema de refrigeración del secador al vacío.

4.2.4.3 Condensador. Dentro del sistema de refrigeración establecido, el condensador desempeña una función muy importante, ya que por medio de este dispositivo se disipa el calor absorbido por el refrigerante durante el proceso de condensación del vapor de agua en el evaporador. Por ende acorde con lo anterior, a fin de obtener el intercambio de calor requerido del aire al fluido refrigerante para su condensación, es necesario pasar éste por un proceso de compresión en el cual proporcionará al vapor caliente extraído del evaporador, un aumento de presión y consecuentemente de temperatura definido por un proceso isoentrópico.

A pesar de que el condensador funciona a presiones y temperaturas más elevadas a las del evaporador, y además de utilizar un medio para realizar la transferencia se calor diferente, la capacidad del condensador se establece de forma similar a la del evaporador, puesto que en la medida que el refrigerante recibe calor por parte del vapor de agua, el refrigerante debe retomar su temperatura retirando al exterior el calor adquirido.

Por consiguiente teniendo en cuenta la masa del refrigerante hallada anteriormente, la entalpía de saturación del líquido y la entalpía relacionada con el proceso isoentrópico como se describe entre los puntos 2 y 3 definidas en la carta del refrigerante²⁷, se determina mediante la Ecuación 19, la capacidad del condensador.

²⁶DOSSAT, Roy y CÁRDENAS Armando. Principios de refrigeración. México: Compañía Editorial Continental, 1980. p 137

²⁷ Cuadro 9

Ecuación 19. Capacidad del condensador.

$$Q_c = \dot{m}_R * (h_2 - h_3)$$

Donde

Q_c : Capacidad del condensador, kJ/h

h_2 : Entalpía del vapor sobrecalentado del refrigerante. (kJ/kg)

h_3 : Entalpía del líquido saturado del refrigerante. (kJ/kg)

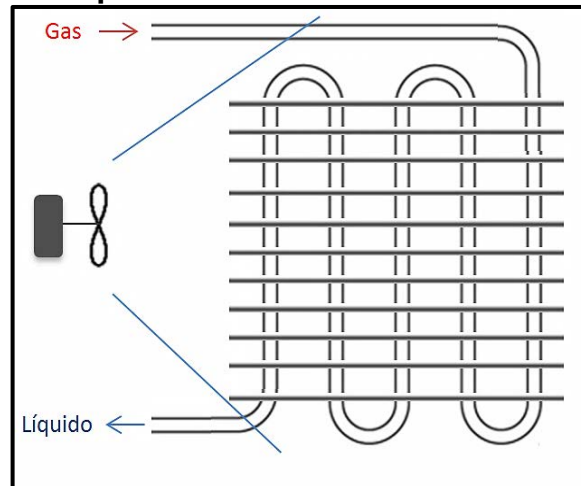
$$Q_c = 9.53 \text{ kg/h} * \frac{(432 - 256.41) \text{ kJ}}{\text{kg}}$$

$$Q_c = 1673.33 \text{ kJ/h} = 464.81 \text{ W}$$

Lo que significa que es necesario retirar 464.81 W o 1673.33 kJ de calor del refrigerante por cada hora en funcionamiento del equipo, a fin de que el refrigerante se recupere y retorne a su estado original por ende a la temperatura establecida para la posterior condensación del agua.

Una vez definida la capacidad del condensador del sistema refrigerante, se procede a establecer el área necesaria que debe cumplir este dispositivo para condensar el gas refrigerante. Para ello teniendo en cuenta el espacio dispuesto para ubicar la unidad, se optó por un condensador enfriado con aire, sobre el cual se colocar un ventilador con cierre que obliga el paso del aire a temperatura ambiente a través del condensador tal y como se muestra en la Figura 22.

Figura 22. Esquema de construcción del condensador.



Para el dimensionamiento básico del condensador basándose en el diseño de un intercambiador de calor enfriado con aire a temperatura ambiente, se tienen los siguientes componentes:

- Ventilador: Este dispositivo busca crear una corriente de aire, la cual se conducirá convenientemente hacia el condensador para mejorar la transferencia de calor entre el refrigerante y el aire, aumentando la capacidad de intercambio de calor por el movimiento de aire forzado por el ventilador sobre el condensador. De manera que para conocer flujo másico y el caudal que debe manejar la unidad, se tiene en cuenta la carga del condensador, la temperatura del aire ambiente y la temperatura superficial del tubo de cobre. A continuación mediante el desarrollo de la Ecuación 20, se obtiene el flujo másico de aire requiere mover el ventilador.

Ecuación 20. Flujo másico de aire del ventilador.

$$\dot{m}_{aire_c} = \frac{Q_c}{Cp * (T_2 - T_1)}$$

Donde

\dot{m}_{aire} : Masa del aire impulsado por el ventilador, kg/h

T_1 : Temperatura del aire ambiente, K

T_2 : Temperatura superficial del tubo refrigerante, K

Cp : Calor específico del aire a temperatura ambiente, kJ/kg K²⁸

$$\dot{m}_{aire} = \frac{1673.33 \text{ kJ/h}}{(30^\circ\text{C} - 15^\circ\text{C}) * 1.0042 \text{ kJ/kg K}} = 111.09 \text{ kg/h}$$

Con respecto al caudal teórico que debe manejar el ventilador, partiendo de la densidad del aire a temperatura ambiente (1.2kg/ m³), se tiene que son necesarios 92,58 m³/ h. De manera que teniendo en cuenta lo anterior se sugiere usar un ventilador que maneje un caudal de 60 CFM o 101,94 m³/ h.

- Intercambiador de calor: Definido como el dispositivo sobre el cual se realiza el proceso de condensación para el refrigerante R143a, el condensador propuesto para el sistema de refrigeración del secador al vacío, se estableció como un intercambiador de calor tipo radiador, en donde por medio de placas ubicadas de forma paralela a la dirección del aire es enfriado el refrigerante, tal como se muestra en la Figura 23. No obstante partiendo de las especificaciones del ventilador anteriormente descrito, mediante un análisis de transferencia de calor por convección externa forzada se establece el dimensionamiento del dispositivo.

De manera que mediante un desarrollo simultáneo para determinar el coeficiente de película y el área superficial de transferencia de calor del condensador, se plantea unas dimensiones de las placas tentativas y el

²⁸ CENGEL. Yunus. Transferencia de masa y calor. Un enfoque práctico. México: McGraw-Hill Companies, 2007. p 182

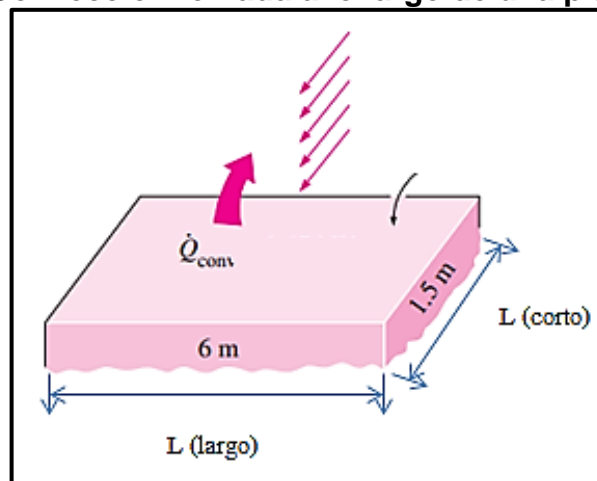
número de placas con el que deberá contar para definir la estructura del radiador, definiendo. A continuación como se evidencia en la Cuadro 10 se especifican los datos de las propiedades y factores de diseño, leídos en tablas, que se tuvieron en cuenta para el diseño del intercambiador, evaluadas a una temperatura promedio para la cual se tuvo en cuenta que la temperatura superficial de las placas del radiador era igual a 30 °C.

Cuadro 10. Propiedades del aire a la presión de 1 atm²⁹

Propiedad	Valor
T promedio	27.5 °C*
ν	2.15 E-05 m ² /s**
K	0.025 W/m K
Pr	0.7289

Considerando que el flujo de aire movido por el ventilador pasa de forma paralela a la dirección de las placas del radiador y la dirección del aire, impulsado por el ventilador roza la placa en sentido del lado corto tal como se explica en la Figura 23. Se determina el coeficiente de película, según las dimensiones propuestas en un principio para las placas del radiador

Figura 23. Convección forzada a lo largo de una placa plana.



Fuente: CENGEL, Transferencia de masa y calor, editada por autor.

²⁹ CENGEL Y.U. Transferencia de calor y masa: un enfoque práctico. México: McGraw Hill interamericana 2007. Tabla A-15. p 860

* Promedio entre la temperatura del fluido exterior y la temperatura de la pared de las placas. $(T_s + T_\infty)/2$

** viscosidad cinemática del aire ajustada a la presión atmosférica de Bogotá.

Sin embargo para calcular este coeficiente es necesario en principio establecer el régimen del aire que pasa por las placas del radiador, acordado mediante el número de Reynolds como se indica en la Ecuación 22, el cual tomando un número Reynolds crítico (Re_c) de 5×10^5 se indica si el comportamiento del fluido es régimen laminar o turbulento.

Ecuación 21. Número de Reynolds.²⁴

$$Re = \frac{VL_c}{\nu}$$

Dónde:

V: velocidad del viento, m/s*

L_c : longitud característica (lado corto), m

ν : Viscosidad cinemática del fluido, m^2/s

Seguidamente se establece que el número de Reynolds hallado es menor al número crítico de Reynolds, Por tanto, se tiene flujo laminar sobre toda la lámina y el número de Nusselt se determina a partir de las relaciones del flujo laminar para una placa plana como mediante el desarrollo de la Ecuación 23.

Ecuación 22. Coeficiente de Nuselt.³⁰

$$Nu = 0.664 * Re^{1/2} * Pr^{1/3}$$

A continuación se procede a determinar el coeficiente de convección a partir de la Ecuación 24. Sin embargo cabe aclarar que se tuvo en cuenta para el diseño del condensador tipo radiador condiciones estacionarias de operación, efecto de la radiación despreciable y comportamiento del aire como gas ideal.

Ecuación 23. Coeficiente de película sobre las placas del radiador.

$$h = \frac{Nu k}{L_c}$$

Finalmente teniendo el coeficiente de convección se procede a determinar el área de intercambio de calor requerida sobre condensador, mediante el uso de la Ecuación 25, conociendo además que el área se define de manera análoga como $L_1 \times L_2$ por el número de placas definido para componer la estructura del radiador.

* Definida por el ventilador seleccionado, 23 m/s

³⁰ CENGEL. Yunus. Transferencia de masa y calor. Un enfoque práctico. México:McGraw-Hill Companies, 2007. p. 405

Ecuación 24. Área de transferencia de calor del condensador.

$$A_c = \frac{Q_c}{(T_s - T_\infty) h}$$

Teniendo en cuenta el desarrollo de las ecuaciones y criterios anteriormente descritos, se siguió un procedimiento iterativo asumiendo inicialmente una longitud de 15 cm de largo y 20 cm de ancho, como dimensiones tentativas para el dimensionamiento de las placas que componen el condensador; en consecuencia se tuvo en cuenta como criterio de convergencia el calor del condensador, el cual debía ser igual la carga calorífica del refrigerante definido en la Ecuación 20 y el calor adquirido por el ambiente para enfriar el refrigerante hasta llevarlo al estado líquido en el intercambiador de calor (Ecuación 25). Se establecieron los parámetros especificados en la Tabla 9.

Tabla 9. Parámetros de diseño del condensador.

Factor	Valor
L_c	0.15 m
L_2	0.41 m
Nº placas	13
Re_L	1.49E+05
Nu	230.40
h	40.15 W/m ² K
A	0.74 m ²

Para el dimensionamiento del radiador propuesto como dispositivo de condensación del refrigerante, enfriado por aire a temperatura ambiente se definió como indica en la Tabla 9, un intercambiador de calor tipo radiador el cual consta de 13 placas cada una de 15 cm por 41 cm a fin de enfriar el fluido refrigerante que pasa por el serpentín.

Sin embargo teniendo en cuenta los parámetros de diseño y los requerimientos de estructura del diseño sobre la unidad de condensación del refrigerante, se optó por la unidad propuesta por la empresa de Tecumesh, la cual teniendo en cuenta las capacidades calculadas tanto para el compresor como para el condensador, y teniendo en cuenta el diferencial establecido para la válvula de expansión, se seleccionó la unidad o grupo de condensación TECUMSEH CAJ4511YHR³¹, debido a que cumple con las especificaciones mínimas de diseño y capacidades tanto para el compresor como para el condensador.

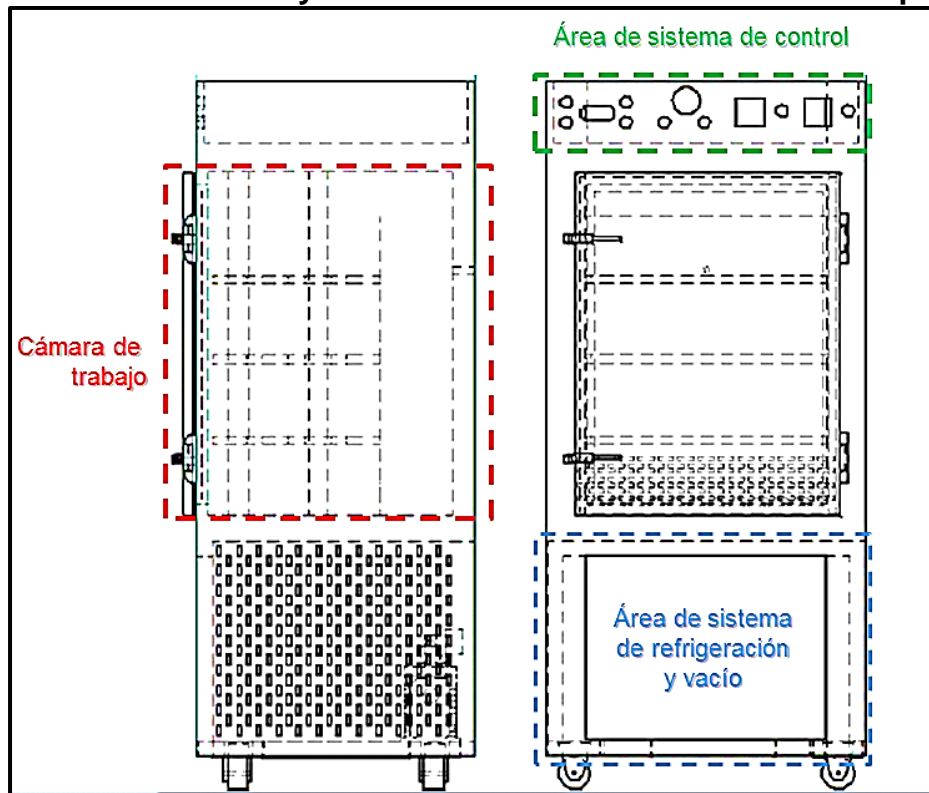
³¹ Anexo E

4.3 DISEÑO DE LA CÁMARA DE SECADO

La estructura del secador al vacío que se propondrá para realizar el proceso de secado del endulzante granulado en la empresa, se basa en el diseño de un liofilizador para establecer la distribución de equipos, debido a que por su similitud en el principio de secado de productos sensibles, estos equipos son utilizados en procesos de deshidratación de productos termolábiles a fin de disminuir su contenido de humedad hasta menos del 10% usando el vacío como medio de reducción de la temperatura de operación. Por ende tomando como referencia el diseño detallado de un liofilizador de plata piloto³² para deshidratación de productos agroindustriales, se planea la distribución de los subsistemas del equipo de secado según como se evidencia en la Figura 24.

A continuación se establecen los componentes de un mueble en el que se encuentra la cámara de trabajo elaborada en acero inoxidable y en donde se alojarán las bandejas de secado, además de los equipos de cada uno de los subsistemas (refrigeración y vacío) que componen el equipo.

Figura 24. Vista frontal y lateral de la estructura del liofilizador piloto.



Autores: MARTINEZ, Rodolfo y PRADA, Oscar⁶, editada por autor.

³²MARTINEZ, Rodolfo y PRADA, Oscar. Diseño y construcción de un liofilizador piloto para el estudio de procesos de deshidratación y conservación de productos agroindustriales mediante secado al vacío. Trabajo de grado ingeniero mecánico. Bucaramanga. Universidad industrial de Santander. Facultad de ingenierías Físico- Mecánicas, 2008. 175 p

La cámara de trabajo es el lugar donde se ejecuta el proceso de deshidratación del producto granulado, sin embargo para cumplir su función es necesario contar con la ayuda de subsistemas que hagan adecuadas las condiciones de trabajo sobre éste, tal como se evidencia en la Figura 24. Por ello en esta se encuentran ubicados el sistema de bandejas y el sistema de calentamiento, sistema refrigeración, sistema de vacío y el sistema de control.

Esta cámara, al igual que el material base de las bandejas y portabandejas, la construcción interna de la cámara de trabajo se precisó utilizar acero inoxidable 304 brillado al espejo de calibre 18, dado que aparte de ser un material resistente al vacío, es aprobado para el manejo de alimentos y es económico en relación a los otros materiales que también son aptos. Las dimensiones de la cámara de propuesta se establecieron para una configuración tipo rectangular las siguientes medidas:

- Alto: 68 cm
- Ancho: 68 cm
- Profundo: 75 cm

4.4 AISLAMIENTO DE LA CÁMARA

Con el fin de mantener la temperatura interna de la cámara estable para realizar el proceso de evaporación durante la primera etapa del secado, y evitar altos consumos de refrigerante, es necesario aislar la cámara de trabajo para disminuir así las pérdidas de calor se puedan generar hacia el ambiente; para ello se debe seleccionar un aislante que proporcione una alta resistencia al flujo de calor del exterior al interior de la cámara.

Con base a lo anterior, se sugiere aislar térmicamente la cámara de secado mediante el uso de un aislante, para ello se considera como opción la fibra de vidrio, debido a su basta utilización en equipos de calor y demás aplicaciones industriales. En la Figura 25 se presenta los diferentes coeficientes de conductividad térmica del aislante sugerido a diferentes densidades.

Figura 25. Conductividad térmica del aislante seleccionado.³³

MATERIAL	DENSIDAD Kg/ m3	CONDUCTIVIDAD W/mK
Fibra de vidrio	13 - 20	0.048
	20 - 50	0.037
	50 - 100	0.036

³³ BARRERA M. Cámaras Frigoríficas. Barcelona: Editorial Ceac 1996. p 120-126.

Por consiguiente teniendo como criterio de selección la conductividad térmica de la fibra de vidrio, seleccionando el aislante con menor conductividad térmica y por ende mayor densidad, a fin de recubrir el área exterior total de la cámara.

4.5 SISTEMA DE VACÍO

En el desarrollo del proceso de secado al vacío del endulzante granulado, una vez es ingresado el material a secar, se requiere alcanzar una presión absoluta dentro de la cámara de trabajo igual a 56 mm Hg (0,074 bar), presión a la cual se reduce la temperatura de evaporación del agua hasta los 40°C. De igual manera con el fin de crear la presión de vacío necesaria para realizar el proceso de evaporación, el sistema de vacío debe retirar al exterior, los vapores y gases no condensables producidos durante el proceso de evaporación del agua.

La selección de una bomba para el sistema de vacío es un paso fundamental, ya que por medio de este sistema, con la ayuda de la bomba de vacío se encargan de realizar el proceso de extracción continua del vapor de la cámara, conduciéndola hacia el exterior pasando por el sistema de condensación de agua.

A continuación se explicarán los factores importantes que influyeron en la selección de la bomba de vacío para el sistema de secado de la empresa.

4.5.1 Volumen de la cámara. Para determinar la bomba que compondrá el sistema de vacío del equipo de secado, con base al desarrollo de la Ecuación 26, se debe tener en cuenta el espacio y la cantidad de aire que éste debe evacuar, puesto que su objetivo primordial es llegar en un determinado volumen a una concentración pequeña de moléculas. Para esto teniendo en cuenta las dimensiones especificadas de la cámara de trabajo, se halla el volumen total donde se deberá hacer vacío

Ecuación 25. Volumen de la cámara.

$$Vol_c = a * b * c$$

Donde:

a: Profundidad de la cámara de secado, m

b: Ancho de la cámara de secado, m

c: Altura de la cámara de secado, m

$$Vol_c = 0,68cm * 0,68cm * 0,75cm$$

$$Vol_c = 0,3468 m^3 = 12,247ft^3$$

Lo cual indica que la bomba seleccionada debe retirar el aire interno de la cámara de trabajo igual a 12,247 ft³.

4.5.2 Tiempo para obtener el vacío. El tiempo necesario para alcanzar la presión interna requerida en la cámara de trabajo, es un factor fundamental debido a que el tiempo propuesto de secado para deshidratar el endulzante granulado, es comparablemente bajo con respecto a tiempos estimados para los diferentes tipos de secadores que funcionan en vacío. Acorde con lo anterior, se establece una influencia directa en el proceso de secado, por ello pretende escoger en principio el dispositivo con menor tiempo de alcance del vacío máximo por la bomba.

El tiempo estimado para llegar a la presión máxima establecida por la bomba de vacío en términos de volumen y diferenciales de presión, se calcula mediante la Ecuación 27, el tiempo de alcance de vacío máximo.

Ecuación 26. Tiempo de alcance de vacío.³⁴

$$t = 2,3 * \frac{V}{Sr} * \frac{P_1}{P}$$

Dónde:

V.: volumen del espacio a vaciar, L

Sr: velocidad inicial de aspiración de la bomba, L/min

P₁: Presión inicial (atmosférica), Torr

T: Tiempo, min

4.5.3 Selección de la bomba de vacío. Teniendo en cuenta los factores y condiciones anteriormente especificados, se realizó la selección de las bombas de vacío según referencias cotizadas en varias empresas especializadas con estos tipos de dispositivos.

A continuación en la Cuadro 11, se muestran las especificaciones y los tiempos calculado para alcanzar la presión de vacío máxima para las diferentes bombas relacionadas en este sistema.

Cuadro 11. Especificaciones de las bombas de vacío.³⁵

Referencia	Voltaje	Máximo vacío Torr	Capacidad L/min	Tiempo Min	Precio \$
DVPDB.16D	220V	1.5	339,8	6,04	9.999.000
DVPLC20	220 V	1.5	339.8	6.04	3.599.999
CP 07532-40	115 VAC	2.5	86	21.80	1.720.626
LR-27060-1.5	200-345	1.5	533.3	3.85	3.242.200
VD-020	200-345	37.5	400	2.34	3.439.400

³⁴ EGEA, gil. Obtención y aplicaciones industriales de vacío. Barcelona: Ed Guatavo Gil. 1973. p 167

³⁵ Anexo B

Según el Cuadro 11, la bomba de vacío que más se ajusta a las necesidades de equipo teniendo como criterio de selección el ultimo vacío, el caudal manejado, el tiempo requerido y el precio; es la que corresponde a la referencia VD-020, la cual corresponde a la empresa INSUTEC VACÍO Y PRESIÓN; debido a que se encontró que se demora un tiempo de 2.34 min en alcanzar el vacío, valor que se ajusta mejor a la necesidad de alcanzar vacío en un menor tiempo, teniendo en cuenta que el tiempo de secado es de 2 horas.

4.6 FUNCIONAMIENTO Y MANEJO BÁSICO DEL EQUIPO DE SECADO PROPUESTO.

A continuación se realizará una breve y básica descripción del proceso, según la tecnología propuesta para el secado del producto granulado descrita por un secador por lotes con bandejas en operación de vacío.

- Se precalienta el secador a una temperatura igual al punto de ebullición del agua establecida para la condición de vacío que alcanza la bomba propuesta (40°C), el secador deberá permanecer cerrado a fin de garantizar un ambiente propicio para que se lleven a cabo las etapas de calentamiento y secado del producto.
- Colocar el endulzante granulado anteriormente preparado con las características de humedad establecidas sobre las bandejas del secador, a continuación se depositan las bandejas sobre los portabandejas del secador y se cierra la puerta del secador.
- Se encienden simultáneamente el sistema de refrigeración y de vacío, considerando que éste debe retirar el aire contenido al interior de la cámara de vacío y que el refrigerante debe alcanzar la temperatura establecida sobre el evaporador para cristalizar el vapor de agua que le emerge cámara de trabajo.
- Se ajustan las temperaturas según el programa establecido 40 °C para el sistema de calentamiento y -10 °C para el sistema de refrigeración.
- Se deja correr el tiempo de secado de dos horas manteniendo el control sobre el dispositivo, mediante las sondas de temperaturas, a fin de que no sobrepase la temperatura establecida dentro de la cámara.
- Finalmente una vez transcurre el tiempo de dos horas establecido, se procede a romper el vacío mediante la apertura de una válvula de escape, posteriormente se apaga la bomba de vacío. De modo paralelo se apaga el

sistema de calentamiento, y una vez se pueda abrir la puerta del dispositivo se saca el producto ya deshidratado.

- Como parte final para el procesos de descarche o descongelamiento de los cristales de agua formados sobre el serpentín del evaporador, se procede a accionar la opción sobre el controlador para que por medio de una válvula de 3 vías, se redireccione el fluido refrigerante y no pase por el compresor ni el condensador.

5. EVALUACIÓN DE COSTOS RELACIONADOS CON LA CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO DE SECADO PROPUESTO

Con el fin de mejorar el proceso productivo para la obtención del endulzante granulado en la empresa Punto Natural Zamora Prieto S.A.S, se propuso una alternativa de diseño para la construcción de un nuevo secador a fin de aumentarla eficiencia del proceso de secado mejorando los tiempos de secado y las condiciones de humedad del producto final. Para ello con base al diseño desarrollado y explicado en el capítulo anterior, para la construcción del equipo se debe disponer de una cámara de trabajo estructuralmente resistente capaz de soportar las bajas presiones, un aislante térmico que recubra la cámara, unas resistencias eléctricas de calentamiento, sistema de refrigeración compuesto por un evaporador y condensador de área especificada para transferencia de calor y demás componentes establecidos en el diseño.

En el presente capítulo expone de manera detallada el costo presupuestado para la adquisición de los distintos componentes que se requieren obtener para llevar cabo la construcción y puesta en marcha del equipo. La construcción del equipo de secado propuesto, para ello el costo de la construcción del equipo de secado propuesto depende de las características y requerimientos de los componentes que lo conforman, los cuales fueron evaluados y especificados en el capítulo anterior.

5.1 COSTOS DE EQUIPOS

A continuación se evidencian los costos avalados por la empresa con el objetivo de realizar la implementación del nuevo equipo que mejorará el proceso de secado del endulzante granulado en la misma, teniendo en cuenta las cotizaciones realizadas a diferentes empresas. Para ello se secciono la cotización de acuerdo a los componentes definidos para la construcción del secador al vacío de bandejas y subsistemas implicados, de manera que fuera más organizada y dirigida la información obtenida por las cotizaciones realizadas.

5.1.1 Cámara de Trabajo. Para la cotización de la cámara se tuvo en cuenta con base a lo acordado con la empresa, la cámara se realizará en los establecimientos de la empresa TECNOOPERFORACIONES S.A.S, por lo que la cotización solo se establecieron en los componentes e implementos básicos para realizar el armado de la cámara de trabajo, las cotizaciones realizadas para los implementos de establecidos en la Tabla 10, se realizaron por vía telefónica y presenciales.

Tabla 10. Tabla de costos de la construcción de la cámara de trabajo.³⁶

MATERIAL	CANTIDAD	EMPRESA	VALOR UNIDAD	VALOR TOTAL
Lamina Acero Inox 304 1/4" (68cmx68cm)	1	ACERO INOXIDABLE IMPORINOX S.A.S.	\$ 160,600	\$ 160,600
Lamina Acero Inox 304 1/4" (68cmx75cm)	4	ACERO INOXIDABLE IMPORINOX S.A.S.	\$ 180,000	\$ 720,000
LAMINA ACRILICO 3/4" (68cmx68cm)	1	ACRILAMINA LTDA	\$ 550,000	\$ 550,000
Soldadura Lineal por metro	16		\$ 100,000	\$ 1.600,000
TOTAL CÁMARA				\$ 3.180.600

Lo que indica que el costo para poder llevar a cabo la construcción de la cámara de trabajo, independiente de la mano de obra es de \$ 3.180.600.

5.1.2 Sistema de refrigeración. Para el sistema de refrigeración definido en el diseño, se obtuvo que el sistema se en construcción se dividiera en la unidad condensadora y el evaporador, conforme la cotización propuesta por la empresa Tecumseh. A continuación en la Tabla 11 se expone la cotización realizada.

Tabla 11. Tabla de costos para el sistema de refrigeración.³⁷

COMPONENTE	ESPECIFICACIONES	EMPRESA	VALOR TOTAL
COMPRESOR	1 HP 214QT-H	TECUMSEH	\$1,740,000
CONDENSADOR	4200 BTU		
VALVULA DE EXTRANGULAMIENTO			
EVAPORADOR	Base cilíndrica acero inox ¼ " de 19cm x 16 cm	ACERO INOXIDABLE IMPORINOX S.A.S.	\$ 100,000
	Serpentín cobre flexible ¼" x 15.34 m	AIRE CONFORT S.A.S	\$ 70,000
TOTAL SISTEMA REFRIGERACIÓN			\$ 1,910,000

³⁶ Anexo C

³⁷ Anexo E

5.1.3 Sistema de vacío. Según las cotizaciones realizadas a diferentes empresas³⁸ y con base al criterio de selección del precio en la Tabla 12, se evidencia la alternativa de bomba de vacío escogida para el sistema de vacío del equipo propuesto.

Tabla 12. Tabla costos sistema de vacío.

COMPONENTE	ESPECIFICACIONES	EMPRESA	VALOR TOTAL
BOMBA DE VACÍO	Anillo liquido (19 cfm)	INSUTEC VACÍO Y PRESIÓN	
TOTAL SISTEMA DE VACÍO			\$ 3,242,200.00

5.1.4 Sistema de calentamiento. A continuación en la Tabla 13 se evidencian los costos estimados para la implementación de este sistema al secador, sin embargo se debe tener en cuenta que la alternativa seleccionada puede aumentar el costo si se demanda a condicionar dichas resistencia para realizar el empalme con las placas portabandejas.

Tabla 13. Tabla costos sistema de calentamiento.

COMPONENTE	CANTIDAD	EMPRESA	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL
RESISTENCIAS PLANAS (50X13)	5	RESISTENCIAS ELECTRO SALGADO	\$ 27,000.00	\$ 635,000
TOTAL SISTEMA DE CALENTAMIENTO				\$ 635,000

Con base a la información anteriormente presentada para las cotizaciones de los diferentes equipos que involucrados en la construcción del secador al vacío, a continuación en la Tabla 14 se presentan los datos conmutados y que resumen el costo total de los equipos solicitados para la construcción del equipo.

Tabla 14. Tabla costos totales.

ITEM	VALOR TOTAL
CÁMARA DE SECADO	\$ 3.180.600
SISTEMA DE REFRIGERACIÓN	\$ 1,910,000
SITEMA DE CALENTAMIENTO	\$ 3.242.200
SISTEMA DE VACÍO	\$ 635,000
COSTO TOTAL SECADOR AL VACÍO	\$ 8,967,800

³⁸ Anexo G

5.2 COSTOS DE MONTAJE

Adicionalmente al costo de adquisición de equipos, los costos de la mano de obra se establecerán en la Tabla 15.

Tabla 15. Costos mano de obra.

ITEM	\$/HORA	No HORAS	Total
PERSONAS	\$ 30,000	36	\$ 1,080,000
MAQUINAS	\$ 25,000	5	\$ 125,000
TOTAL MANO DE OBRA			\$ 1,205,000

5.3 COSTO TOTAL

Finalmente para establecer el costo de implementa con de esta tecnología, como se evidencia en la Tabla 16 teniendo en cuenta tanto la mano de obra como los equipos a adquirir para su construcción.

Tabla 16. Costo total de implementación del equipo.

ITEM	COSTO
EQUIPOS	\$ 8,967,800
MANO DE OBRA	\$ 1,205,000
TOTAL	\$ 10,172,800

Finalmente, con base al desarrollo del capítulo y teniendo en cuenta la inversión inicial por parte de la empresa, al adquirir un equipo de secado subdimensionado a fin de realizar el proceso de deshidratación del endulzante granulado, se evidenció que a pesar del bajo costo por adquisición de esta tecnología respecto a la propuesta, de \$ 8.000.000 en un principio y a pesar que la capacidad teórica del equipo actual es mayor a la establecida en el presente proyecto; el equipo actual no logro cumplir con éxito el requerimiento para el cual fue diseñado, debido a fallas mecánicas y requerimientos técnicos. Lo que ocasiono pérdidas monetarias, retrasos en la producción del producto relacionado. Adicionalmente debido a la ineficacia e ineficiencia del proceso de secado, se generó un desaprovechamiento del espacio, por lo que se realizó un estudio para el diseño de un nuevo secador que cumpliera con los estándares del proceso, aunque con capacidad menor, permitiendo así retomar la producción del endulzante granulado que podrá generar utilidades a la empresa recuperando la inversión total.

6. CONCLUSIONES

- Mediante una descripción detallada del proceso de secado del endulzante granulado y a partir de un análisis de causas del proceso, se identificó que la capacidad real del secador instalado era de 1.5 kg, diferente a los 24 kg esperados de producto total seco definidos por especificación del secador, lo que corresponde a un error en su diseño del 93.75 %. Adicionalmente, se determinó que el secador dentro del ciclo de cristalización no presentaba la reducción de temperatura necesaria (-10°C) para realizar la cristalización del vapor de agua sobre las paredes del evaporador, debido a los sistemas de calentamiento y refrigeración de la cámara de secado no se encontraban aislados, por último, se evidenciaba inestabilidad en la presión interna de la cámara lo cual no permitía un sello hermético de la cámara, generando así variaciones en el punto de ebullición del agua. Por lo tanto, se requirió el diseño de un nuevo un nuevo secador al vacío.
- Para atender la demanda de producto seco de la empresa, se diseñó un secador al vacío tipo compacto con una capacidad de 4.74 kg/h de producto seco, el cual será calentado por medio de 5 resistencias eléctricas de 114 v, que cubrirán un área de transferencia de calor de 1414 cm^2 . Adicionalmente, se contempló para la extracción de los vapores generados en el proceso de vaporización, una bomba de vacío con caudal de 533 L/min, con el objeto de mantener la presión interna de la cámara en 56 mmHg y asegurar la temperatura de vaporización del agua en 40°C . Por último, para el sistema de refrigeración se requiere un evaporador tipo serpentín sumergido, con capacidad para retirar calor de 1240.21 kJ/h y área de transferencia de calor de 1532 cm^2 , con el fin de asegurar la cristalización del vapor extraído de la cámara y prevenir paso de humedad a la bomba de vacío y recuperar el agua usada en el proceso cerrado.
- El costo resultante del diseño propuesto para deshidratar el producto granulado en la empresa es de \$ 8.967.800, este equipo está diseñado para deshidratar 10 kg de producto húmedo a unas condiciones de humedad inicial de 8 % y obtener un producto deshidratado con una humedad del 3% en un tiempo de 2 horas, con un costo de montaje de \$ 1.205.000, lo que corresponde a un costo total de \$ 10.172.800 para poder ser implementado en la empresa.

7. RECOMENDACIONES

- Se recomienda evaluar y rediseñar el proceso de granulación del endulzante granulado, a fin de obtener la proporción entre el azúcar y la Stevia homogénea dentro del producto.
- Se recomienda realizar el diseño de ingeniería detallado para realizar el montaje del secador propuesto para la mejora del sistema de secado del producto granulado.
- Se recomienda hacer un estudio para evaluar el espesor de aislante que es necesario para evitar pérdidas de calor dentro del equipo.
- Realizar la instrumentación y control del equipo, estableciendo lazos de control para evitar que el producto los excesos de temperatura tanto en el sistema de calentamiento como en el sistema de refrigeración.
- Determinar tiempos de secado para secado de productos con mayor contenido de humedad.
- Realizar el diseño de los subsistemas del secador teniendo en cuenta el tamaño y capacidad del secador a la cual estaba pensado actual de la empresa.
- Evaluar el secado del endulzante granulado mediante otros tipos de secados para realizar una comparación.
- Se recomienda desarrollar un manual de operación detallado para el funcionamiento del secador a partir del sistema de control.

BIBLIOGRAFÍA

- BARRERA M. Cámaras Frigoríficas. Barcelona: Editorial Ceac 1996. p 120-126.
- BIRD, R. B.; STEWARD, W. E. y LIGHTFOOT, E. N. Fenómenos de Transporte. Barcelona Reverté, 1993.
- CENGEL, Yunus A. Boles, et al. Termodinámica. Mexico: Mc Graw Hill, 2003.
- CENGEL. Yunus. Transferencia de masa y calor. Un enfoque práctico. México:McGraw-Hill Companies, 2007.
- COOK, Edward M y DUMONT, Harman D. Process drying practice. New York: McGraw-Hill Companies, 1991. p. 55 – 59.
- DOSSAT, Roy y CÁRDENAS Armando. Principios de refrigeración. México: Compañía Editorial Continental, 1980.
- DROUZAS, A. E y SCHUBERT, H. Microwave application in vacuum drying of fruits. Journal of Food Engineering, 1996, vol. 28, No 2, p. 203-209.
- EGEA, gil. Obtencion y aplicaciones industriales de vacio. Barcelona: ed Guatavo Gil. 1973.
- GEANKOPLIS, Christie. procesos de transporte y operaciones unitarias. Mexico: Compañía editorial Continental S.A. 1954.
- INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Documentación. Presentación de tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación. NTC 1486. Sexta actualización. Bogotá: ICONTEC, 2008.
- INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Especifica los elementos y su orden en las referencias bibliográficas de las fuentes consultadas para la elaboración de documentos. Norma Técnica Colombiana NTC 5613. Última version. Bogotá: ICONTEC, 2008.
- INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Referencias documentales para fuentes de información electrónicas. Norma Técnica Colombiana NTC 4490. Última versión. Bogotá: ICONTEC, 1998.
- JERIA, Denisse. M y POZO, Alberto. Estudio del secado conectivo de hojas de Stevia rebaudianay factibilidad técnico-económica de una planta elaboradora de edulcorante a base de Stevia. Trabajo de grado Ingeniero de alimentos. Santiago: Universidad de Chile. 2011. p 122.
- KUDRA, Tadeusz y MUJUMDAR, Arun S. Advanced drying technologies. Boca Ratón: CRC Press, 2009.

MARTÍNEZ, Pedro. Termodinámica básica y aplicada. España: Escuela Universitaria Politécnica de Albacete, 1984. p 94.

MARTINEZ, Rodolfo y PRADA, Oscar. Diseño y construcción de un liofilizador piloto para el estudio de procesos de deshidratación y conservación de productos agroindustriales mediante secado al vacío. Trabajo de grado ingeniero mecánico. Bucaramanga. Universidad industrial de Santander. Facultad de ingenierías Físico- Mecánicas, 2008. 175 p

McCABE, Warren Lee. Operaciones unitarias en Ingeniería química. Madrid: Ed.Mc Graw Hill. 1996.

MUJUMDAR, A. S. Handbook of Industrial Drying. En CRC Press. Boca Raton. Ed 4. 2014. p 20.

NONHEBEL, Gordon y MOSS, Arnold Alec Henri. El secado de sólidos en la industria química. Barcelona: Reverté, 1979. p 334.

ORREGO, Carlos. Procesamiento de alimentos. Universidad Nacional de Colombia. Manizales: Centro de publicaciones Universidad Nacional de Colombia sede Manizales, 2003.

R.M Mentha. Pharmaceutics-I: introduction to the drying process. Nueva Delhi: Vallabh Publicaciones (1996). p190.

RAPIN, Pierre J.; JACQUARD, Patrick. Instalaciones frigoríficas. Barcelona: Marcombo editores, 1997. p 459.

REISER, P. Sucrose: properties and applications. Paris: Springer Science & Business Media, 1994. p. 208.

ROSS, Alexander IV, et al. Combining nonthermal technologies to control foodborne microorganisms. International journal of food microbiology, 2003, vol. 89, no 2, p. 125-138.

SMITH, William y HASHEMI, Javad. Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales. México: McGraw Hill. 1993.

STRUMILLO, Czeslaw. Drying: principles, applications, and design. New York: CRC Press, 1986.

TREYBAL, Robert E. Operaciones de transferencia de masa. México: McGraw-Hill, 1988. p 724.

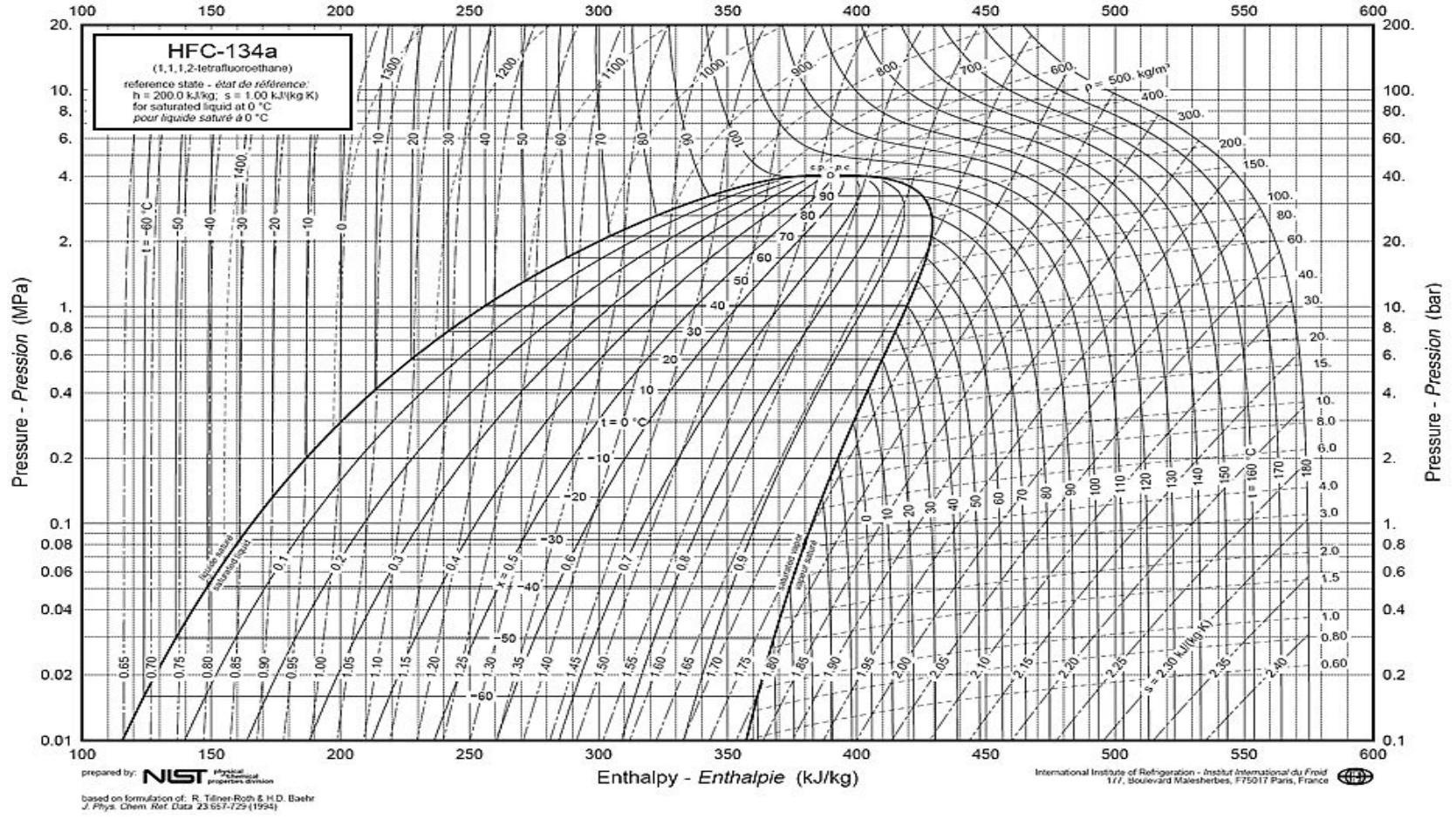
ANEXOS

ANEXO A.
TABLA DE PRESIONES DE VAPOR DEL AGUA LÍQUIDA DIFERENTES
TEMPERATURAS.³⁹

Temperatura	Presión			Temperatura	Presión		
	<i>Absoluta</i>	<i>Vacío</i>			<i>Absoluta</i>	<i>Vacío</i>	
° C	mm Hg	mm Hg	in Hg	° C	mm Hg	mm Hg	in Hg
40	55.59	504.41	19.86	68	214.51	345.49	13.60
41	58.413	501.587	19.75	69	224.09	335.91	13.22
42	61.577	498.423	19.62	70	234.03	325.97	12.83
43	64.886	495.114	19.49	71	244.33	315.67	12.43
44	68.349	491.651	19.36	72	255.02	304.98	12.01
45	72.136	487.864	19.21	73	266.11	293.89	11.57
46	75.922	484.078	19.06	74	277.59	282.41	11.12
47	79.709	480.291	18.91	75	289.49	270.51	10.65
48	83.834	476.166	18.75	76	301.82	258.18	10.16
49	88.147	471.853	18.58	77	314.58	245.42	9.66
50	92.648	467.352	18.40	78	327.8	232.2	9.14
51	97.343	462.657	18.21	79	341.48	218.52	8.60
52	102.24	457.76	18.02	80	355.63	204.37	8.05
53	107.35	452.65	17.82	81	370.28	189.72	7.47
54	112.67	447.33	17.61	82	385.43	174.57	6.87
55	118.23	441.77	17.39	83	401.1	158.9	6.26
56	124.01	435.99	17.16	84	417.3	142.7	5.62
57	130.03	429.97	16.93	85	434.04	125.96	4.96
58	136.29	423.71	16.68	86	451.33	108.67	4.28
59	142.82	417.18	16.42	87	469.21	90.79	3.57
60	149.61	410.39	16.16	88	487.67	72.33	2.85
61	156.67	403.33	15.88	89	506.73	53.27	2.10
62	164.02	395.98	15.59	90	526.41	33.59	1.32
63	171.65	388.35	15.29	91	546.72	13.28	0.52
64	179.59	380.41	14.98	92.6	560	0	0.00
65	187.83	372.17	14.65	92	567.68	-7.68	-0.30
66	196.39	363.61	14.32				
67	205.28	354.72	13.97				

³⁹ CENGEL. Yunus. Transferencia de masa y calor. Un enfoque práctico. México:McGraw-Hill Companies, 2007. Tabla A-10.

ANEXO B.
DIAGRAMA (PRESIÓN – ENTALPÍA) CARTA PARA EL REFRIGERANTE TETRAFLUOROETHANE (REFRIGERANT 134A).



Fuente: The International Institute of Refrigeration (IIR) - Institut International du Froid, Paris, France.

ANEXO C.
TABLA DE PROPIEDADES DEL REFRIGERANTE R134 A.

TABLA A-10

Propiedades del refrigerante 134a saturado

Temp., T, °C	Presión de saturación, P, kPa	Densidad, ρ , kg/m ³		Entalpia de vaporización, h_{g0} , kJ/kg		Calor específico, c_p , J/kg · K		Conductividad térmica, k, W/m · K		Viscosidad dinámica, μ , kg/m · s		Número de Prandtl, Pr		Coeficiente de expansión volumétrica, Tensión β , 1/K, superficial, N/m	
		Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	N/m
-40	51.2	1 418	2.773	225.9	1 254	748.6	0.1101	0.00811	4.878 × 10 ⁻⁴	2.550 × 10 ⁻⁶	5.558	0.235	0.00205	0.01760	
-35	66.2	1 403	3.524	222.7	1 264	764.1	0.1084	0.00862	4.509 × 10 ⁻⁴	3.003 × 10 ⁻⁶	5.257	0.266	0.00209	0.01682	
-30	84.4	1 389	4.429	219.5	1 273	780.2	0.1066	0.00913	4.178 × 10 ⁻⁴	3.504 × 10 ⁻⁶	4.992	0.299	0.00215	0.01604	
-25	106.5	1 374	5.509	216.3	1 283	797.2	0.1047	0.00963	3.882 × 10 ⁻⁴	4.054 × 10 ⁻⁶	4.757	0.335	0.00220	0.01527	
-20	132.8	1 359	6.787	213.0	1 294	814.9	0.1028	0.01013	3.614 × 10 ⁻⁴	4.651 × 10 ⁻⁶	4.548	0.374	0.00227	0.01451	
-15	164.0	1 343	8.288	209.5	1 306	833.5	0.1009	0.01063	3.371 × 10 ⁻⁴	5.295 × 10 ⁻⁶	4.363	0.415	0.00233	0.01376	
-10	200.7	1 327	10.04	206.0	1 318	853.1	0.0989	0.01112	3.150 × 10 ⁻⁴	5.982 × 10 ⁻⁶	4.198	0.459	0.00241	0.01302	
-5	243.5	1 311	12.07	202.4	1 330	873.8	0.0968	0.01161	2.947 × 10 ⁻⁴	6.709 × 10 ⁻⁶	4.051	0.505	0.00249	0.01229	
0	293.0	1 295	14.42	198.7	1 344	895.6	0.0947	0.01210	2.761 × 10 ⁻⁴	7.471 × 10 ⁻⁶	3.919	0.553	0.00258	0.01156	
5	349.9	1 278	17.12	194.8	1 358	918.7	0.0925	0.01259	2.589 × 10 ⁻⁴	8.264 × 10 ⁻⁶	3.802	0.603	0.00269	0.01084	
10	414.9	1 261	20.22	190.8	1 374	943.2	0.0903	0.01308	2.430 × 10 ⁻⁴	9.081 × 10 ⁻⁶	3.697	0.655	0.00280	0.01014	
15	488.7	1 244	23.75	186.6	1 390	969.4	0.0880	0.01357	2.281 × 10 ⁻⁴	9.915 × 10 ⁻⁶	3.604	0.708	0.00293	0.00944	
20	572.1	1 226	27.77	182.3	1 408	997.6	0.0856	0.01406	2.142 × 10 ⁻⁴	1.075 × 10 ⁻⁵	3.521	0.763	0.00307	0.00876	
25	665.8	1 207	32.34	177.8	1 427	1 028	0.0833	0.01456	2.012 × 10 ⁻⁴	1.160 × 10 ⁻⁵	3.448	0.819	0.00324	0.00808	
30	770.6	1 188	37.53	173.1	1 448	1 061	0.0808	0.01507	1.888 × 10 ⁻⁴	1.244 × 10 ⁻⁵	3.383	0.877	0.00342	0.00742	
35	887.5	1 168	43.41	168.2	1 471	1 098	0.0783	0.01558	1.772 × 10 ⁻⁴	1.327 × 10 ⁻⁵	3.328	0.935	0.00364	0.00677	
40	1 017.1	1 147	50.08	163.0	1 498	1 138	0.0757	0.01610	1.660 × 10 ⁻⁴	1.408 × 10 ⁻⁵	3.285	0.995	0.00390	0.00613	
45	1 160.5	1 125	57.66	157.6	1 529	1 184	0.0731	0.01664	1.554 × 10 ⁻⁴	1.486 × 10 ⁻⁵	3.253	1.058	0.00420	0.00550	
50	1 318.6	1 102	66.27	151.8	1 566	1 237	0.0704	0.01720	1.453 × 10 ⁻⁴	1.562 × 10 ⁻⁵	3.231	1.123	0.00456	0.00489	
55	1 492.3	1 078	76.11	145.7	1 608	1 298	0.0676	0.01777	1.355 × 10 ⁻⁴	1.634 × 10 ⁻⁵	3.223	1.193	0.00500	0.00429	
60	1 682.8	1 053	87.38	139.1	1 659	1 372	0.0647	0.01838	1.260 × 10 ⁻⁴	1.704 × 10 ⁻⁵	3.229	1.272	0.00554	0.00372	
65	1 891.0	1 026	100.4	132.1	1 722	1 462	0.0618	0.01902	1.167 × 10 ⁻⁴	1.771 × 10 ⁻⁵	3.255	1.362	0.00624	0.00315	
70	2 118.2	996.2	115.6	124.4	1 801	1 577	0.0587	0.01972	1.077 × 10 ⁻⁴	1.839 × 10 ⁻⁵	3.307	1.471	0.00716	0.00261	
75	2 365.8	964	133.6	115.9	1 907	1 731	0.0555	0.02048	9.891 × 10 ⁻⁵	1.908 × 10 ⁻⁵	3.400	1.612	0.00843	0.00209	
80	2 635.2	928.2	155.3	106.4	2 056	1 948	0.0521	0.02133	9.011 × 10 ⁻⁵	1.982 × 10 ⁻⁵	3.558	1.810	0.01031	0.00160	
85	2 928.2	887.1	182.3	95.4	2 287	2 281	0.0484	0.02233	8.124 × 10 ⁻⁵	2.071 × 10 ⁻⁵	3.837	2.116	0.01336	0.00114	
90	3 246.9	837.7	217.8	82.2	2 701	2 865	0.0444	0.02357	7.203 × 10 ⁻⁵	2.187 × 10 ⁻⁵	4.385	2.658	0.01911	0.00071	
95	3 594.1	772.5	269.3	64.9	3 675	4 144	0.0396	0.02544	6.190 × 10 ⁻⁵	2.370 × 10 ⁻⁵	5.746	3.862	0.03343	0.00033	
100	3 975.1	651.7	376.3	33.9	7 959	8 785	0.0322	0.02989	4.765 × 10 ⁻⁵	2.833 × 10 ⁻⁵	11.77	8.326	0.10047	0.00004	

Nota: La viscosidad cinemática ν y la difusividad térmica α se pueden calcular a partir de sus definiciones, $\nu = \mu/\rho$ y $\alpha = k/\rho c_p = \nu/Pr$. Las propiedades cuya lista se da aquí (excepto la densidad del vapor) se pueden usar a cualesquiera presiones con error despreciable, excepto a temperaturas cercanas al valor del punto crítico.

Fuente: Datos generados basándose en el software EES desarrollado por S. A. Klein y F. L. Alvarado. Fuentes originales: R. Tillner-Roth y H. D. Baehr, "An International Standard Formulation for the Thermodynamic Properties of 1, 1, 1, 2-Tetrafluoroethane (HFC-134a) for Temperatures from 170 K to 455 K and Pressures up to 70 MPa", *J. Phys. Chem. Ref. Data*, Vol. 23, No. 5, 1994; M. J. Assael, N. K. Dalaouti, A. A. Griva y J. H. Dymond, "Viscosity and Thermal Conductivity of Halogenated Methane and Ethane Refrigerants", *IJR*, Vol. 22, págs. 525-535, 1999; programa NIST REFPROP 6 (M. O. McLinden, S. A. Klein, E. W. Lemmon y A. P. Peskin, Physical and Chemical Properties Division, National Institute of Standards and Technology, Boulder, CO 80303, 1995).

Fuente: CENGEL, Transferencia de masa y calor. Un enfoque práctico. Tabla A-10 (2007)

ANEXO D.
COTIZACIÓN DE RESISTENCIAS PLANAS PARA IMPLEMENTAR EN EL SISTEMA DE CALENTAMIENTO DEL EQUIPO PROPUESTO.

RESISTENCIAS NACIONALES S.A.S.
FÁBRICA DE RESISTENCIAS ELÉCTRICAS INDUSTRIALES

Bogotá DC. Noviembre 10 de 2016

Señores:
Punto Natural.
Cindy Pérez.

COTIZACIÓN

Fabricación de Resistencias eléctricas:

1- Fabricación de resistencias planas blindadas en acero inoxidable:

Voltaje 220 v.
Longitud 650 mm
Ancho 50 mm

Valor por unidad: \$ 34.000 IVA incluido.
Valor total: \$ 170.000 IVA incluido.

2- Fabricación de resistencias industriales tubulares figuradas en U:

Voltaje 220 v.
Longitud 650 mm
Ancho 50 mm

Valor por unidad: \$ 33.000 IVA incluido.
Valor por unidad: \$ 165.000 IVA incluido.

Cordialmente:

Camilo Salguero A.
Departamento de Ventas.
Resistencias Nacionales S.A.S.
Nit. 900.712.296-3

www.resistenciasnacionales.com
Correo electrónico: contacto@resistenciasnacionales.com
Bogotá, Colombia.

ANEXO E. ESPECIFICACIONES DE LA UNIDAD DE CONDENSACIÓN ESTABLECIDA PARA EL SISTEMA REFRIGERANTE DEL EQUIPO.

Groupe de condensation / *Condensing unit*
Code tension / *Voltage code* : H

CAJ4511YHR

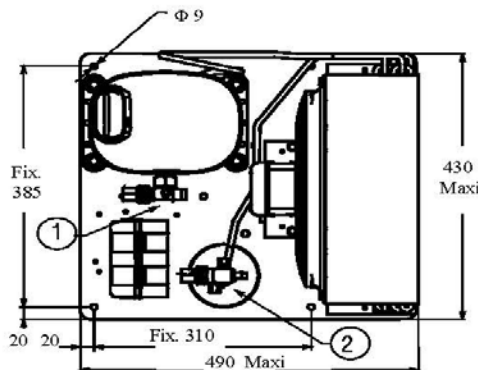
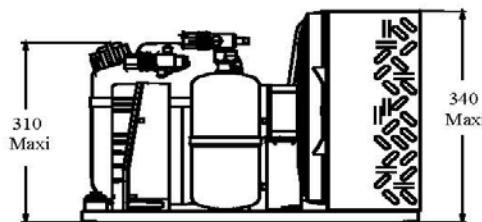
Froid commercial et industriel positif (HP)
Commercial & industrial application (HBP)

208-220V / 60Hz - 1-

R134a

N°514QT-H-VR ind c

Conditions <i>Conditions</i>	fréquence <i>frequency</i>	Prod frigorifique nominale* / <i>nominal refriger capacity*</i>			Puis. sonore <i>Sound level</i>
		Watts	Kcal/h	BTU/h	
Standard	60 Hz	3232	2780	11021	68 dBA <small>ISO 3745 / ISO 3743-1</small>



Poids net / *Net weight*: 36 Kg
Détente / *Expansion device*: Détendeur
Expansion valve
Débit d'air / *Air flow*: 1430 m³/h

Intensité / *Current*
nom. / *Rated current RLA*: 7.9 A
max. / *Max current*: 10.9 A
dém. / *Start current LRA*: 48 A

Ap. Electrique / *Electrical equipment*: CSR

Fiche technique compresseur /
Compressor technical data sheet: 214QT-H

Ventilateur / *Fan motor*:
Vitesse / *R.P.M.*: 1550 tr/min
Puis. mécanique / *Shaft power*: 25 W
Diam. hélice / *Fan blade dia.*: Ø 300 mm
Protection / *Protection*: Protecteur/Overload
IP42

Condenseur / *Condenser*: 300/4200

Réservoir de liquide / *Receiver*:
Volume / *Capacity*: 2.35 L
PMS / *Max. service pressure*: 32 Bars

Grille / *Fan guard*:
maille < à 8mm
Grid space < 8mm

Vannes livrées ensachées et non montées sur le groupe.
Rotalock valves supplied loose with the condensing unit.

Pour conduites Ø ext / *For tubing O.D.*

Aspirat° 1 / <i>Suction 1</i>	Vanne Orientable / <i>Rotalock Valve</i>	15.9 (5/8")	à Braser/Brazed
Départ liquide 2 / <i>Liquid line 2</i>	Vanne Orientable / <i>Rotalock Valve</i>	9.5 (3/8")	à Braser/Brazed

Les caractéristiques données dans cette fiche technique peuvent évoluer sans avis préalable, avec les améliorations que "TECUMSEH EUROPE" entend toujours apporter à sa production.
"TECUMSEH EUROPE", in a constant endeavour to improve its products reserves the right to change any information contained in this leaflet without prior warning.



Fuente: Catalogo TECHUMSEH. <http://www.tecumseh-europe.com>

ANEXO F. COTIZACIÓN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN POR LA EMPRESA TECHUMSEH.



INVERPRIMOS S.A.S. Nit: 800.222.648-7
 MEDELLIN Calle 14 Sur N° 51c-05 Pbx:(4)360 44 40 ventasmedellin@inverprimos.com
 BOGOTÁ Diagonal 24 Bis N° 27a-44 Pbx:(1)269 52 11 ventasbogota@inverprimos.com
 CALI Calle 58 N° 1N-85 Pbx:(2)382 77 56 ventascal@inverprimos.com
 BARRANQUILLA Calle 44 Nro. 41-45 Pbx:(5)317 78 75 ventasbarranquilla@inverprimos.com
 BUCARAMANGA Carrera 21 N° 28-76 PBX:(7)691 79 88 ventasbucaramanga@inverprimos.com
 www.inverprimos.com

COTIZACION N° 00179434

Empresa: OVENTAS POR MOSTRADOR BOGOTÁ		Fecha: 28/11/2016	
Contacto:	Telefono:	Vigencia: 05/12/2016	
Dirección:	Ciudad: BOGOTÁ	Condiciones de pago: Contado	
E-mail:			

Referencia	Descripción	Cantidad	V/r Unit.	V/r Total
CAJN4511YHR/4J62	UNCO 1 AFR134 220VFRANCIA	1	1,521,551	1,521,551

Observaciones: <div style="border: 1px solid black; height: 80px; width: 100%;"></div>	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="padding: 2px;">Subtotal:</td> <td style="text-align: right; padding: 2px;">1,521,551</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">Total Neto:</td> <td style="text-align: right; padding: 2px;">1,521,551</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">IVA 16%:</td> <td style="text-align: right; padding: 2px;">243,448</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">Total:</td> <td style="text-align: right; padding: 2px;">1,765,000</td> </tr> </table> <p style="margin-top: 10px;">Atte, <u>57. LUZ ADRIANA OSORIO</u></p>	Subtotal:	1,521,551	Total Neto:	1,521,551	IVA 16%:	243,448	Total:	1,765,000
Subtotal:	1,521,551								
Total Neto:	1,521,551								
IVA 16%:	243,448								
Total:	1,765,000								

Tiempos de entrega sujetos a disponibilidad de inventario - Los precios pueden cambiar sin previo aviso


LA MAS COMPLETA GAMA EN EQUIPOS Y REPUESTOS PARA REFRIGERACIÓN, AIRE ACONDICIONADO Y LÍNEA BLANCA

...nosotros hacemos la diferencia!!!

Fuente: Catalogo TECHUMSEH. <http://www.tecumseh-europe.com>

**ANEXO G.
COTIZACIÓN BOMBAS DE VACÍO EN DIFERENTES EMPRESAS PARA
IMPLEMENTACIÓN EN LA CONSTRUCCIÓN DEL SECADOR AL VACÍO
PROPUESTO.**

Empresa	Referencia	Voltaje	Motor	Máximo vacío Torr	Capacidad L/min	Precio \$
INSTALACIONES & EQUIPOS INDUSTRIALES	DVPDB.16D	220V	0.66 HP	1.5	339,8	9.999.000
INSTALACIONES & EQUIPOS INDUSTRIALES	DVPLC20	220 V	0.9 HP	1.5	339.8	3.599.999
LANZZETA RENGIFO	CP 07532-40	115 VAC	¼ HP	2.5	86	1.720.626
INSUTEC VACÍO Y PRESIÓN	LR-27060-1.5	200-345	1,5 HP	1.5	533.3	3.242.200
INSUTEC VACÍO Y PRESIÓN	VD-020	200-345	1 HP	37.5	400	3.439.400

 Fundación Universidad de América	FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA	Código:
	PROCESO: GESTIÓN DE BIBLIOTECA	Versión 0
	Autorización para Publicación en el Repositorio Digital Institucional – Lumieres	Julio - 2016


AUTORIZACIÓN PARA PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO DIGITAL INSTITUCIONAL LUMIERES




Yo Cindy Paola Pérez Carrillo en calidad de titular de la obra PROPUESTA DE MEJORA DEL SISTEMA DE SECADO DE PRODUCTO GRANULADO EMPLEADO EN LA EMPRESA PUNTO NATURAL ZAMORA PRIETO S.A.S, elaborada en el año 2016, autorizo al Sistema de Bibliotecas de la Fundación Universidad América para que incluya una copia, indexe y divulgue en el Repositorio Digital Institucional – Lumieres, la obra mencionada con el fin de facilitar los procesos de visibilidad e impacto de la misma, conforme a los derechos patrimoniales que me corresponde y que incluyen: la reproducción, comunicación pública, distribución al público, transformación, en conformidad con la normatividad vigente sobre derechos de autor y derechos conexos (Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, entre otras).

Al respecto como Autor manifestamos conocer que:

- La autorización es de carácter no exclusiva y limitada, esto implica que la licencia tiene una vigencia, que no es perpetua y que el autor puede publicar o difundir su obra en cualquier otro medio, así como llevar a cabo cualquier tipo de acción sobre el documento.
- La autorización tendrá una vigencia de cinco años a partir del momento de la inclusión de la obra en el repositorio, prorrogable indefinidamente por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales del autor y podrá darse por terminada una vez el autor lo manifieste por escrito a la institución, con la salvedad de que la obra es difundida globalmente y cosechada por diferentes buscadores y/o repositorios en Internet, lo que no garantiza que la obra pueda ser retirada de manera inmediata de otros sistemas de información en los que se haya indexado, diferentes al Repositorio Digital Institucional – Lumieres de la Fundación Universidad América.
- La autorización de publicación comprende el formato original de la obra y todos los demás que se requiera, para su publicación en el repositorio. Igualmente, la autorización permite a la institución el cambio de soporte de la obra con fines de preservación (impreso, electrónico, digital, Internet, intranet, o cualquier otro formato conocido o por conocer).
- La autorización es gratuita y se renuncia a recibir cualquier remuneración por los usos de la obra, de acuerdo con la licencia establecida en esta autorización.
- Al firmar esta autorización, se manifiesta que la obra es original y no existe en ella ninguna violación a los derechos de autor de terceros. En caso de que el trabajo haya sido financiado por terceros, el o los autores asumen la responsabilidad del cumplimiento de los acuerdos establecidos sobre los derechos patrimoniales de la obra.
- Frente a cualquier reclamación por terceros, el o los autores serán los responsables. En ningún caso la responsabilidad será asumida por la Fundación Universidad de América.
- Con la autorización, la Universidad puede difundir la obra en índices, buscadores y otros sistemas de información que favorezcan su visibilidad.

Conforme a las condiciones anteriormente expuestas, como autor establezco las siguientes condiciones de uso de mi obra de acuerdo con la **licencia Creative Commons** que se señala a continuación:

 Fundación Universidad de América	FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA	Código:
	PROCESO: GESTIÓN DE BIBLIOTECA	Versión 0
	Autorización para Publicación en el Repositorio Digital Institucional – Lumieres	Julio - 2016

	Atribución- no comercial- sin derivar: permite distribuir, sin fines comerciales, sin obras derivadas, con reconocimiento del autor.	<input type="checkbox"/>
	Atribución – no comercial: permite distribuir, crear obras derivadas, sin fines comerciales con reconocimiento del autor.	<input checked="" type="checkbox"/>
	Atribución – no comercial – compartir igual: permite distribuir, modificar, crear obras derivadas, sin fines económicos, siempre y cuando las obras derivadas estén licenciadas de la misma forma.	<input type="checkbox"/>

Licencias completas: http://co.creativecommons.org/?page_id=13

Siempre y cuando se haga alusión de alguna parte o nota del trabajo, se debe tener en cuenta la correspondiente citación bibliográfica para darle crédito al trabajo y a su autor.

De igual forma como autor autorizo la consulta de los medios físicos del presente trabajo de grado así:

AUTORIZO	SI	NO
La consulta física (sólo en las instalaciones de la Biblioteca) del CD-ROM y/o Impreso	x	
La reproducción por cualquier formato conocido o por conocer para efectos de preservación	x	

Información Confidencial: este Trabajo de Grado contiene información privilegiada, estratégica o secreta o se ha pedido su confidencialidad por parte del tercero, sobre quien se desarrolló la investigación. En caso afirmativo expresamente indicaré en carta adjunta, tal situación con el fin de que se respete la restricción de acceso.	SI	NO
		x

Para constancia se firma el presente documento en Bogotá, a los 15 días del mes de Marzo del año 2017.

EL AUTOR:

Autor 1

Nombres	Apellidos
Cindy Paola	Pérez Carrillo
Documento de identificación No	Firma
1026574633	Cindy Paola Pérez