

**DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN LIOFILIZADOR PILOTO
PARA EL ESTUDIO DE PROCESOS DE DESHIDRATACIÓN Y
CONSERVACION DE PRODUCTOS AGROINDUSTRIALES
MEDIANTE SECADO AL VACÍO.**

**RODOLFO RENATO MARTINEZ MEDINA
OSCAR ANDRES PRADA RODRIGUEZ**



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

2008

**DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN LIOFILIZADOR PILOTO
PARA EL ESTUDIO DE PROCESOS DE DESHIDRATACIÓN Y
CONSERVACION DE PRODUCTOS AGROINDUSTRIALES
MEDIANTE SECADO AL VACÍO.**

**RODOLFO RENATO MARTINEZ MEDINA
OSCAR ANDRES PRADA RODRIGUEZ**

**Trabajo de Grado para optar al título de
Ingeniero Mecánico**

Director

**OMAR ARMANDO GELVEZ AROCHA
Ingeniero Mecánico**

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

2008

DEDICATORIA

A Dios, por todas las bendiciones y oportunidades que me ha dado en la vida.

A mi madre preciosa, que con su amor y apoyo incansable a forjado las bases de mi vida.

A Luis y a mis hermanos: Mario y Maryluz, por que son mi familia, mi motivación y la alegría de mi espíritu.

A mi papi, mi abuelita y mi tía, por que desde donde están siempre me acompañan

A Oscar, mi compañero de proyecto y amigo del alma, siempre juntos en todas las batallas.

A Paty y Diego, por enseñarme el verdadero sentido de la amistad y la lealtad, ocupan un lugar muy importante en mi vida.

A mis grandes amigos, quienes dejan huella en mis afectos; mi personalidad y mi recuerdo.

... y a todos aquellos que se interesaron en mi bienestar y desarrollo profesional.

RODOLFO MARTINEZ

A Dios, que durante toda mi vida me ha guiado por el camino correcto.

A mi madre por su ejemplo de trabajo incansable y apoyo incondicional en todas las desiciones que he tomado en mi vida.

A Carlos, mi hermano quien siempre esta cuando lo necesito y con quien siempre estaré agradecido.

A Rodolfo Martinez, mi amigo en las buenas y en las malas, en quien siempre depositaré toda mi confianza.

A Ericka mi novia, quien en esta etapa de mi vida ha sido mi compañía y mi motivación para seguir adelante.

A mi hermana laura, mis hijos del club Elite y todas las personas que me rodean y han dado un aporte a la persona que soy hoy en día.

OSCAR PRADA

AGRADECIMIENTOS

A nuestras madres por su constante apoyo, su dedicación y por todos los sacrificios que tuvieron que realizar para hacer posible este nuestro sueño.

A la Universidad Industrial de Santander por brindarnos las herramientas y recursos apropiados para nuestro aprendizaje y crecimiento profesional.

Al ingeniero, Omar Gélvez Arocha, nuestro profesor y director del proyecto, quien siempre nos brindó su confianza, orientación y respaldo desinteresado.

A Friotécnicas, don Alberto Rodríguez Plata, técnico en refrigeración, y todo su equipo de trabajo, don Álvaro, Alejandro y Leonel, quienes con su valioso aporte hicieron posible la ejecución del presente proyecto.

Al ingeniero y amigo, Martín Sarmiento, quien nos brindó su asesoría y ayuda en cada momento que lo necesitamos.

A nuestros familiares, que fueron participes de este largo proceso que ahora culminamos con éxito.

A todos nuestros amigos, los de ayer, los de hoy y los de siempre, por su amistad, sus enseñanzas, su lealtad y todos los buenos momentos vividos, siempre estarán en nuestro corazón.

..... y por supuesto, a mi compañero de proyecto.

GRACIAS.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCION	1
1. FUNDAMENTOS DE LA LIOFILIZACION	3
1.1. PRINCIPIO DEL PROCESO DE LIOFILIZACION	4
1.2. ETAPAS DE LA LIOFILIZACIÓN	6
1.2.1. Congelación Inicial	6
1.2.2. Sublimación o desecación primaria	7
1.2.3. Desorción o desecación secundaria	7
1.3. TERMODINAMICA DEL PROCESO DE LIOFILIZACION	8
1.3.1. Transferencia simultánea de Calor y Materia	8
1.2.3.1. Modelo de estado estacionario	9
1.4. INSTALACIONES	11
1.4.1. Instalaciones Industriales	12
1.5. SUBSISTEMAS DE UN EQUIPO DE LIOFILIZACION	14
1.5.1. Cámara de Trabajo	15
1.5.1.1. Según Configuraciones Geométricas	15
1.5.1.1.1. Sistema de cámara redonda o cilíndrica	15
1.5.1.1.2. Sistema de cámara Rectangular	16
1.5.1.1.3. Sistema de cámara Especial Para Laboratorio	16
1.5.1.2. Según ubicación del sistema de condensación	17
1.5.1.2.1. Sistema de Simple Cámara	17
1.5.1.2.2. Sistema de Doble Cámara	18
1.5.2. Sistema de Bandejas	20
1.5.3. Sistema de Calentamiento del producto (Portabanderas)	22
1.5.3.1. Sistema de calentamiento por resistencias eléctricas	22
1.5.3.1.1. Calentamiento por contacto directo	22
1.5.3.1.2. Calentamiento por sistema acelerado	23
1.5.3.1.3. Calentamiento por radiación	23
1.5.3.1.4. Calentamiento Dieléctrico y por microondas	24
1.5.3.2. Sistema de calentamiento por fluido calefactor	24
1.5.4. Sistema de vacío	25
1.5.5. Sistema de refrigeración	26
1.5.6. Sistema de Control	28
1.5.7. Sistema de descongelamiento	30
1.5.7.1. Descongelamiento por líquido caliente	30
1.5.7. Descongelamiento por vapor de agua	31
1.5.7.3. Descongelamiento por gas caliente	31
2. EVALUACION DEL PROCESO	33
2.1. DESCRIPCION DEL PROCESO	33

2.2. ANALISIS DEL PROCESO	34
2.2.1. Ventajas de la Liofilización	35
2.2.2. Desventajas de la Liofilización	35
2.3. IDENTIFICACION DE PARAMETROS	36
2.4. DETERMINACION DE REQUERIMIENTOS	37
2.4.1. Requerimientos de uso	37
2.4.2. Requerimientos de función	37
2.4.3. Requerimientos estructurales	38
2.4.4. Requerimientos técnico – productivos	38
2.4.5. Requerimientos económicos	39
2.5. ESPECIFICACIONES DE DISEÑO	39
2.5.1. Ubicación Geográfica	39
2.5.2. Dimensiones de trabajo	40
2.4.2.1. Cámara de Trabajo	40
2.4.2.3. Bandejas	40
2.4.3. Material	40
2.4.4. Especificaciones Técnicas	41
3. EVOLUCION DEL PROYECTO	42
3.1. PRESENTACION DE ALTERNATIVAS	42
3.1.1. Alternativa de diseño 1	43
3.1.2. Alternativa de diseño 2	44
3.1.3. Alternativa de diseño 3	46
3.1.4. Alternativa de diseño 4 (Propuesta final)	47
4. DISEÑO BASICO Y DETALLADO DEL LIOFILIZADOR PILOTO	49
4.1. DISEÑO ESTRUCTURAL	49
4.1.1. Mueble	50
4.1.2. Cámara de Trabajo	51
4.1.3. Puerta	52
4.2. DISEÑO Y SELECCIÓN DEL SISTEMA DE REFRIGERACION	53
4.2.1. Diseño Térmico (Cálculos)	54
4.2.1.1. Determinación de Temperaturas	54
4.2.1.1.1. Temperatura de ambiente exterior	54
4.2.1.1.2. Temperatura de diseño de la cámara	55
4.2.1.1.3. Temperatura de evaporación	55
4.2.1.1.3. Temperatura de condensación	55
4.2.1.2. Cálculo de Carga del sistema	56
4.2.1.2.1. Cargas por paredes	56
4.2.1.2.2. Cargas por producto	58
4.2.1.2.2.1. Calculo del calor sensible por encima del pto de congelación	59
4.2.1.2.2.2. Calculo del calor latente de congelación	59

4.2.1.2.2.3. Calculo del calor sensible por debajo del pto de congelación	60
4.2.1.2.2.4. Calculo del calor respiración del producto	60
4.2.1.2.3. Cargas varias	61
4.2.2. Selección del sistema de Refrigeración	62
4.2.2.1. Selección del Evaporador	62
4.2.2.2. Selección de la unidad condensadora	66
4.2.2.2.1. Cálculos del Compresor	66
4.2.2.2.2. Cálculos del Condensador	70
4.2.2.2.3. Selección de la Unidad	71
4.2.2.3. Selección del Tubo Capilar	73
4.3. SELECCIÓN DEL SISTEMA DE VACIO	75
4.4. SELECCIÓN DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO	77
4.4.1. Selección de las resistencias de calentamiento	78
4.5. SELECCIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL Y POTENCIA	80
4.5.1. Control del sistema de refrigeración	81
4.5.1.1. Principio de funcionamiento	82
4.5.1.1.1. Control en el Congelamiento	84
4.5.1.1.2. Control en el Desongelamiento	85
4.5.2. Control del sistema de calentamiento	88
4.5.3. Sistema de potencia eléctrico del liofilizador Piloto	89
5. ARGUMENTACION DE DISEÑO	94
5.1. Descripción del sistema operativo	94
5.2. Descripción de los componentes	96
5.2.1. Mueble	97
5.2.2. Puerta	98
5.2.3. Cámara de Trabajo	99
5.2.4. Placas portabandejas	100
5.2.5. Bandejas	101
5.2.6. Sistema de calentamiento	101
5.2.7. Sistema de vacío	102
5.2.8. Sistema de refrigeración	103
5.2.8.1. Unidad condensadora	104
5.2.8.2. Evaporador	106
5.2.8.3. Ventilador	107
5.2.8.4. Dispositivo de expansión	107
5.2.8.5. Control de presión de succión	108
5.2.8.6. Acumulador de líquido de succión	109
5.2.8. Sistema de descongelamiento	110
6. HERRAMIENTAS PARA LA FABRICACION	111

6.1. Planos de construcción. (Anexo 3)	111
6.2. Planos de ensamble. (Anexo 4)	111
6.3. Procesos de manufactura. (Anexo 5)	111
6.4. Procesos de manufactura. (Anexo 6)	112
CONCLUSIONES	113
RECOMENDACIONES	114
BIBLIOGRAFIA	115
ANEXOS	116

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Diagrama de fases del agua	4
Figura 2. Ilustración de una pieza de alimento en liofilización	5
Figura 3. Etapas de la liofilización	6
Figura 4. Sistema Básico de Liofilización	11
Figura 5. Liofilizador continuo	12
Figura 6. Liofilizador de producción Telstar, serie Lyogamma	13
Figura 7. Secadero al vacío Industrial - e&e verfahrenstechnik GmbH	14
Figura 8. Cámara redonda industrial	15
Figura 9. Modelo de cámara rectangular con visor para el control	16
Figura 10. Liofilizadores de laboratorio para ampollas o bandejas	16
Figura 11. Sistema de simple cámara cilíndrica	17
Figura 12. Sistema de simple cámara de laboratorio	17
Figura 14. Sistema de simple cámara de laboratorio	18
Figura 15. Doble cámara tipo cilíndrico con descongelamiento por agua	19
Figura 16. Doble cámara tipo cilíndrico con descongelamiento continuo	19
Figura 17. Sistema de simple cámara de laboratorio	20
Figura 18. Detalle de ubicación de termocuplas en las bandejas	21
Figura 19. Sistema de bandejas en un proceso de liofilización industrial	21
Figura 20. Calentamiento por contacto directo	23
Figura 21. Calentamiento por sistema acelerado por malla metálica	23
Figura 22. Calentamiento de las bandejas por radiación	24
Figura 23. Circuito de calentamiento por fluido calefactor	25
Figura 24. Representación gráfica del sistema de vacío de un liofilizador	25
Figura 25. Bomba de vacío característica de sistemas de liofilización	26
Figura 26. Sistema de refrigeración convencional para baja temperatura	27
Figura 27. Detalle compresores de doble etapa	27
Figura 28. Fotografía de un banco de control de un liofilizador piloto	28
Figura 29. Fotografía de un panel de Control digital de membrana	29
Figura 30. Controlador EKC 202C	29
Figura 31. Descongelamiento por flujo de líquido caliente	30
Figura 32. Descongelamiento por Vapor de agua	31
Figura 33. Descongelamiento por Gas Caliente	32
Figura 34. Alternativa de diseño # 1 modelada en CAD	43
Figura 35. Alternativa de diseño # 2 modelada en CAD	45
Figura 36. Alternativa de diseño # 3 modelada en CAD	46
Figura 37. Alternativa de diseño # 4 (final) modelada en CAD	48

Figura 38. Vista frontal y lateral de la estructura del liofilizador piloto	50
Figura 39. Mueble del liofilizador piloto	51
Figura 40. Cámara de Trabajo modelada en CAD	52
Figura 41. Puerta de la cámara de trabajo	53
Figura 42. Temperatura máxima en la ciudad de Bucaramanga (IDEAM)	54
Figura 43. Variación de la capacidad del evaporador con DT evaporador	63
Figura 44. Variación de la capacidad del evaporador con DT evaporador	65
Figura 45. Diagrama de Presión-Entalpía para (R-404 A) en Unidades SI	68
Figura 46. Capacidades del Compresor para R404 A	71
Figura 47. Especificaciones compresor Tecumseh CAJ2432Z	72
Figura 48. Tabla para selección del tubo capilar para refrigerante 404	73
Figura 49. Cálculo del tubo capilar mediante utilización de CAP TUBE	74
Figura 50. Resultados del cálculo del tubo capilar con CAP TUBE	75
Figura 51. Datos técnicos de bombas de vacío VACUUM PUMP	76
Figura 52. Bomba de Vacío VACUUM PUMP modelo QVP-800	77
Figura 53. Placa Portabandejas modelada en CAD	78
Figura 54. Resistencia de calentamiento modelada en CAD	78
Figura 55. Esquema de resistencia de calentamiento modelada en CAD	80
Figura 56. Controlador EKC 201 de Danfoss	82
Figura 57. Aplicaciones del controlador EKC 201 de Danfoss	82
Figura 58. Aplicación # 3 del controlador EKC 201 de Danfoss	83
Figura 59. Señales de entrada y salida del controlador EKC 201	84
Figura 60. Diferencial de temperatura del controlador EKC 201	85
Figura 61. Control de temperatura por arranque/parada de compresor	87
Figura 62. Controlador de temperatura TOKY TE7/TM7	89
Figura 63. Convertidor de Voltaje Danfoss 220V-12V	89
Figura 64. Breaker trifásico de 50 Amp	90
Figura 65. Contactor principal con el relé de protección térmica	91
Figura 66. Vista panorámica del sistema de potencia eléctrica	91
Figura 67. Relevos VCP de 8 pines a 220 V (Relés R1, R2, R3 y R4)	92
Figura 68. Esquema eléctrico del sistema	93
Figura 69. Liofilizador piloto modelado en CAD	96
Figura 70. Mueble modelado en CAD	97
Figura 71. Puerta con manijas de seguridad y empaque, en CAD	98
Figura 72. Manijas de seguridad de la puerta de la cámara	99
Figura 73. Cámara de trabajo modela en CAD	100
Figura 74. Placas portabandejas modelas en CAD	100
Figura 75. Bandejas modelas en CAD	101
Figura 76. Resistencias de calentamiento	102
Figura 77. Bomba de Vacío	102
Figura 78. Manovacúmetro para medición de presión de vacío	103
Figura 79. Control de presión de vacío Danfoss	103
Figura 80. Sistema de refrigeración modela en CAD	104

Figura 81. Unidad Condensadora TECUMSEH CAJ2432Z	105
Figura 82. Compresor Hermético TECUMSEH	105
Figura 83. Evaporador JORVAN montado en la cámara de trabajo	106
Figura 84. Disposición de los dos evaporadores en paralelo	106
Figura 85. Ventilador del evaporador	107
Figura 86. Tubo Capilar	108
Figura 87. Control de presión de succión Danfoss	109
Figura 88. Acumulador de líquido de succión	109
Figura 89. Recipiente de condensado de la cámara de trabajo	110
Figura 90. Recipiente de reevaporación exterior	110

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Especificaciones Técnicas de diseño	41
Tabla 2. Ventajas y Desventajas Alternativa de diseño 1	44
Tabla 3. Ventajas y Desventajas Alternativa de diseño 2	45
Tabla 4. Ventajas y Desventajas Alternativa de diseño 3	46
Tabla 5. Tabla de datos para cálculo de carga por paredes	57
Tabla 6. Carga total a través de las paredes de la cámara	58
Tabla 7. Carga total debida a productos	61
Tabla 8. Resumen de cargas a extraer en 6 horas de trabajo	62
Tabla 9. Configuración de parámetros para el congelamiento	85
Tabla 10. Configuración de parámetros para descongelamiento eléctrico	86

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo 1. CATALOGO TÉCNICO GAS REFRIGERANTE R-404A SALVADOR ESCODA S.A.	117
Anexo 2. FOLLETO TÉCNICO CONTROLADORES ELECTRONICOS EKC 201 Y EKC 301, DANFOSS 2006	120
Anexo 3. PLANOS DE CONSTRUCCION	129
Anexo 4. CARTAS DE PRODUCCION	130
Anexo 5. MANUAL DE FUNCIONAMIENTO	138
Anexo 6. MANUAL DE MANTENIMIENTO GENERAL	141

NOMENCLATURA

T_{amb}	Temperatura ambiente, °C
T_{cond}	Temperatura de condensación, °C
T_{evap}	Temperatura de evaporación, °C
T_{cam}	Temperatura de la cámara de trabajo, °C
T_c	Temperatura de congelación promedio, °C
C_{p_h}	Calor específico promedio por encima del punto de congelación, Btu/lb°F
C_{p_l}	Calor específico promedio por debajo del punto de congelación, Btu/lb°F
f_r	Factor de rapidez de enfriamiento promedio
h_{fi}	Calor latente de congelación promedio, Btu/lb
Q_p	Carga por paredes cámara de refrigeración, W
A	Área, ft ²
U	Factor de transmisión de calor, Btu/ft ² °F
D	Diferencia de temperatura entre los dos lados de la pared, °F
M	Masa, Kg
ΔT	Diferencia entre temperatura de entrada y de congelación del producto, °F
Q_{enf}	Calor sensible por encima del punto de congelación, Btu
Q_{sol}	Calor latente de congelación, Btu
Q_{alm}	Calor sensible por debajo del punto de congelación, Btu
Q_{resp}	Calor de respiración del producto, Btu
Q_{vent}	Calor cedido por el ventilador del evaporador, Btu
DT	Diferencia de temperaturas, °F
CAP	Capacidad requerida para el evaporador, Btu
t	Tiempo, seg
W	Trabajo de compresión, KJ/Kg
h_d	Entalpía de vapor sobrecalentado a la salida del compresor, KJ/Kg
h_c	Entalpía de vapor saturado a la temperatura de evaporación del refrigerante, KJ/Kg
Q_{sis}	Carga del sistema, KJ/min
ER	Efecto refrigerante del sistema, KJ/Kg
L_{cap}	longitud del tubo capilar
$C_{p_{cobre}}$	Calor específico del cobre, J/Kg * K
ρ_{cobre}	Densidad del cobre puro, Kg/m ³
K_{pol}	Conductividad térmica del poliuretano, Btu/ft°F
K_{acer}	Conductividad térmica del acero, Btu/ft°F
x	Espesor del material, ft
NO	Normalmente abierto
NC	Normalmente cerrado

UNIDADES

<i>m</i>	<i>Metro</i>
<i>s</i>	<i>Segundo</i>
<i>kg</i>	<i>Kilogramo</i>
<i>°C</i>	<i>Grado Celsius</i>
<i>°F</i>	<i>Grado Fahrenheit.</i>
<i>W</i>	<i>Watt</i>
<i>TR</i>	<i>Tonelada de refrigeración (12000 BTU/h, 3750 W)</i>
<i>J</i>	<i>Newton (kg m/s²)</i>
<i>Pa</i>	<i>Pascal (N/m²)</i>

GLOSARIO

ACUMULADOR: Tanque de almacenamiento, el cual recibe refrigerante líquido del evaporador, evitando que fluya hacia la línea de succión antes de evaporarse.

ALETA: Superficie metálica unida a un tubo para proporcionar mayor superficie de contacto, a fin de mejorar el enfriamiento. Se usan extensivamente en condensadores enfriados por aire y evaporadores.

CALOR: Forma de energía que actúa sobre las sustancias para elevar su temperatura; energía asociada con el movimiento al azar de las moléculas.

CALOR ESPECÍFICO: Relación de la cantidad de calor requerido, para aumentar o disminuir la temperatura de una sustancia en 1°C, comparado con la que se requiere para aumentar o disminuir la temperatura de una masa igual de agua en 1°C.

CALOR LATENTE: Es la cantidad de energía necesaria para lograr un cambio de fase en un cuerpo.

CÁMARA DE TRABAJO: Espacio en el que se lleva a cabo el proceso de liofilización, trabaja a temperaturas y presiones muy bajas para poder realizar el proceso.

CAPACIDAD: Sistema de clasificación en refrigeración. Medido generalmente en kcal/h o en watts/h, (o en btu/h).

CARGA TÉRMICA: Cantidad de calor medida en watts, kcal o btu, la cual es removida durante un período de tiempo.

COMPRESOR: Máquina en sistemas de refrigeración, hecha para succionar vapor del lado de baja presión en el ciclo de refrigeración, y comprimirlo y descargarlo hacia el lado de alta presión del ciclo.

CONDENSACIÓN: Proceso de cambiar de estado un vapor o un gas a líquido, al enfriarse por abajo de su temperatura de saturación o punto de rocío.

CONDENSADOR: Componente del mecanismo de refrigeración, el cual recibe del compresor vapor caliente a alta presión, enfriándolo y regresándolo luego a su estado líquido. El enfriamiento puede ser con aire o con agua.

CONDUCCIÓN: Flujo de calor entre sustancias, por medio de vibración de las moléculas.

CONGELACIÓN: Cambio de estado de líquido a sólido.

CONTROL DE DESCONGELAMIENTO: Dispositivo para operar un sistema de refrigeración, de tal manera, que proporcione una forma de derretir el hielo y la escarcha formados en el evaporador. Hay tres tipos: manual, automático y semiautomático.

CONTROL DE TEMPERATURA: Dispositivo termostático operado por temperatura, que abre o cierra un circuito automáticamente.

DESCONGELAMIENTO: Proceso de remover la acumulación de hielo o escarcha de los evaporadores.

DESECADO: Proceso mediante el cual se retira el porcentaje de agua contenido en un cuerpo.

DESERCIÓN: Acción de desertar, abandonar o desalojar, para este caso es el desalojo casi total de las ultimas trazas de vapor de agua contenidas en el producto a liofilizar.

DIFERENCIAL: La diferencia de temperatura o presión, entre las temperaturas o presiones de arranque y paro, de un control.

ENTALPÍA: La cantidad de calor en un kilogramo de sustancia, calculada de una base de temperatura aceptada. La temperatura de 0 °C, es una base aceptada para los cálculos del vapor de agua. Para cálculos de refrigeración, la base aceptada es de -40°C.

EVAPORACIÓN: Término aplicado al cambio de estado de líquido a vapor. En este proceso se absorbe calor.

EVAPORADOR: Componente del mecanismo de un sistema de refrigeración, en el cual, el refrigerante se evapora y absorbe calor.

GOLPE DE LÍQUIDO: Condición que se presenta cuando en un sistema de expansión directa, el exceso de refrigerante líquido sale del evaporador y entra al compresor, dañándolo.

HUMEDAD: Vapor de agua presente en el aire atmosférico.

LINEA DE ALTA: Partes de un sistema de refrigeración, que se encuentran bajo la presión de condensación o alta presión.

LINEA DE BAJA: Partes de un sistema de refrigeración, que se encuentran por abajo de la presión de evaporación o baja presión.

LÍNEA DE DESCARGA: En un sistema de refrigeración, es la tubería que acarrea el gas refrigerante, desde el compresor hasta el condensador.

LÍNEA DE LÍQUIDO: Tubería que acarrea refrigerante líquido, desde el condensador o recibidor, hasta el mecanismo de control de refrigerante.

LÍNEA DE SUCCIÓN: Tubería que acarrea refrigerante gaseoso, desde el evaporador hasta el compresor.

LIOFILIZACIÓN: Método de deshidratación en frío y al vacío, que sirve para conservar sin daño diversos materiales biológicos, conservando sus propiedades al rehidratarse.

POLIURETANO: Cualquier polímero de hule sintético, producido por la polimerización de un grupo HO y NCO, a partir de dos diferentes compuestos. En refrigeración, se utiliza como aislante y en productos moldeados.

PRESIÓN DE ALTA: Término empleado para referirse a la presión, a la cual se lleva a cabo la condensación, en un sistema de refrigeración.

PRESIÓN DE BAJA: Presión del lado de baja del ciclo de refrigeración, a la cual se lleva a cabo la evaporación.

PRESIÓN DE CONDENSACIÓN: Presión dentro de un condensador, a la cual el vapor de refrigerante, cede su calor latente de evaporación y se vuelve líquido. Esta varía con la temperatura.

PRESIÓN DE SUCCIÓN: En un sistema de refrigeración, se llama así a la presión a la entrada del compresor

PRESION DE VACÍO: Es la presión medida por debajo de la presión manométrica, cuando se extrae el aire o gas contenido en un recipiente cerrado.

REFRIGERANTE: Sustancia utilizada en los mecanismos de refrigeración. Este absorbe calor en el evaporador, cambiando de estado de líquido a vapor, liberando su calor en un condensador, al regresar de nuevo del estado gaseoso al estado líquido.

RESISTENCIAS ELÉCTRICAS: Elemento que se intercala en un circuito para dificultar el paso de la corriente o para hacer que esta se transforme en calor.

SENSOR: Material o dispositivo que sufre cambio en sus características físicas o electrónicas, al cambiar las condiciones circundantes.

SUBLIMACIÓN: Proceso de cambio de fase mediante el cual un cuerpo pasa del estado gaseoso al estado sólido sin pasar por líquido.

TEMPERATURA DE CONDENSACIÓN: Temperatura dentro de un condensador, en el que el vapor de refrigerante, cede su calor latente de evaporación y vuelve líquido. Esta varía con la presión.

TEMPERATURA DE EVAPORACIÓN: Temperatura a la cual un líquido cambia a gas

TERMOCUPLA: Es un transductor de temperaturas, es decir un dispositivo que convierte una magnitud física en una señal eléctrica. Esta constituida por dos alambres metálicos diferentes que unidos desarrollan una diferencia de potencial eléctrica entre sus extremos libres que es aproximadamente proporcional a la diferencia de temperaturas entre estas puntas y la unión.

TERMOSTATO: Dispositivo que detecta las condiciones de la temperatura ambiente, y a su vez, acciona para controlar un circuito.

TUBO CAPILAR: Tubo de diámetro interior pequeño, que se utiliza para controlar el flujo de refrigerante hacia el evaporador. Se utiliza, generalmente, en sistemas de refrigeración pequeños, tales como refrigeradores domésticos, unidades de aire acondicionado de ventana, etc.

VÁLVULA SOLENOIDE: Válvula diseñada para funcionar por acción magnética, a través de una bobina energizada eléctricamente. Esta bobina acciona un núcleo móvil, el cual abre o cierra la válvula.

RESUMEN

TÍTULO:

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN LIOFILIZADOR PILOTO PARA EL ESTUDIO DE PROCESOS DE DESHIDRATAACION Y CONSERVACION DE PRODUCTOS AGROINDUSTRIALES MEDIANTE SECADO AL VACIO *

AUTORES:

Rodolfo Renato Martínez Medina

Oscar Andrés Prada Rodríguez**

PALABRAS CLAVES:

Liofilización, Refrigeración, Vacío, Control.

DESCRIPCIÓN:

El presente proyecto está orientado hacia el estudio de la aplicabilidad de un proceso de deshidratación y conservación de productos agroindustriales mediante secado al vacío, mediante el diseño y construcción de un liofilizador piloto que permita reproducir el proceso de liofilización en condiciones iguales a un equipo industrial.

El liofilizador piloto es un sistema semiautomático de liofilización, que permite realizar la deshidratación de pequeñas muestras de productos agroindustriales mediante secado al vacío de manera óptima y eficiente. Consta de una estructura base y cuatro subsistemas principales que realizan las funciones básicas para realizar el proceso de liofilización: cámara de trabajo, sistema de refrigeración, sistema de vacío y sistema de calentamiento.

La operación se inicia con la alimentación del producto a liofilizar en la cámara de trabajo, en donde el sistema de refrigeración se encarga de llevar la temperatura del producto por debajo de -35°C y el sistema de vacío baja la presión de la cámara hasta un valor de 610 Pa, dentro de la cámara se encuentran las placas portabandejas, sobre las cuales se colocan las bandejas cargadas con el producto a liofilizar, una vez se ha llevado al producto a los valores de temperatura y presión requeridos dentro de la cámara de trabajo, el sistema de calentamiento que consiste en unas resistencias calefactoras instaladas debajo de las placas portabandejas, inicia el suministro de calor a los productos, se continúa manteniendo la cámara a baja presión y se eleva la temperatura hasta un valor próximo al del ambiente, la liofilización prosigue y el contenido de humedad del producto queda reducido hasta el 2%.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica, Ing. Omar Gélvez.

SUMMARY

TITLE:

DESIGN AND CONSTRUCTION OF A PILOT FREEZE-DRYING EQUIPMENT FOR THE STUDY THE CONTROL OF DEHYDRATION Y CONSERVATION PROCESS OF AGRICULTURAL PRODUCTS BY VACUUM DRYING *

AUTHORS:

Rodolfo Renato Martínez Medina

Oscar Andrés Prada Rodríguez **

KEY WORDS:

Freeze drying, Refrigeration, Vacuum, Control.

DESCRIPTION:

The present project is oriented to application study of a dehydration y conservation process of agricultural products by vacuum drying, by design and constuction of a pilot freeze-drying equipment that permit reproduce the freeze drying process in the same conditions that industrial equipment.

The pilot freeze-drying equipment it`s a freeze drying semiautomatic system, that permit to make the dehydration of the small agricultural product patterns by vacuum drying of the best and efficient way. It`s provide of a Basic structure and tour Basic subsystems that make the Basic functions to make the freeze drying process: work chamber, refrigeration system, vacuum system and heaating system.

The operation begin whit the charge product to freeze drying in the work chamber, were the refrigeration system carry the product temperature below -35°C and the vacuum system below the chamber pressure to 610 Pa, into chamber is located the Shelves plaques, put the product charged whit the product to freeze drying over it, one time the product it`s carry to temperatore and pressure required values into work chamber, the heating system that consist in a heating resistances installed below the shelves plaques, begin the heat supply to the products, then the chamber most keep a low pressure and the temperature it,s raise until proximal environment value, the freeze drying continues and moisture product content it`s reduced until 2%.

* Degree Project

** Physical-mechanical Engineerías Faculty, Mechanical Engineering, Eng. Omar Gélvez A.

INTRODUCCION

Con el objetivo de contribuir con la misión de la Universidad Industrial de Santander, de atender las necesidades de la comunidad, grupos de investigación y de contribuir con el desarrollo del sector agroindustrial del país y tomando en cuenta la creciente competencia en el mercado local actual, la cual exige a los fabricantes buscar alternativas para incrementar su competitividad; se desarrolla este trabajo de grado para dar solución a una necesidad que nace principalmente en la pequeña y mediana industria alimentaria; específicamente con el diseño de plantas de liofilización las cuales son la base para lograr la obtención de nuevos productos agroindustriales con alto nivel de calidad.

Debido a que los procesos de producción actuales se realizan con métodos de deshidratación convencionales que afectan directamente la productividad ya que son realizados a temperaturas elevadas que alteran las características organolépticas y provocan pérdidas del valor nutritivo de los productos, se orienta este proyecto hacia la investigación de la aplicabilidad de un proceso de liofilización en el medio local, trabajando en el desarrollo de nuevos productos agroindustriales que pueden derivarse de esta novedosa tecnología generando así una importante alternativa agroeconómica para el país.

Un liofilizador piloto es un equipo multifuncional que permite la liofilización de pequeñas producciones, para el estudio de mercado de nuevos productos, en condiciones idénticas que los equipos industriales. Puede ser utilizado como planta de investigación para el estudio o conservación de productos sensibles de producción especial, o como planta piloto, ya que permite reproducir los procesos en todas sus magnitudes para el estudio de curvas de liofilización en aplicación industrial.

De esta manera, el propósito del presente trabajo de grado radica en integrar los conocimientos teóricos y prácticos de los estudiantes de Ingeniería Mecánica en el área de la refrigeración y aire acondicionado, con la realización del estudio de la aplicabilidad del proceso se realizó el diseño y construcción de un liofilizador piloto, que además de permitir reproducir los procesos en condiciones iguales a un equipo industrial de una forma eficiente y práctica, presenta como características principales su fácil manejo y ergonomía para crear un entorno agradable de trabajo para

los estudiantes que realicen los posteriores estudios del proceso de liofilización.

En este documento se muestra todo el proceso de diseño y construcción para el liofilizador piloto. Inicialmente se exponen de forma completa todos los fundamentos teóricos de la liofilización, lo cual es la base de partida para el posterior proceso de diseño, en el siguiente capítulo se realiza el análisis del proceso de liofilización como tal, lo que permite fijar los parámetros y requerimientos base para crear las especificaciones del diseño del liofilizador piloto.

Posteriormente en el capítulo tres se presenta la evolución del proyecto y el análisis de cada una de las alternativas planteadas como solución, luego; en el capítulo cuatro se muestra el todo el proceso de diseño básico y detallado en donde se realizan los cálculos y procesos de selección de elementos componentes del equipo. Más adelante se presenta la argumentación del diseño final haciendo la descripción del sistema operativo del liofilizador piloto y sus componentes, y para terminar en el capítulo seis se presentan todas las herramientas para la construcción del sistema de tendido.

Por ultimo se presenta la formulación de conclusiones y recomendaciones obtenidas a lo largo del desarrollo del diseño del liofilizador.

1. FUNDAMENTOS DE LA LIOFILIZACION

La liofilización es un método de secado en frío que sirve para conservar diversos materiales biológicos, empleado para deshidratar alimentos líquidos sensibles y costosos, como el café y los jugos, o para secar alimentos sólidos costosos, como frutas, camarones, pollo, champiñones rebanados y en ocasiones piezas grandes como bistecs o chuletas. Estos alimentos además de colores y sabores delicados, tienen atributos de textura y apariencia que no pueden conservarse mediante ningún otro método actual de secado.

La liofilización se desarrolló para deshidratar y conservar sin que se presenten pérdidas de los compuestos responsables de los aromas en los alimentos, los cuales se perdían en las operaciones convencionales de secado. Este tipo de secado se introdujo inicialmente a gran escala en la década de 1940 para la producción de plasma seco y productos de sangre, después, antibióticos y materiales biológicos se prepararon a escala industrial por liofilización.

Por ejemplo, una fruta fina, es blanda, frágil y está compuesta casi completamente por agua. Cualquiera de los métodos tradicionales de secado que emplean calor causaría en las frutas un alto grado de encogimiento, deformación y pérdida de la textura natural. Al reconstituirse esas fresas no tendrían ya su color, sabor y turgencia naturales y se parecerían más a una mermelada. Esto se puede prevenir en gran parte deshidratando la fruta en estado congelado de manera que no pueda encogerse o deformarse mientras esta perdiendo su humedad.

El proceso de la liofilización consiste en desecar un producto previamente congelado, por medio de la sublimación del hielo bajo vacío; lográndose por lo tanto el paso directo del hielo (sólido) a gas (vapor), sin que en ningún momento aparezca el agua en su estado líquido. Se obtiene una masa seca, esponjosa de más o menos el mismo tamaño que la masa congelada original, mejorando su estabilidad y siendo fácilmente redisuelta en agua.

Un producto liofilizado que ha sido adecuadamente empaquetado puede ser almacenado durante tiempos ilimitados, reteniendo la mayoría de propiedades físicas, químicas, biológicas y sensoriales de su estado fresco; además, el uso de bajas temperaturas también reduce la desnaturalización de proteínas en este tipo de secado.

Los productos liofilizados se conservan con muy bajo peso y a temperatura ambiente y pueden volver a su estructura original por adición de agua. La estructura esponjosa del producto liofilizado permite una rápida rehidratación del mismo. Las características del producto rehidratado son análogas a las que poseía el producto fresco. La porosidad de los productos liofilizados permite una rehidratación mucho más completa y rápida que la de los alimentos secados con aire.

Algunos de los productos comerciales obtenidos por liofilización son extractos (de café y té), verduras, frutas, carnes y pescado. Estos productos son ligeros, poseen de un 10% a 15% del peso original y no requieren refrigeración; incluso se puede llegar a obtener productos con humedad inferior al 2%.

1.1. PRINCIPIO DEL PROCESO DE LIOFILIZACION

El principio en que se basa el proceso de liofilización es que a ciertas condiciones de baja temperatura y presión de vapor, el agua se evapora del hielo sin que este se derrita. Cuando un material pasa directamente del estado sólido al estado gaseoso sin pasar por la fase líquida, se dice que el material se sublima.

Si la presión de vapor de agua del alimento se mantiene por debajo de 4,58 Torr (610,5 Pa) y el agua se halla congelada a 0°C o más abajo, cuando el alimento se calienta el hielo se sublima directamente a vapor sin llegar a fundirse.

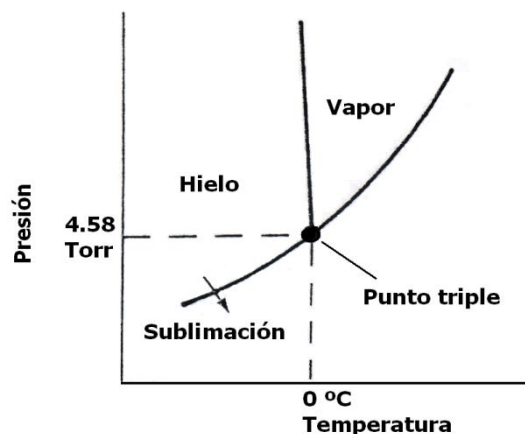


Figura 1. Diagrama de fases del agua.

Fuente: Tecnología del procesamiento de los alimentos, Principios y Prácticas. Peter Fellows, 1994

Bajo estas condiciones, el agua permanece congelada y la rapidez con que las moléculas del agua salen del bloque de hielo es mayor que la de las moléculas del ambiente que vuelven a incorporarse al bloque congelado.

Dentro de la cámara al vacío se aplica calor al alimento congelado a fin de acelerar la sublimación, y se mantiene el vacío suficientemente alto, o sea, generalmente dentro de la escala de aproximadamente 0,1 a 2 mm Hg, y se controla el calor de manera que su intensidad sea un poco menor que la que se requeriría para derretir el hielo, se alcanzará casi la velocidad máxima de sublimación del vapor de agua. La sublimación tiene lugar desde la superficie del hielo, de manera que, al proseguir, el límite del hielo se va retirando hacia el centro del alimento, es decir que el alimento se deshidrata desde la superficie hacia adentro. Finalmente el último resto de hielo se sublima y la humedad del alimento queda reducida a menos del 5%.

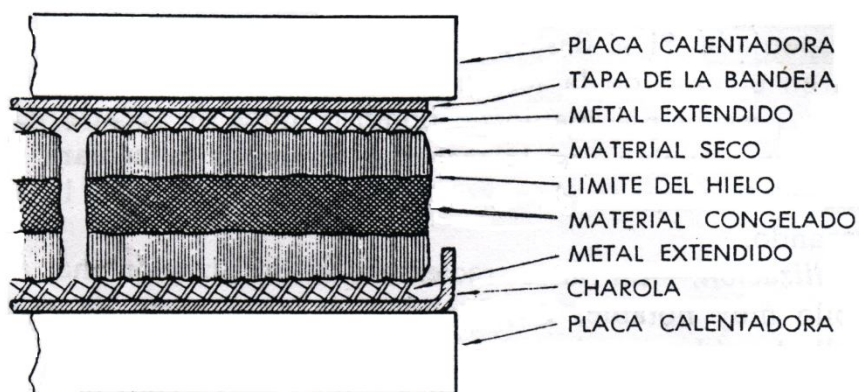


Figura 2. Ilustración de una pieza de alimento en proceso de liofilización.

Fuente: Ciencia de los Alimentos. Norman N. Potter, 1970

Ya que el alimento congelado permanece rígido durante la sublimación, las moléculas de agua que se escapan dejan huecos, lo cual resulta en una estructura seca, porosa y esponjosa. Por eso, los alimentos liofilizados se reconstituyen rápidamente pero tienen que ser protegidos mediante un envase adecuado contra la absorción de humedad atmosférica y oxígeno.

Hoy en día las compañías alimentarias que desean instalar un equipo de liofilización en gran escala tienen que examinar el proceso desde un punto de vista global que abarca todos los sistemas relacionados. Estos incluyen el manejo de los materiales, la operación de congelación, la carga de las bandejas secadoras, la operación de deshidratación, las necesidades de alto vacío y la condensación, la descarga de las bandejas, las necesidades del

envasado y, por supuesto, los costos del equipo, la mano de obra y los servicios auxiliares.

1.2. ETAPAS DE LA LIOFILIZACIÓN

En el proceso de liofilización la congelación inicial debe ser muy rápida con el objeto de obtener un producto con cristales pequeños y en un estado amorfo. Las etapas de secado se realizan a presiones bajas para permitir la sublimación del hielo. El proceso de liofilización total de un producto se compone de tres fases principales.

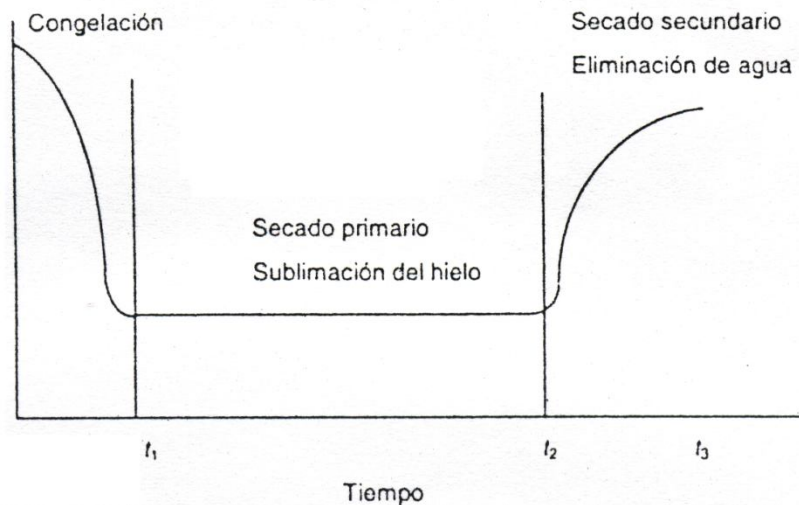


Figura 3. Etapas de la liofilización.

Fuente: Deshidratación de alimentos. Gustavo Barbosa, 2000

1.2.4. Congelación Inicial

La primera fase de la liofilización es la congelación del alimento en una instalación convencional. El tiempo de duración y el tipo de instalación empleada dependen de varios factores como la cantidad, concentración y naturaleza propia del producto. La temperatura de congelación para los alimentos es mas baja que para el agua pura, ya que los solutos del agua no congelada se van concentrando y la temperatura de congelación va disminuyendo continuamente hasta que la solución queda congelada. Al final de la congelación la masa entera del producto se ha convertido en rígida, formando un eutéctico, que consiste en cristales de hielo y componentes del alimento. Se requiere llegar al estado eutéctico para asegurar la eliminación

de agua solo por sublimación y no por combinación de sublimación y evaporación.

Los alimentos de pequeño tamaño se congelan más rápidamente dando lugar a cristales pequeños que dañan menos su estructura. En los alimentos líquidos se procura que la congelación sea lenta, con objeto de que se forme una red cristalina que da lugar a la formación de unos canales por los que el vapor de agua pueda escapar.

En general podemos decir que una congelación adecuada es la base de que el producto liofilizado presente óptimas condiciones de aspecto, conservación de sus propiedades y rápida rehidratación.

1.2.5. Sublimación o desecación primaria

Es la etapa en que la mayor parte del agua libre pasa a vapor. Si la presión de vapor de agua del alimento se mantiene por debajo de 4,58 torr (610,5 Pa) y el agua del alimento se halla congelada, cuando el alimento se calienta el hielo se sublima directamente a vapor sin llegar a fundirse debido a la baja presión en la cámara de secado. El evaporador previene el retorno del vapor de agua hacia el producto. La fuerza impulsora de la sublimación es la diferencia de presión entre la presión de vapor de agua en la interfase del hielo y la presión parcial del vapor de agua en la cámara de secado. La energía para la sublimación del hielo es suministrada por radiación o conducción a través del producto congelado.

En esta fase el producto se sublima hasta un contenido en agua del 15% (sobre su peso húmedo).

Los parámetros temperatura, presión y tiempo pueden ser modificados independientemente pero están íntimamente relacionados, no es posible modificar, sin que se afecten los otros, por lo que en todo momento deben ser considerados conjuntamente y analizados sus efectos.

1.2.6. Desorción o desecación secundaria

La etapa secundaria del secado comienza cuando se ha agotado el hielo en el producto y la humedad proviene del agua parcialmente ligada en el material que se está secando, su misión es eliminar las últimas trazas de vapor de agua, evaporando el agua no congelada ligada al producto. Se lleva a cabo manteniendo el liofilizador a baja presión y elevando la temperatura hasta un valor próximo al del ambiente.

Manteniendo la presión en el liofilizador por debajo de la presión de vapor en la superficie del hielo (mediante una bomba de vacío) y condensando el vapor mediante un condensador de serpentín (a baja temperatura) se consigue que la liofilización prosiga y el frente de sublimación se traslada hacia el interior del alimento y el calor latente para la sublimación se conduce

hasta allí por conducción. El vapor de agua escapa del alimento a través de los canales formados por la sublimación del hielo.

En la desecación que se produce por deshidratación evaporativa del agua no congelada, el contenido en agua se reduce hasta el 2% (sobre su peso húmedo).

1.3. TERMODINAMICA DEL PROCESO DE LIOFILIZACION

Cada producto debe congelarse de una manera tal que garantice que sufrirá pocas alteraciones en el proceso posterior de sublimación. Se debe conocer con precisión: la temperatura en la que ocurre la máxima solidificación, la velocidad óptima de enfriamiento, y la temperatura mínima de fusión incipiente. Se busca que el producto ya congelado tenga una estructura sólida sin intersticios en los que haya líquido concentrado para propiciar que todo el secado ocurra por sublimación.

El paso de hielo a vapor requiere gran cantidad de energía que suministrada en alto vacío pues la interfase de secado se mueve hacia el interior de la muestra y el calor tiene que atravesar capas congeladas (sistemas liofilizados en bandeja, sin granular) o secas (en granulados), generándose un considerable riesgo de fusión del material intersticial o quemar la superficie del producto que ya está seco.

Cuando en el proceso de liofilización se comienza el calentamiento empieza a formarse un frente de sublimación o interfase entre la capa seca y la capa congelada del producto el cual avanza progresivamente, y para un determinado instante, a una temperatura de interfase (TS) le corresponde una determinada Presión de saturación (P_i).

1.3.1. Transferencia simultánea de Calor y Materia.

Los fenómenos de transferencia de materia y calor durante la liofilización se pueden resumir en términos de difusión de vapor de agua del frente de sublimación y la radiación y conducción del calor de la placa radiante.

La transferencia de masa ocurre por la migración de vapores a través de la capa seca del producto bajo la acción de una diferencia de presión, esta transferencia es alta cuando la diferencia de presión es grande.

Como en todo proceso de secado, coexisten los fenómenos de transferencia de calor y materia, la curva de transferencia de calor en función del tiempo se

obtiene multiplicando la cantidad de agua sublimada por su correspondiente calor de sublimación o desorción.

1.3.1.1. Modelo de estado estacionario.

La energía requerida para mantener la sublimación se supone que es igual al flujo radiante o conductivo debido al gradiente de temperaturas entre el producto congelado y la fuente de calor en la cámara de secado. El agua se sublima por debajo del punto triple bajo presiones de 611 Pa o menores. La interfase de sublimación está localizada por encima del frente de hielo y la eliminación de agua tiene lugar cerca o en la interfase de sublimación.

El flujo de calor debido a la convección y conducción en la superficie de sublimación se puede expresar como:

$$q = h(T_e - T_s) = k \frac{(T_s - T_f)}{(L_2 - L_1)}$$

donde q es la densidad de flujo de calor (W/m^2), h es el coeficiente externo de transmisión de calor por convección (W/m^2K), T_e es la temperatura externa de vaporización del gas ($^{\circ}C$), T_f es la temperatura de sublimación del frente de hielo ($^{\circ}C$), k es la conductividad térmica del sólido seco ($W/m K$), y $(L_2 - L_1)$ es el espesor de la capa seca (m).

Cuando el calor llega al frente de sublimación la temperatura y la presión de vapor en él aumentan. Como consecuencia de ello el vapor se desplaza desde el alimento a la zona de baja presión de la cámara de liofilización. Un gramo de hielo da lugar a 2 m³ cúbicos de vapor a una presión de 67 Pa. Por ello en la liofilización comercial se hace preciso eliminar varios centenares de metros cúbicos de vapor por segundo, que deberán escapar a través de los poros del alimento liofilizado. En la liofilización se deben considerar tres variables de diseño importantes (1) La presión de vacío en el interior de la cámara de secado, (2) El flujo de energía radiante aplicado al producto (que debe ser lo más elevada posible pero sin que provoque la descongelación), y (3) La temperatura del condensador de vapor (tanto la presión como la temperatura deberán ser lo más bajas posible).

En la práctica la presión y la temperatura más bajas utilizables, económicamente compatibles, son 13 Pa y $-35^{\circ}C$, respectivamente.

En teoría, la temperatura del hielo debería elevarse hasta un valor, justo por debajo de su punto de descongelación. Sin embargo, por encima de una determinada temperatura crítica los solutos concentrados del alimento poseen suficiente movilidad como para permitir su migración por acción de las fuerzas que se desarrollan durante el proceso. Cuando ello sucede, la estructura del alimento se colapsa inmediata e irreversiblemente, lo que reduce la velocidad de transferencia de vapor, y detiene, en consecuencia, la deshidratación. En la práctica, por tanto, existe una temperatura máxima que el hielo no debe superar, una temperatura mínima para el condensador y una presión mínima en el liofilizador. Todas ellas controlan la velocidad de transferencia de masa.

Durante la liofilización el contenido de agua cae desde su valor inicial en la zona congelada, a un valor inferior en la capa liofilizada, que depende de la presión de vapor en el liofilizador. Cuando el calor se transmite a través de la capa de alimento liofilizado, la relación existente entre la presión de liofilizador y la de la superficie del hielo viene determinada por esta fórmula:

$$P_i = P_s + \frac{k_d}{b\lambda_s}(\theta_s - \theta_i)$$

En ella, P_i (Pa) representa la presión parcial del vapor de agua en el frente de sublimación, P_s (Pa) la presión parcial del agua en la superficie, b ($\text{Kg s}^{-1} \text{m}^{-1}$) la conductividad térmica de la capa liofilizada, λ_s (J Kg^{-1}) el calor latente de sublimación, θ_s ($^{\circ}\text{C}$) la temperatura de la superficie del alimento y θ_i ($^{\circ}\text{C}$) la temperatura del frente de sublimación.

El tiempo de liofilización se obtiene por la siguiente ecuación:

$$t_d = \frac{x^2 \rho (M_1 - M_2) \lambda_s}{8k_d (\theta_s - \theta_i)}$$

En esta expresión t_d (s) representa el tiempo de liofilización, x (m) el grosor del alimento, ρ (Kg m^{-3}) la densidad másica del alimento deshidratado, M_1 el contenido de agua inicial y M_2 el contenido final de agua de la capa liofilizada.

1.4. INSTALACIONES

Los liofilizadores consisten esencialmente en una cámara al vacío, dotada de unas bandejas donde se coloca el alimento a liofilizar y de unos calentadores para suministrar el calor latente de sublimación. Para la condensación del vapor se emplean serpentines refrigerantes dotados de un sistema automático de descongelación con objeto de mantenerlos libres de hielo, para que su capacidad de condensación se mantenga. Este aspecto es muy importante ya que la mayor parte del gasto energético se emplea para la refrigeración de los condensadores y, por tanto, el rendimiento de un liofilizador viene determinado por la eficacia del condensador.

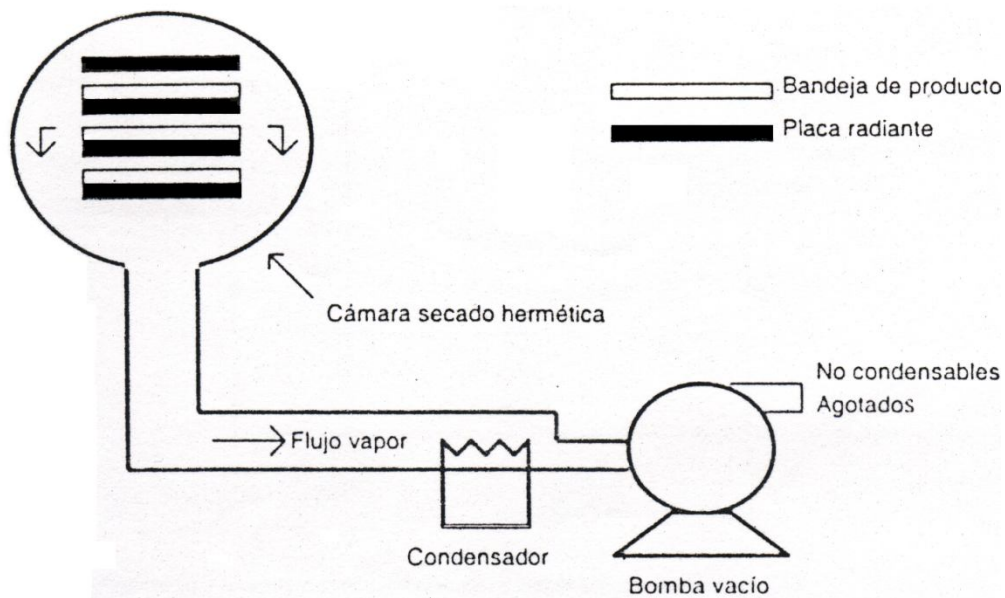


Figura 4. Sistema Básico de Liofilización.

Fuente: Deshidratación de alimentos. Gustavo Barbosa, 2000

Los vapores no condensables son eliminados mediante bombas de vacío. Los liofilizadores se caracterizan por el método utilizado para el suministro calórico a la superficie del alimento. Los sistemas más corrientemente empleados son. La conducción y la radiación. En la actualidad se están poniendo a punto liofilizadores de calentamiento por microondas. De cada tipo de liofilizador existen versiones de funcionamiento discontinuo y continuo. En las instalaciones discontinuas las bandejas se cargan con el producto congelado, se cierra la cámara de liofilización hermética y se hace el vacío, se lleva a la temperatura de secado durante el tiempo especificado para

el ciclo. Al final del ciclo de secado se llena la cámara con un gas inerte y a continuación se abre. Entonces el producto se saca de la cámara y es envasado.

Las condiciones adecuadas para la liofilización dependen del alimento, pero su temperatura superficial no debe superar en ningún caso, los 60°C. En los sistemas de liofilización continuos la entrada y salida de las bandejas se efectúa a través de compuertas de seguridad. Las bandejas circulan, colocadas entre placas calefactoras, en vagonetas que circulan sobre unos rieles a través de distintas zonas de calentamiento de una cámara que se mantiene al vacío.

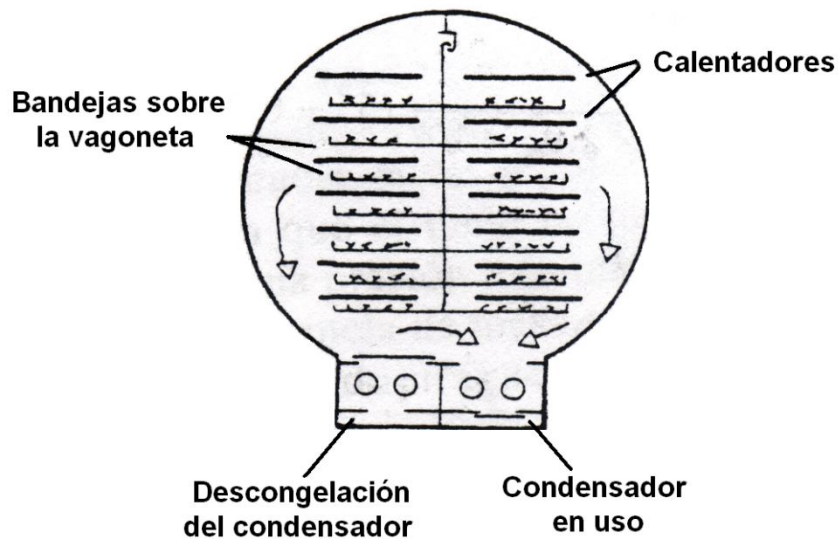


Figura 5. Liofilizador continuo.

Fuente: Tecnología del procesamiento de los alimentos, Principios y Prácticas. Peter Fellows, 1994

Las temperaturas de calentamiento y el tiempo de permanencia en cada zona se programan previamente para cada alimento y un microordenador mide y controla el tiempo de liofilización, la temperatura, presión en la cámara y la temperatura en la superficie del producto.

1.4.1. Instalaciones Industriales

Recientes avances en la práctica industrial se enfocan a métodos continuos de secado ya que son menos laboriosos y menos costosos que los procesos discontinuos. Existen dos tipos de secaderos continuos: secadero de bandeja, donde el producto se coloca en bandejas que se mueven a lo largo del secadero de forma continua, y dinámicos o secaderos sin bandejas, donde el

producto se mueve a través del secadero mediante cintas, placas circulantes, placas vibratorias, lecho fluidizado y pulverizado.

Las Figuras 6 y 7, presentan algunas de las unidades industriales más corrientes utilizadas para el procesado de productos liofilizados. La mayoría de las instalaciones industriales tienen una cámara de congelación separada de la de secado, para acelerar la etapa inicial del proceso de liofilización. La congelación se realiza mediante tambores y cintas (enfriamiento de contacto) o con bandejas (enfriamiento conectivo por circulación de aire frío). Entonces el material precongelado se carga al secadero y se procesa. El producto se mueve en las bandejas o cintas dependiendo del tipo de secadero.

Otra aplicación muy utilizada en la actualidad en los procesos industriales es la liofilización atmosférica, el proceso consiste en mezclar en una columna finas partículas de adsorbente fluidizadas y producto congelado. Gas seco y frío (aire o nitrógeno) se utilizan como medio de fluidización mientras que la columna es enfriada. El calor de adsorción aporta el calor de sublimación requerido. El secado se realiza de forma automática cuando la presión parcial de agua y la temperatura descienden lo suficiente.



Figura 6. Liofilizador de producción Telstar, serie Lyogamma.

Fuente: catálogo TELSTAR INDUSTRIAL / Lyogamma



Figura 7. Secadero al vacío Industrial - e&e verfahrenstechnik GmbH.

Fuente: www.eunde-verfahrenstechnik.de/bilder/trockne

1.5. SUBSISTEMAS DE UN EQUIPO DE LIOFILIZACION

Un equipo convencional de liofilización se caracteriza por una construcción compacta formada por varios sistemas que cumplen diversas funciones para dar lugar al proceso de liofilización, estos sistemas son:

- Cámara de trabajo.
- Sistema de bandejas.
- Sistema de calentamiento.
- Sistema de vacío.
- Sistema de refrigeración.
- Sistema de control.
- Sistema de descongelamiento.

1.5.1. Cámara de Trabajo

La cámara de trabajo es el lugar en el cual se realiza el enfriamiento y posterior vaciado del producto a liofilizar, dentro de ella se encuentran el sistema de bandejas, el sistema de calentamiento y el sistema de condensado del vapor.

Esta cámara se clasifica según su configuración geométrica y según la ubicación de su sistema de condensación:

Según su configuración geométrica:

- Sistema de Cámara Redonda o Cilíndrica.
- Sistema de Cámara Rectangular.
- Sistema Especial para Laboratorio.

Según la ubicación de su sistema de condensación:

- Sistema de Simple Cámara.
- Sistema de Doble Cámara

Todas estas configuraciones son fabricadas siempre de acero inoxidable y/o acrílico (cámaras para laboratorio).

1.5.1.1. Según Configuraciones Geométricas.

1.5.1.1.1. Sistema de cámara redonda o cilíndrica

Es el diseño más utilizado a nivel industrial por su perfecto sello hermético, es más costoso en cuanto a construcción comparado con el diseño rectangular, también en liofilizadores piloto por su pequeño tamaño.



Figura 8. Cámara redonda industrial.

Fuente: www.eunde-verfahrenstechnik.de/bilder/trockne

1.5.1.1.2. Sistema de cámara Rectangular.

Es un diseño muy utilizado en liofilizadores piloto, por su facilidad de diseño y construcción, además por su bajo costo.



Figura 9. Modelo de cámara rectangular con visor para el control del proceso.

Fuente: www.hvd-pharma-food.de

1.5.1.1.3. Sistema de cámara Especial Para Laboratorio.

En su mayoría estas cámaras son fabricadas en acrílico y diseñados especialmente para la conservación de muestras en biotecnología y ciencias de la salud como el cuidado de células madres entre otros, contienen unos frascos o ampollas para el secado de productos en estado líquido, pero también se tiene la opción de introducirlos congelados a las bandejas que se muestran las figuras.



Figura 10. Liofilizadores de laboratorio para ampollas o bandejas.

Fuente: www.freezedriers.com

1.5.1.2. Según ubicación del sistema de condensación.

1.5.1.2.1. Sistema de Simple Cámara

En el sistema de cámara simple el condensador se encuentra en las paredes de la cámara de trabajo, haciendo el liofilizador un poco mas compacto, tiene un sistema de descongelamiento por agua caliente para derretir la capa de hielo que se forma en las paredes del condensador finalizado el proceso de secado del producto, el vapor extraído por el vacío es llevado hacia las paredes de la cámara ya que el ducto de vacío esta conectado al lado del condensador.

El sistema de simple cámara tiene alta capacidad de secado y bajo costo energético, puede ser utilizado tanto en liofilizadores grandes como pequeños.

El tiempo de liofilización es mas corto debido a que el condensador rodea la cámara de vaciado.



Figura 11. Sistema de simple cámara cilíndrica.

Fuente: www.freezedriers.com

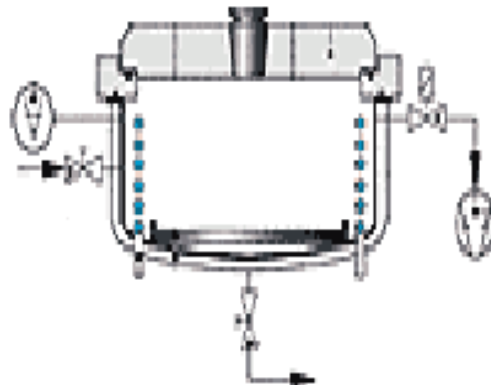


Figura 12. Sistema de simple cámara de laboratorio.

Fuente: www.freezedriers.com

1.5.1.2.2. Sistema de Doble Cámara

En el sistema de doble cámara, la cámara de condensación está separada de la cámara de secado haciendo más grande el liofilizador y por lo general se encuentra debajo de esta, pero debe tener una sección grande de comunicación entre estas para evitar grandes diferencias de presión, este sistema es mucho más eficiente y económico; en la parte de abajo de la cámara de condensado tiene un ducto de descarga de condensado o drenaje y en la parte superior tiene un sistema de descongelamiento y la cámara de condensado puede ser supervisada con una puerta adicional en esta.

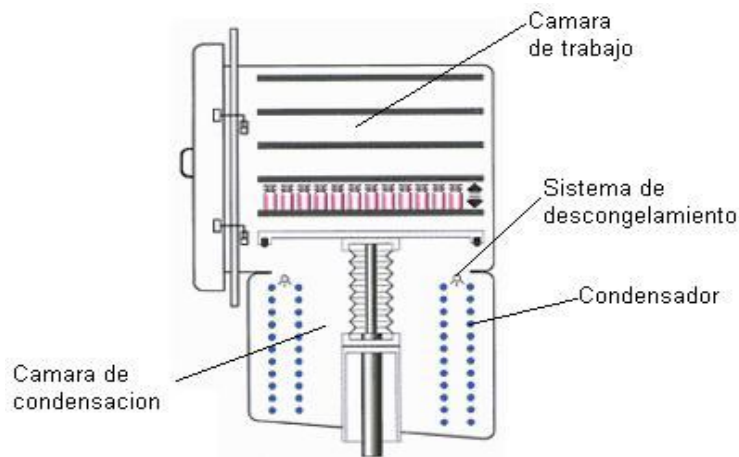


Figura 13. Sistema de doble cámara rectangular.

Fuente: www.freezedriers.com

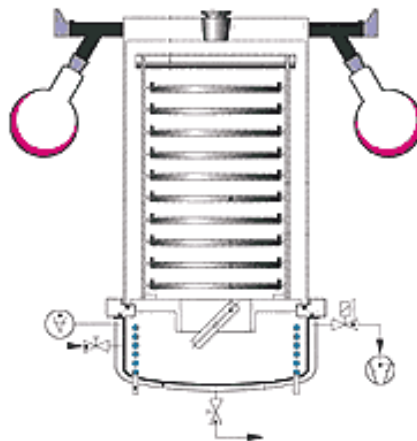


Figura 14. Sistema de simple cámara de laboratorio.

Fuente: www.freezedriers.com

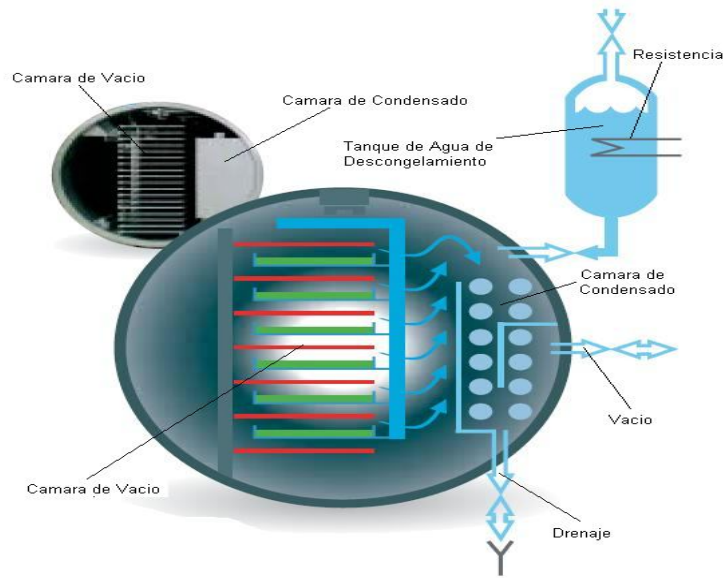


Figura 15. Sistema de doble cámara tipo cilíndrico con descongelamiento por agua caliente.

Fuente: catálogo ATLAS RAY. Freeze Drying.

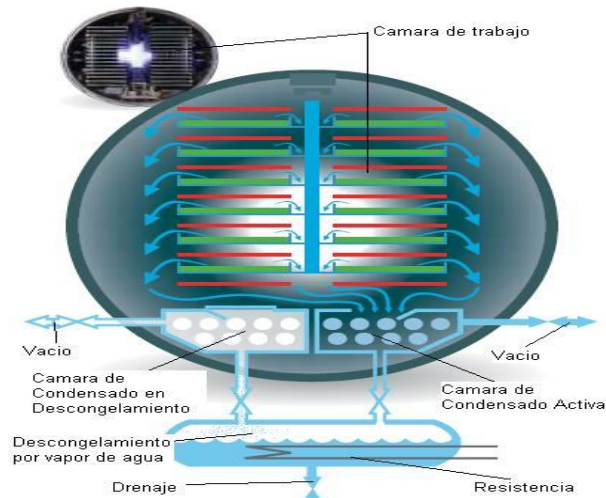


Figura 16. Sistema de doble cámara tipo cilíndrico con descongelamiento continuo.

Fuente: catálogo ATLAS RAY. Freeze Drying.

En este tipo de cámara el vapor extraído es llevado hacia la cámara de condensado ya que la bomba de vacío se conecta a esta cámara, existen dos tipos de sistemas de doble cámara en cuanto al sistema de descongelamiento:

- El sistema de descongelamiento al finalizado el proceso (fig 3,4 y 5) el cual, al terminar la liofilización abre la válvula que conecta el tanque de agua caliente y deja pasar esta hacia el condensador, derritiendo la capa de hielo formada en el proceso.
- El sistema CDI (Continuous De-Icing system) tiene dos cámara condensadoras, las cuales se alternan para que mientras una esta condensando vapor, la otra esta en descongelamiento, este proceso es totalmente automático, y se controla midiendo la capa de hielo formada en el condensador, en este caso el condensador es descongelado con vapor, y el condensado cae directamente el tanque de agua el cual también tiene un sensor de nivel que abre la válvula de drenaje al superar cierto nivel de agua en el tanque.

NOTA (descongelamiento): Ambos sistemas de cámara, tienen subsistemas de descongelamiento del agua por tres formas diferentes que pueden ser adaptados al liofilizador, estos tres subsistemas son: Descongelamiento por fluido caliente, Descongelamiento por vapor de agua, o descongelamiento por gas caliente.

1.5.2. Sistema de Bandejas.

El sistema de bandejas es el compartimiento en el cual se colocan los productos que van a ser sometidos al proceso de liofilización, en los equipos liofilizadores continuos la entrada y salida de las bandejas se efectúa a través de compuertas de seguridad. Las bandejas circulan, colocadas entre placas calefactoras sobre unas guías en la cámara de trabajo.



Figura 17. Sistema de simple cámara de laboratorio.

Fuente: catálogo ATLAS RAY. Freeze Drying.

Como se puede ver en la imagen la temperatura de las bandejas y por lo tanto del producto son controlados por termocuplas ubicadas estratégicamente a una distancia específica de manera que no haya errores o diferencias grandes de temperatura y la temperatura de la bandeja sea homogénea.

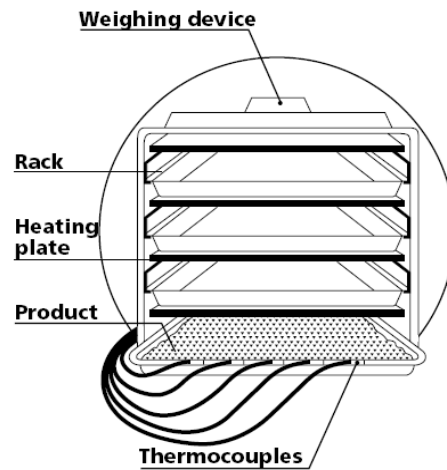


Figura 18. Detalle de ubicación de termocuplas en las bandejas.

Fuente: catálogo ATLAS RAY. Freeze Drying.

Las bandejas por lo general tienen un solo diseño, pero de acuerdo a su sistema de transmisión de calor hacia el alimento presentan ciertas variaciones en su forma.

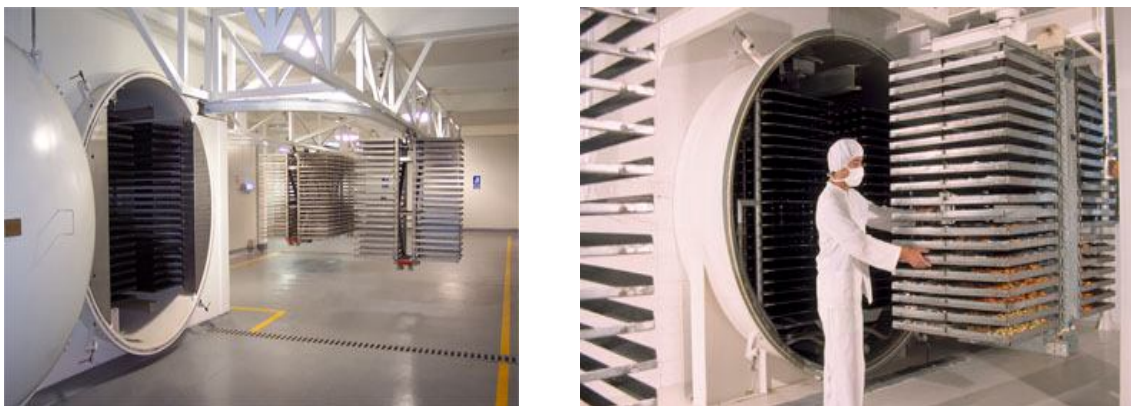


Figura 19. Sistema de bandejas en un proceso de liofilización industrial.

Fuente: catálogo ATLAS RAY. Freeze Drying.

1.5.3. Sistema de Calentamiento del producto (Portabanderas)

El sistema de calentamiento de las bandejas se utiliza para realizar la tercera parte del proceso de liofilización (Desecación o desecación secundaria), este sistema comienza su funcionamiento en el momento que el sistema de control detecta la temperatura y presión deseada.

Este sistema se clasifica según su fuente de calor de la siguiente manera:

- Sistema de Calentamiento por Resistencias Eléctricas.
- Sistema de Calentamiento por Líquido calefactor.

El sistema de Calentamiento por resistencias eléctricas a su vez se divide en cuatro tipos, de acuerdo a la forma de calentamiento del producto:

- Calentamiento por contacto directo.
- Calentamiento por sistema acelerado.
- Calentamiento por radiación.
- Calentamiento Dieléctrico y por microondas.

1.5.3.1. Sistema de calentamiento por resistencias eléctricas.

Dentro de este modelo de sistema de calentamiento hay cuatro formas diferentes de transferencia de calor hacia el producto, y de acuerdo a eso el diseño de la bandeja varía, estos modelos son:

1.5.3.1.1. Calentamiento por contacto directo.

En este sistema, el alimento va colocado en bandejas compartimentadas que descansan sobre placas calefactoras. En estas instalaciones la liofilización es más lenta, ya que el calor se transmite por conducción tan solo por una cara del alimento. Además, el contacto entre el alimento a congelar y la superficie calefactora es desigual, lo que reduce la velocidad de transferencia calórica. Por otra parte, se produce también una caída de presión en la masa de alimento, que provoca diferencias entre la velocidad de liofilización de la capa superior e inferior.

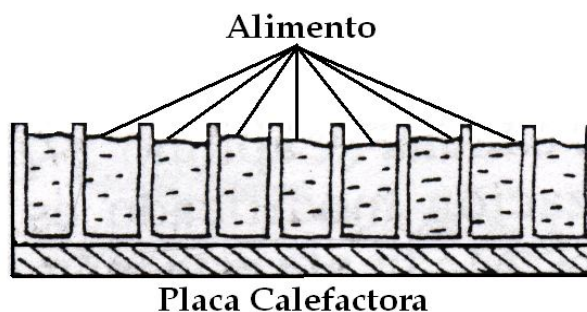


Figura 20. Calentamiento por contacto directo a través de una bandeja compartimentada.

Fuente: Tecnología del procesamiento de los alimentos, Principios y Prácticas. Peter Fellows, 1994

1.5.3.1.2. Calentamiento por sistema acelerado.

En estas instalaciones entre el alimento y las placas calefactoras existe una malla metálica. Esto hace que la transferencia de calor sea más rápida que a través de placas continuas y que el vapor se elimine de la superficie del alimento con mayor facilidad, lo que reduce el tiempo de liofilización.

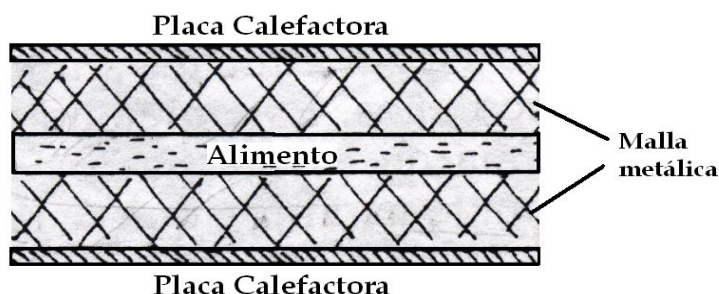


Figura 21. Calentamiento por sistema acelerado mediante malla metálica.

Fuente: Tecnología del procesamiento de los alimentos, Principios y Prácticas. Peter Fellows, 1994

1.5.3.1.3. Calentamiento por radiación.

En estas instalaciones el alimento, distribuido en bandejas en capas de poco grosor se calienta por radiación. Este sistema de calentamiento es más uniforme que por conducción ya que las irregularidades de la superficie de la superficie del alimento influyen aquí menos sobre la velocidad de transferencia calórica. Además, no se produce una caída de presión en la masa del alimento, por lo que las condiciones de liofilización se mantienen

constantes. Por otra parte, no es preciso que exista un contacto íntimo entre el alimento y la superficie calefactora, por lo que pueden utilizarse bandejas planas, que son más baratas y de más fácil limpieza.

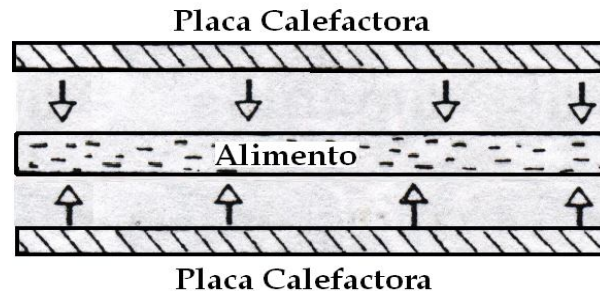


Figura 22. Calentamiento de las bandejas por radiación.

Fuente: Tecnología del procesamiento de los alimentos, Principios y Prácticas. Peter Fellows, 1994

1.5.3.1.4. Calentamiento Dieléctrico y por microondas:

Los calentadores dieléctricos y por microondas tienen una aplicación potencial en la liofilización pero hasta el momento no han sido utilizados para este propósito en instalaciones industriales. La liofilización por microondas es un proceso difícil de controlar ya que el factor de pérdida del agua es más elevado que el del hielo y si en algún punto del alimento llegara a fundirse se provocaría una reacción de sobrecalentamiento en cadena.

1.5.3.2. Sistema de calentamiento por fluido calefactor

En este sistema de calentamiento, las bandejas son calentadas por contacto directo pero esta vez la fuente de calor es un serpentín bien distribuido a lo largo del portabanderas, el serpentín contiene un fluido que realiza un ciclo completo a través de todas las bandejas y regresa a su punto inicial, el cual es una resistencia que calienta previamente el fluido antes de comenzar su recorrido de trabajo, luego de ser calentado, este pasa a través de una bomba de pequeñas dimensiones que impulsa el fluido a través de las bandejas.

Este sistema es mucho menos eficiente porque las bandejas no van a estar a la misma temperatura ya que el calor perdido entre el paso por una bandeja y otra hace que la transferencia de calor no sea la misma y los productos no van a salir con las mismas condiciones.

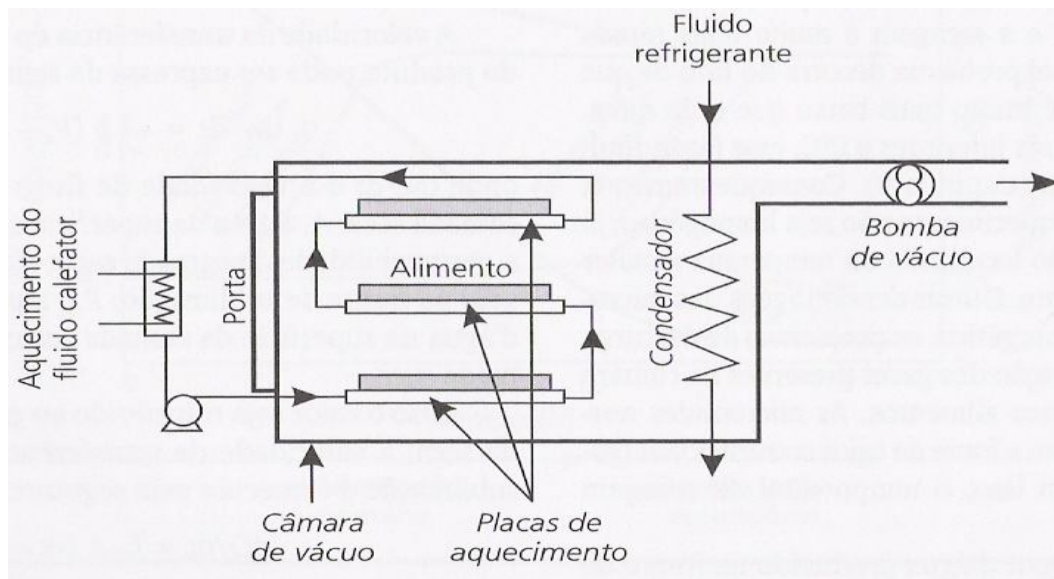


Figura 23. Circuito de calentamiento por fluido calefactor.

Fuente: Tecnología del procesamiento de los alimentos, Principios y Prácticas. Peter Fellows, 1994

1.5.4. Sistema de vacío

El sistema de vacío busca extraer el vapor contenido en el producto a liofilizar, esta compuesto de una bomba de vacío que en algunos liofilizadores industriales es de dos etapas, pero en la mayoría de liofilizadores convencionales y en liofilizadores pilotos se utilizan sistemas de vacío de una sola etapa.

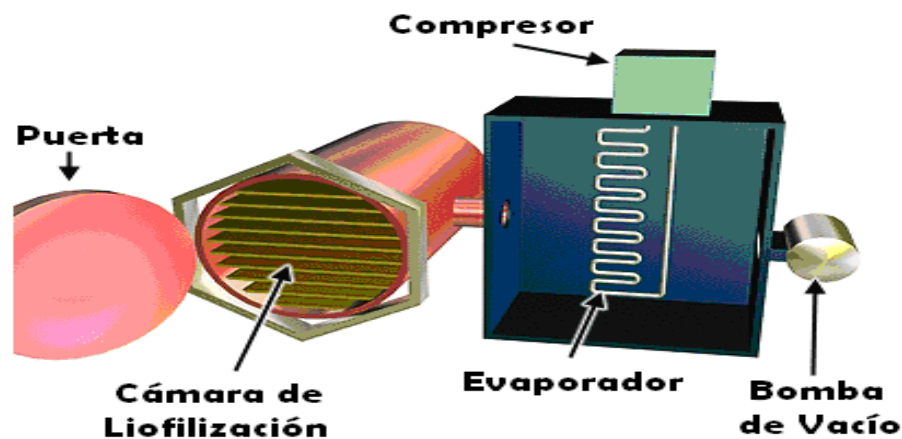


Figura 24. Representación gráfica del sistema de vacío de un liofilizador.

Fuente: www.howstuffworks.com

La bomba de vacío normalmente utilizada es una bomba de paletas la cual es conectada directamente a la cámara de condensación para absorber el vapor de agua del producto a secar y llevarlo hacia el condensador para extraerlo en forma líquida.

La bomba de vacío se activa al llegar a una temperatura en la cámara de trabajo inferior a los -40°C y la presión debe bajarse a menos de 1 Torr.

En liofilizadores piloto se utilizan bombas de vacío resistentes a la corrosión de caudales entre 65 a 500 lts/min.

Se utilizan válvulas entre la bomba y la cámara de condensado para protección.

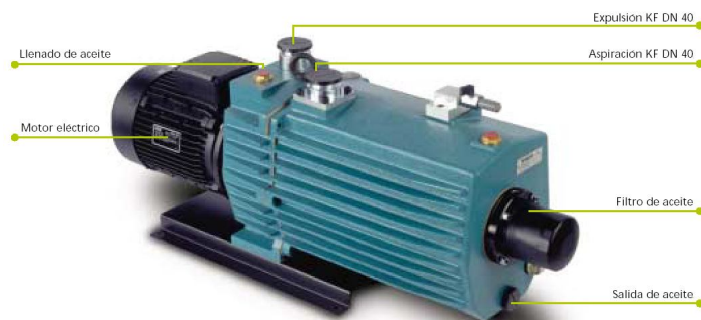


Figura 25. Bomba de vacío característica de sistemas de liofilización.

Fuente: www.etelstar.com

1.5.5. Sistema de refrigeración

El sistema de refrigeración de un liofilizador es un sistema convencional compuesto por compresor, condensador, evaporador y válvula de estrangulamiento.

En liofilizadores industriales se diseñan sistemas de refrigeración de dos etapas de compresión para lograr bajar hasta las temperaturas requeridas dependiendo también del producto a liofilizar y se incorporan componentes que aseguren un proceso de mayor precisión, calidad e higiene.

El sistema de refrigeración de un liofilizador debe tener la capacidad de llevar el producto a liofilizar hasta una temperatura de aproximadamente -40° centígrados y mantenerlo en esa temperatura mientras se logra la extracción total de vapor de agua por medio de la bomba de vacío.

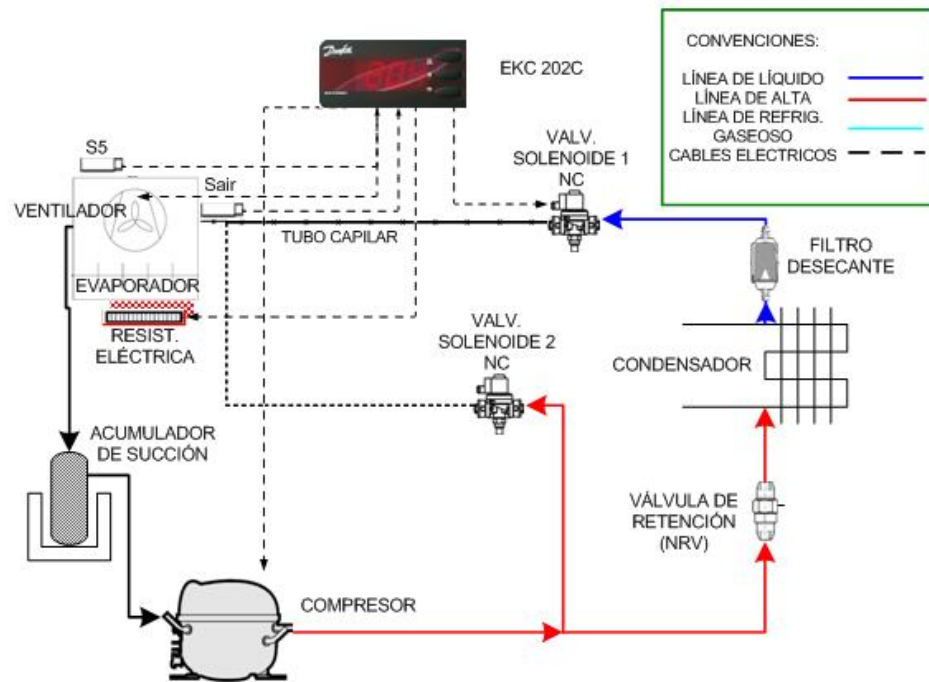


Figura 26. Sistema de refrigeración convencional para baja temperatura.
Fuente: autores



Figura 27. Detalle compresores de doble etapa.
Fuente: www.etelstar.com

En el caso de un liofilizador piloto, la gran mayoría poseen condensadores con capacidades entre 6 y 12 kg de hielo. El sistema de refrigeración es libre de CFC.

1.5.6. Sistema de Control.

En un proceso de liofilización lo más esencial para una producción eficiente es disponer de un control preciso y poder lograr resultados reproducibles. La pérdida de productos puede representar un valor considerable, por este motivo, se utilizan diferentes elementos de control tales como controladores lógicos programables (PLC), pantalla táctil de color para seleccionar, editar y grabar las recetas al PLC, y proporcionar una interfaz agradable al usuario para monitorizar los sucesos. De forma opcional, en sistemas dedicados a la producción a pequeña escala, éste puede ser sustituido por un sistema de control SCADA junto con el PC correspondiente.

Para mayor precisión en los datos obtenidos por el procesador se utilizan sensores o medidores de alta calidad tanto de presión como de temperatura y humedad los cuales se encuentran bien distribuidos por todo el sistema y por medio de ellos podemos obtener datos exactos de temperaturas del producto, de bandejas, de cámara, etc., además, presión de vacío, tiempo del proceso, entre otros.



Figura 28. Fotografía de un banco de control de un liofilizador piloto.

Fuente: www.etelstar.com

El sistema de control ofrece la posibilidad de realizar la operación multitarea por un medio sistematizado, en una estación de trabajo con un operador se llevan a cabo operaciones de una unidad o unidades múltiples, incluyendo las funciones de control supervisor y de adquisición de datos. El uso del teclado y las acciones con el puntero y los botones del ratón, hacen que la interacción del operador sea simple y amigable.

Las categorías típicas de información visualizada en el control de un proceso de liofilización son las siguientes:

- **Clave de acceso:** Hay tres niveles de acceso, identificados del siguiente modo: Operador, Gestión técnica y Mantenimiento. Se pueden definir otros niveles de acceso.
- **Recetas:** Las fórmulas o recetas incluyen un conjunto de parámetros de ciclo, por ejemplo, variables tales como temperatura, vacío, presión y tiempo, para cada etapa del proceso.
- **Inicio del ciclo:** Antes de comenzar con un lote, el operador puede seleccionar un perfil del ciclo para su revisión y aprobación.
- **Historial:** El operador puede ver los datos del historial de un lote.
- **Diagramas:** El operador puede seleccionar y monitorizar la operación por medio de varios diagramas esquemáticos del liofilizador.
- **Gráficas:** El operador puede elegir ver en forma de gráficas, los datos de proceso y variables de control.
- **Control del ciclo:** Visualización de todos los parámetros de un ciclo a tiempo real.
- **Alarmas:** El sistema archiva y muestra una lista cronológica de eventos, acusos de recibo e historiales.

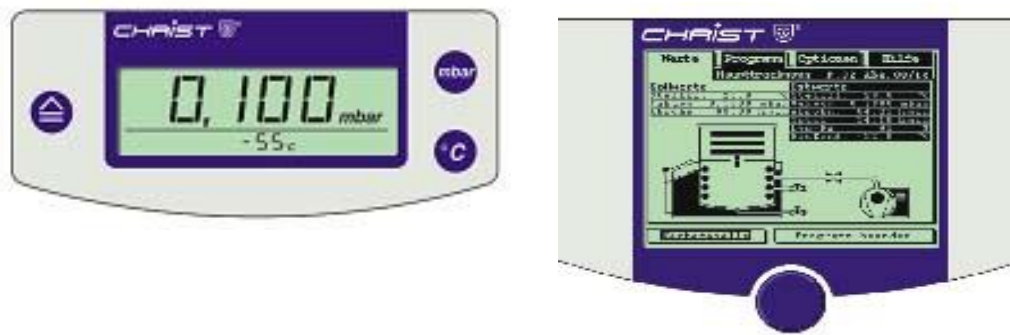


Figura 29. Fotografía de un panel de Control digital de membrana para un liofilizador piloto.

Fuente: www.christ.com.



Figura 30. Controlador EKC 202C.

Fuente: www.danfoss.com.

1.5.7. Sistema de descongelamiento

El sistema de descongelamiento de un liofilizador se puede realizar por tres métodos:

- Descongelamiento por líquido caliente.
- Descongelamiento por vapor de agua.
- Descongelamiento por gas caliente.

1.5.7.1. Descongelamiento por líquido caliente.

Este sistema de calentamiento utiliza un tanque con agua o salmuera la cual antes de ser enviada al condensador previamente congelado hasta su máxima capacidad, es calentada por medio de una resistencia hasta casi los 100 grados centígrados esta agua caliente llega a la parte superior de la cámara de condensación y cae por gravedad rociando el serpentín cubierto del hielo previamente extraído del producto liofilizado. El agua que cae es recirculada y de nuevo llevada al tanque para su posterior uso. Este sistema es económico pero de poco uso a nivel industrial.

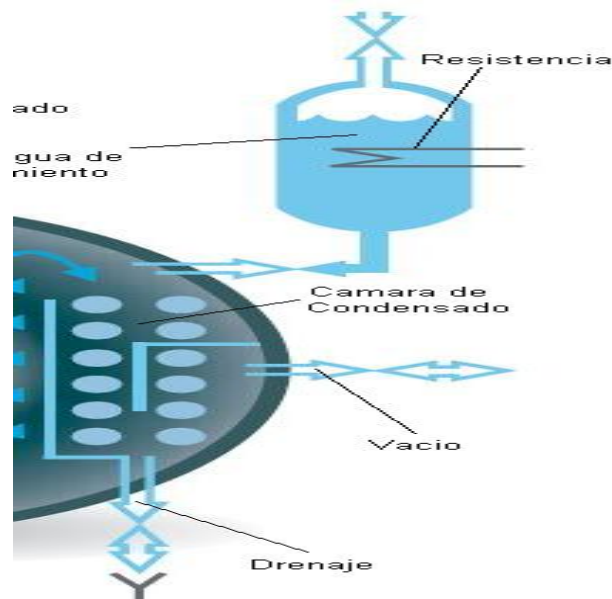


Figura 31. Descongelamiento por flujo de líquido caliente.

Fuente: catálogo ATLAS RAY. Freeze Drying.

1.5.7. Descongelamiento por vapor de agua.

Este sistema de calentamiento utiliza vapor de agua almacenada en un tanque y calentada previamente por una resistencia que lleva el agua a una temperatura superior a los 100°C, se utiliza para cualquier configuración tanto geométrica como de ubicación del sistema de condensación, la diferencia con el anterior es que el tanque de almacenamiento de agua esta en la parte inferior de la cámara de condensación y el vapor sube a presión para descongelar la cámara inactiva mientras que por el otro lado esta cerrada la válvula y la otra cámara se esta congelando.

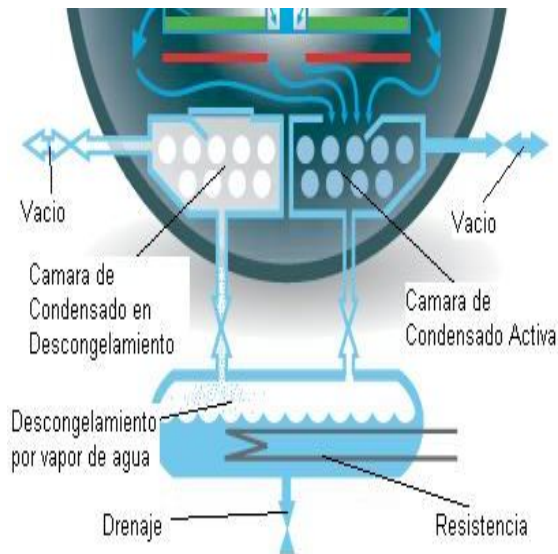


Figura 32. Descongelamiento por Vapor de agua.

Fuente: catálogo ATLAS RAY. Freeze Drying.

1.5.7.3. Descongelamiento por gas caliente.

El deshielo con gas caliente tiene muchas variaciones, todas las cuales en alguna forma usan como fuente de calor el gas caliente descargado por el compresor para deshielar al evaporador.

Este sistema consiste en la instalación de una válvula solenoide en un tubo de desviación instalado entre la descarga del compresor y el evaporador. Cuando la válvula solenoide esta abierta, el gas caliente de la descarga del

compresor viaja por el tubo de la desviación del condensador y entra al evaporador justamente adelante de la válvula de control del refrigerante. El deshielo se obtiene a medida que el gas caliente cede su calor al evaporador frío y lo condensa hacia el estado líquido. Algo de refrigerante condensado permanece en el evaporador mientras que el resto regresa al compresor donde es evaporado por el calor de la compresión y recirculado al evaporador.

Este método de deshielo tiene varias desventajas ya que el líquido no se vaporiza en el evaporador durante el ciclo de deshielo, estará muy limitada la cantidad de gas disponible en el compresor. A medida que progresa el descongelamiento, más líquido permanece en el evaporador y menos refrigerante regresa al compresor para su recirculación, con el resultado de que el sistema tiende a agotar el calor antes que evaporador este completamente deshielado.

Otra desventaja mas seria de este método es la posibilidad de que una capa pesada de refrigerante liquido regrese al compresor y cause daño en el mismo. Esto es fácil que ocurra a principio del ciclo de deshielo o inmediatamente después que el ciclo se ha terminado.

Pero estos inconvenientes pueden resolverse reevaporando el líquido que se condensa en el evaporador antes que este sea regresado al compresor.

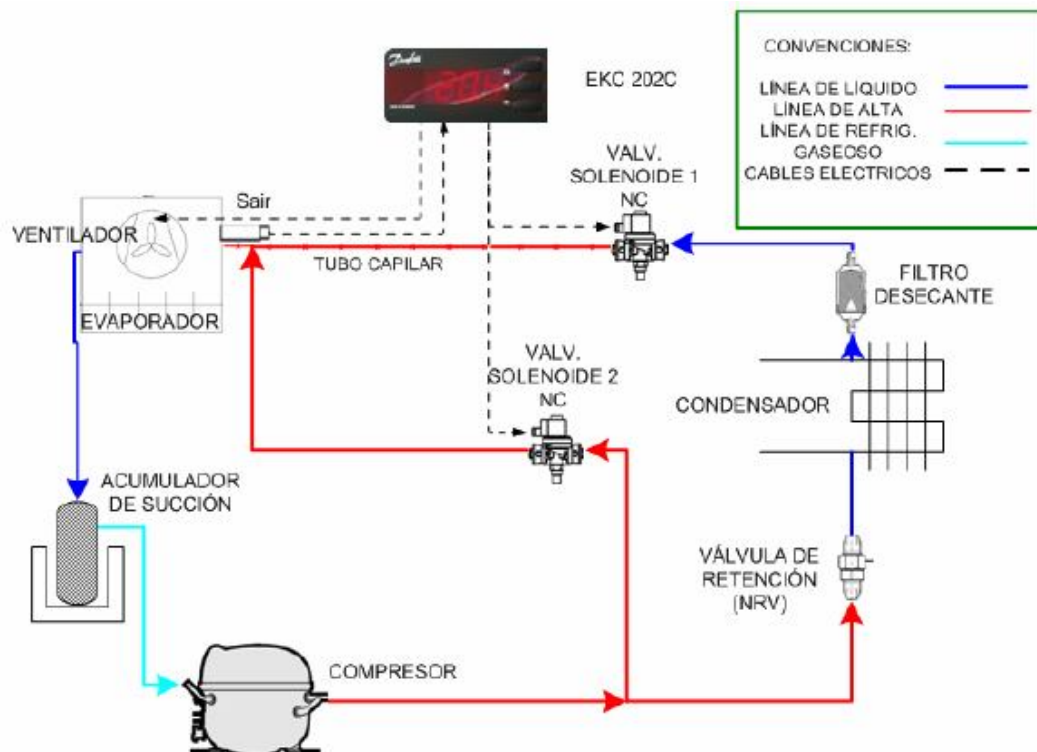


Figura 33. Descongelamiento por Gas Caliente.

Fuente: autores

2. EVALUACION DEL PROCESO.

2.1. DESCRIPCION DEL PROCESO.

Con los métodos convencionales de deshidratación, el calor empleado para la concentración de los productos se utiliza para eliminar el agua del alimento y su conservación se produce por descenso de su actividad de agua, pero el calor altera las características organolépticas y provoca pérdidas del valor nutritivo. En la liofilización el producto se conserva también por reducción de su actividad de agua, pero en este caso este no se calienta, con lo que sus características organolépticas y su valor nutritivo resultan menos afectados.

El enfoque que se le dio a este proyecto está orientado hacia la investigación de la aplicabilidad de un proceso de liofilización, buscando dar cobertura a la necesidad de obtener nuevos productos agroindustriales mediante este método de deshidratación al vacío, para lo cual se definió el diseño y construcción de un liofilizador piloto en el que se reproduzcan los procesos en condiciones iguales a un equipo industrial.

El proceso comienza con la congelación previa del jugo de caña en una instalación convencional, los alimentos de pequeño tamaño se congelan más rápidamente dando lugar a cristales pequeños que dañan menos su estructura. En los alimentos líquidos se procura que la congelación sea lenta, con objeto de que se forme una red cristalina que da lugar a la formación de unos canales por los que el vapor de agua pueda escapar.

En general podemos decir que una congelación adecuada es la base de que el producto liofilizado presente óptimas condiciones de aspecto, conservación de sus propiedades y rápida rehidratación.

El producto congelado se lleva a la cámara de liofilización en donde se debe llevar su temperatura por debajo de -40°C , en ese punto se baja la presión en la cámara mediante una bomba de vacío por debajo de 610 Pa (0,0061 bar), una vez se ha logrado el vacío se comienza a suministrar calor al producto a través de las resistencias de calentamiento del portabanderas con el fin de acelerar la sublimación.

El evaporador previene el retorno del vapor de agua hacia el producto, en el periodo siguiente se mantiene el vacío suficientemente alto, con la presión en el liofilizador por debajo de la presión de vapor en la superficie del hielo y se

controla el calor de manera que su intensidad sea un poco menor que la que se requeriría para derretir el hielo, de manera que, al proseguir, el límite del hielo se va retirando hacia el centro del alimento, es decir que el alimento se deshidrata desde la superficie hacia adentro. En esta fase el producto se sublima hasta un contenido en agua del 15% (sobre su peso húmedo).

La última etapa del secado comienza cuando se ha agotado el hielo en el producto y la humedad proviene del agua parcialmente ligada en el material que se está secando, el objetivo es eliminar las últimas trazas de vapor de agua, evaporando el agua no congelada ligada al producto.

El equipo se mantiene a baja presión y se eleva la temperatura hasta un valor próximo al del ambiente, la liofilización prosigue y el frente de sublimación se traslada hacia el interior del alimento. El vapor de agua escapa del alimento a través de los canales formados por la sublimación del hielo. En este punto el contenido de humedad del producto queda reducido hasta el 2% (sobre su peso húmedo).

Ya que el alimento congelado permanece rígido durante la sublimación, las moléculas de agua que se escapan dejan huecos, lo cual produce una estructura seca, porosa y esponjosa; por eso los alimentos liofilizados se reconstituyen rápidamente pero tienen que ser protegidos mediante un envase adecuado contra la absorción de humedad atmosférica y oxígeno.

2.2. ANALISIS DEL PROCESO

En la actualidad los procesos de producción se realizan con métodos de deshidratación convencionales que afectan directamente la productividad ya que son realizados a temperaturas relativamente elevadas las cuales afectan directamente las propiedades del producto; generando para las industrias locales la dificultad de lograr productos con altos niveles de calidad.

La deshidratación y conservación de productos agroindustriales y materiales biológicos es un procedimiento de gran importancia industrial en Colombia debido a que de ella se obtienen diversos productos y subproductos de consumo masivo e impacto en la economía. Las industrias alimentaria, médica y farmacéutica, requieren de la utilización de métodos de conservación mucho más tecnificados que les permitan garantizar productos de alta calidad que cumplan con las normas de la alta competencia internacional. Realizando un estudio comparativo entre los procesos de deshidratación convencionales y la liofilización se pueden destacar algunas

ventajas y desventajas, cuyo posterior análisis fue la base para la definición de los principales parámetros para el diseño del liofilizador piloto.

2.2.1. Ventajas de la Liofilización

- La temperatura a que es sometido el producto, está por debajo de aquella a la que muchas sustancias inestables sufren cambios químicos.
- Retiene las características originales del producto, incluyendo: Color, forma, tamaño, sabor, textura, nutrientes.
- La gran porosidad del producto facilita con rapidez la reconstitución por la adición de agua o el solvente adecuado.
- Estabilidad a temperatura ambiente.
- No es necesario el almacenamiento en frío.
- Al ser despreciable la humedad remanente, el producto puede ser almacenado por tiempo limitado, constituyendo productos de larga estabilidad.
- No se producen residuos.
- El producto final es liviano y fácil de manejar.
- El costo del transporte disminuye por bajo peso y ausencia de refrigeración.
- Ofrece óptima calidad en el producto seco comparado con otros métodos de secado.
- Debido a la baja temperatura que se opera, la pérdida de los constituyentes volátiles es mínima, se reduce el peligro de contaminación microbiana y los preparados enzimáticos no sufren alteraciones.
- Los productos liofilizados no presentan cambios estructurales ni retracción, su olor y aroma son normales y las pérdidas de nutrientes son mínimas.

2.2.2. Desventajas de la Liofilización

- Elevado costo de inversión de las instalaciones y equipos.
- Necesidad de instalaciones anexas con gran costo de manutención
- Necesidad de personal calificado en la operación y mantenimiento de los equipos.
- Proceso largo, normalmente de varios días.
- Requiere de numerosas etapas concertadas.
- Manejo previo del producto es complejo.
- Es un procedimiento costoso.

2.3. IDENTIFICACION DE PARAMETROS

Con el análisis de la descripción de cada una de las etapas que se debe realizar para lograr un proceso de liofilización completo se determinaron los parámetros más importantes que definen el diseño del liofilizador piloto que se planteó como alternativa para poder reproducir el proceso en condiciones idénticas que un equipo industrial y de esta manera poder realizar un estudio de la aplicabilidad de esta tecnología en el medio local.

Se tuvo en cuenta, que el equipo tendrá una aplicación netamente académica para el estudio de la aplicabilidad del proceso de liofilización y que se instalará en el Laboratorio de Transferencia de Calor de la Escuela de Ingeniería mecánica de la Universidad Industrial de Santander para su proceso de pruebas y puesta a punto.

A continuación se describen brevemente los parámetros fundamentales tomados del análisis del proceso de liofilización y que son la base con la que se definieron las especificaciones para el diseño del equipo.

- En primer lugar se tienen las dimensiones o el espacio de trabajo, el cual consiste en un mueble o estructura cuyas dimensiones se definen por las dimensiones de los componentes del sistema y la cámara de trabajo compartimentada con bandejas para colocar el producto a liofilizar.
- Como en el proceso de liofilización se trabaja principalmente con alimentos y productos orgánicos se requiere por norma la utilización de un material apropiado para la manipulación y el trabajo con este tipo de productos.
- Definiendo las dimensiones de la cámara de trabajo y la carga de producto a liofilizar se determinan las características de todos los subsistemas componentes del liofilizador piloto, tales como refrigeración, vacío, calentamiento y descongelación.
- Ya por último con la revisión de todos los requerimientos definidos, se fijan todos los elementos y detalles finales del equipo.

2.4. DETERMINACION DE REQUERIMIENTOS

2.4.1. Requerimientos de uso.

- **Practicidad.** Se debe tener en cuenta como factor primordial la relación producto-usuario, es decir que el sistema sea de fácil manejo buscando que el operario que manipule el equipo pueda realizar la tarea con la mayor facilidad y eficiencia.
- **Seguridad.** El equipo debe ser seguro tanto para el operario como para su entorno, debe contar con elementos de protección en sus componentes mecánicos y eléctricos, previniendo así cualquier riesgo de accidentes.
- **Mantenimiento.** Se debe buscar que el sistema sea de fácil mantenimiento con elementos que sean de fácil montaje y desmontaje para su mantenibilidad ya que el sistema será sometido a trabajo constante.
- **Manipulación.** El equipo debe ser de fácil manipulación con elementos visibles y de fácil lectura, con señalización y fuerzas de accionamiento al alcance del operario.
- **Ergonomía.** la ergonomía es de mucha importancia ya que se busca la mayor reducción de esfuerzos en el operario y aumentar la eficiencia del proceso. El sistema debe ser cómodo para el operario, con medidas de trabajo apropiadas y en lo posible sencilla y compacta.

2.4.2. Requerimientos de función.

- **Mecanismos.** El equipo debe contar con mecanismos sencillos y de fácil construcción.
- **Accesibilidad.** La cámara de trabajo debe ser de fácil acceso para permitir al operario la fácil ubicación y retiro de los productos dentro de ella.
- **Versatilidad.** El sistema debe ser flexible a variaciones que se puedan presentar en el desarrollo del proceso, de manera que se pueda desarrollar

con eficiencia para diferentes tiempos de producción o clases de productos.

- **Confiabilidad.** El liofilizador piloto garantizar que la tarea se desarrolle sin tener ningún efecto sobre la materia prima, se busca que los productos se deshidraten sufriendo los mínimos cambios posibles.

2.4.3. Requerimientos estructurales.

- **Número de componentes.** El sistema debe contar con los elementos estrictamente necesarios que le permitan realizar perfectamente su función.
- **Estructurabilidad.** El sistema debe tener una estructura compacta con suficiente resistencia mecánica sobre la cual se apoyen todos sus componentes, con elementos de fácil montaje resistentes y ergonómicos.
- **Aislamiento.** Las paredes de la cámara deben contar con buen aislamiento para evitar pérdidas de energía a través de sus alrededores.

2.4.4. Requerimientos técnico - productivos.

- **Bienes de capital.** Para la fabricación se debe requerir de componentes y elementos de fácil consecución a nivel regional y materiales disponibles en el mercado.
- **Mano de obra.** Para la fabricación y montaje del equipo se requiere personal con experiencia en el sector de refrigeración industrial, metalmecánica y procesos de fabricación de componentes o elementos mecánicos y estructurales.
- **Modo de producción.** Se debe buscar una producción seriada corta, limitada por el número de componentes con el fin de integrar los procesos, reducir costos y aumentar utilidades, comenzando desde el diseño de los elementos y la estandarización de ellos teniendo en cuenta medidas, desperdicio de material, planos, modelos, acabados. Etc.

- **Estandarización.** se debe buscar la estandarización de la mayoría de los componentes del equipo liofilizador piloto con el fin de tener la mayor parte de los elementos seleccionables en el mercado para de esta manera reducir costos de fabricación, importación, etc.

2.4.5. Requerimientos económicos.

- **Costo.** Se busca un sistema de bajo costo con el objetivo de poder dirigirlo al sector de la pequeña y mediana agroindustria en Bucaramanga; en donde no se cuenta con los recursos para adquirir un sistema de alta tecnología.
- **Consumo.** Teniendo en cuenta el enfoque que se le da al diseño del sistema, se debe tener en cuenta que su consumo energético sea bajo para que el producto sea atractivo a las industrias.

2.5. ESPECIFICACIONES DE DISEÑO

Analizando cada uno de los parámetros más importantes implicados en el proceso de liofilización y teniendo en cuenta los requerimientos generales se determinaron las siguientes especificaciones para el diseño del Liofilizador Piloto:

2.5.1. Ubicación Geográfica.

Para llevar a cabo el objetivo general de este proyecto de contribuir con la generación de una nueva alternativa económica con el estudio de la implementación de un proceso de liofilización para la obtención de productos agroindustriales con un alto nivel de calidad, se requiere crear un escenario en el que se fortalezcan las competencias en este novedoso campo y se pueda dar continuidad al proceso de estudio mediante el desarrollo académico de los estudiantes del área de refrigeración. El lugar de ubicación del liofilizador Piloto será el área correspondiente al Laboratorio de Transferencia de Calor de la escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander.

2.5.2. Dimensiones de trabajo.

Para definir las dimensiones del equipo se tuvo en cuenta la carga de producto (10 Kg) con lo que se determinó las proporciones de la cámara de trabajo y el número de bandejas, las dimensiones del mueble se definieron de acuerdo a las dimensiones de los componentes del sistema, tomando en cuenta que es un equipo piloto que debe ser de fácil manejo por parte del operador y de fácil traslado para efecto de pruebas, de acuerdo con esto se determinaron las siguientes dimensiones:

2.4.2.1. Cámara de Trabajo.

Alto: 86 cm
Ancho: 65 cm
Fondo: 61 cm

2.4.2.3. Bandejas.

Número de bandejas:
Alto: 8 cm
Ancho: 57 cm
Fondo: 38 cm

2.4.3. Material.

Teniendo en cuenta las normas para administración de alimentos y medicinas FDA (Food and drug administration) y la norma de buenas Prácticas de fabricación GMP (Good Manufacturing Procedures), además de las normas de higiene para fabricación de bienes de consumo acorde a la norma internacional de calidad ISO 9001:2000, se definió la utilización de **Acero Inoxidable Brillante 430 calibre 22**, para la construcción tanto interna, de la cámara de trabajo y las bandejas, así como de toda la construcción externa del mueble, soportado en una estructura de ángulo coll roll.

2.4.4. Especificaciones Técnicas.

Para el diseño básico y detallado de cada uno de los subsistemas constituyentes del liofilizador piloto se definieron algunas especificaciones técnicas basadas en las características del proceso; la carga de producto la temperatura y presión de la cámara de trabajo y las dimensiones de la misma, lo cuál fue la base para el posterior cálculo y selección de los componentes del equipo.

Especificaciones Técnicas de Diseño	
Carga de producto:	10 Kg
Superficie útil de carga por placa:	2394 cm ²
Número de Placas:	3
Interdistancia entre las placas:	20 cm
Rango de Temperatura de las placas:	- 40°C a 60°C
Capacidad del evaporador:	9.000 BTU
Temperatura Final de la Cámara:	- 40°C
Bomba de vacío:	8 CFM

Tabla 1. Especificaciones Técnicas de diseño.

Fuente: autores

3. EVOLUCION DEL PROYECTO.

El proyecto está orientado hacia la investigación de la aplicabilidad de un proceso de liofilización en el medio local, trabajando en el desarrollo de nuevos productos agroindustriales que pueden derivarse de esta nueva tecnología generando así una importante alternativa agroeconómica para el país.

Para la realización del estudio de la aplicabilidad del proceso se definió el diseño y construcción de un liofilizador piloto que cumpla con las especificaciones de diseño definidas en el estudio del proceso, que además de permitir reproducir los procesos en condiciones iguales a un equipo industrial de una forma eficiente y práctica, presente como características principales su fácil manejo y ergonomía para crear un entorno agradable de trabajo para los estudiantes que realicen los posteriores estudios del proceso de liofilización.

3.1. PRESENTACION DE ALTERNATIVAS

En la etapa preliminar del diseño se plantearon varias alternativas y configuraciones de diseño con las que se busca llevar a cabo el proceso de la manera más óptima y eficiente, en base a esto se desarrollo la parte funcional, luego se escogió la alternativa que funcionara y cumpliera con los requerimientos y a partir de esta se fue evolucionando, solucionando los problemas que a lo largo del proyecto se fueron presentando.

Cabe resaltar que para el desarrollo del diseño se tomó como único punto de partida el conocimiento adquirido en el estudio realizado del proceso de liofilización del cual se fijaron los parámetros principales en que se basó el diseño de cada uno de los subsistemas constituyentes del equipo.

Otro aspecto fundamental es la visión académica hacia la que está orientado el diseño, ya que es un procedimiento experimental del que no se tiene conocimiento en Colombia, por tal razón nos centramos en un diseño en el que se pueda realizar todo el proceso de pruebas que nos de un punto de partida hacia la implementación de esta novedosa tecnología en nuestro medio, basados en esto definimos la carga de producto a liofilizar, las

dimensiones de la cámara y los aspectos técnicos de diseño de cada uno de los subsistemas.

3.1.1. Alternativa de diseño 1.

Consiste en un equipo con diseño de cámara cuadrado, sus dimensiones son 1.30 mts de altura x 0.73 mts de ancho x 0.5 mts de profundidad, el sistema de descongelamiento del condensador por agua caliente, la cual se calienta por medio de una resistencia instalada en la parte inferior del tanque de desagüe, el sistema de refrigeración esta ubicado en la parte inferior del equipo y el condensador se ubica al rededor de la cámara de trabajo por lo cual es un sistema de simple cámara, el sistema de calentamiento de las bandejas es por resistencias ubicadas en cada soporte de bandeja, el desagüe de la cámara de condensación es una superficie inclinada que guía el agua hacia el tanque por gravedad. Como parte de sus accesorios tenemos dos válvulas, para el desagüe, las cuales se pueden abrir o cerrar manualmente, una bomba pequeña para el líquido de descongelamiento, la cual lleva el agua recién calentada por resistencia hacia los rociadores ubicados en la parte superior de la cámara por encima del evaporador del sistema de refrigeración. El sistema de vacío esta ubicado en la parte superior de la cámara de trabajo directamente desde la bomba

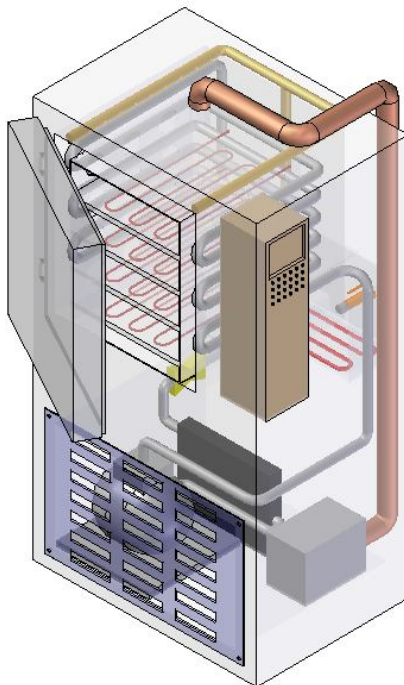


Figura 34. Alternativa de diseño # 1 modelada en CAD.

Fuente: autores

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> ✘ Permite realizar el proceso de forma práctica. ✘ Cámara cuadrada de fácil construcción. ✘ El sistema de bandejas por resistencias de contacto directo es el apropiado para el proceso. 	<ul style="list-style-type: none"> ✘ Con el sistema de refrigeración por plaquetero se requeriría instalar mucha tubería para lograr bajar la cámara a -40°C. ✘ Con el sistema de simple cámara no se lograría un proceso continuo de trabajo y el condensador llegaría a su máxima capacidad sin haberse completado el proceso y no se lograría el retiro total de la humedad del producto. ✘ El descongelamiento por agua caliente haría más ineficiente el proceso.

Tabla 2. Ventajas y Desventajas Alternativa de diseño 1.

Fuente: autores

El análisis de esta alternativa permitió el desarrollo de las alternativas siguientes que consisten en variantes de esta en cuanto a configuración y diseño; puesto que el principio es el mismo.

3.1.2. Alternativa de diseño 2.

La segunda alternativa planteada es un diseño de doble cámara, en el cual a su vez la cámara de condensación esta separada en dos partes para que haya un proceso continuo en el cual cuando una de las cámaras esta absorbiendo humedad, la otra se esta descongelando por medio de vapor de agua a presión. Ambas cámaras son selladas por un mecanismo de válvulas o tapas que se cierran con unos resortes de constante de elasticidad elevada, y se abren por el vacío que genera la bomba en cada cámara, esto nos asegura un proceso completo y mas eficiente, ambas cámaras están selladas y se tiene un vidrio que permite controlar de forma visual el proceso y el nivel de congelamiento de cada condensador. El sistema de calentamiento de las bandejas es el mismo de la alternativa nº 1. Este diseño al ser mas individualizado en cuanto a sus cámaras tiene una línea de vacío que se divide a cada una de ellas con su respectiva válvula a la entrada de cada cámara para asegurar que mientras una trabaja la otra no, el sistema de calentamiento es con vapor de agua y cada cámara tiene su entrada de vapor sellado por su respectiva válvula.

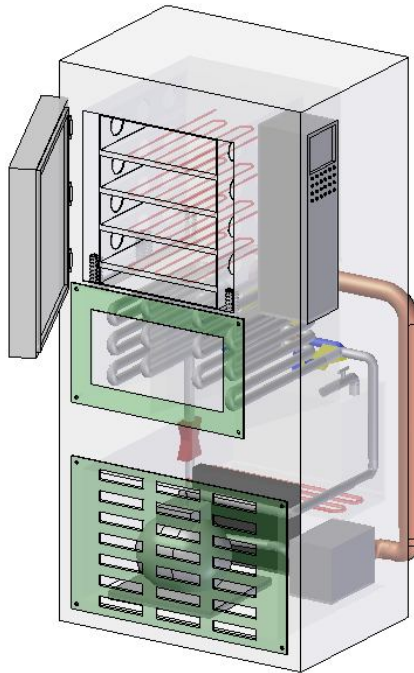


Figura 35. Alternativa de diseño # 2 modelada en CAD.

Fuente: autores

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> ✘ Cámara cuadrada de fácil construcción. ✘ El sistema de doble cámara permitiría un proceso de retiro de humedad continuo. ✘ El descongelamiento por vapor de agua es un poco más apropiado. ✘ El sistema de bandejas por resistencias de contacto directo es el apropiado para el proceso. 	<ul style="list-style-type: none"> ✘ Es casi imposible llegar a la temperatura deseada, ya que la tubería de refrigeración se encuentra muy alejada del producto a congelar. ✘ El proceso no es completamente eficiente ya que solo una parte de la tubería de condensación estará trabajando mientras la otra está apagada. ✘ El equipo presenta mayor dificultad de construcción, es de mayores dimensiones por lo tanto ocupa mas espacio. ✘ Mas costoso, mayor cantidad de componentes y complejidad de las cámaras.

Tabla 3. Ventajas y Desventajas Alternativa de diseño 2.

Fuente: autores

3.1.3. Alternativa de diseño 3.

El tercer diseño tiene una forma mas compacta en altura pero mayor en profundidad ya que aloja el sistema de refrigeración en la parte trasera de la cámara de trabajo es un sistema de dos cámaras individuales para proceso continuo en el cual cada cámara se abre y cierra por medio de una válvula solenoide que se activa cuando el condensador de cada cámara ha congelado su capacidad máxima de vapor de agua. El sistema de descongelamiento es por rociadores de agua caliente los cuales también son controlados eléctricamente por dos válvulas solenoides para su trabajo intermitente en el momento del descongelamiento, en la parte inferior de la cámara de trabajo hay un soporte en el que van ubicados el tanque de desagüe y almacenamiento del agua de descongelamiento y la bomba de vacío.

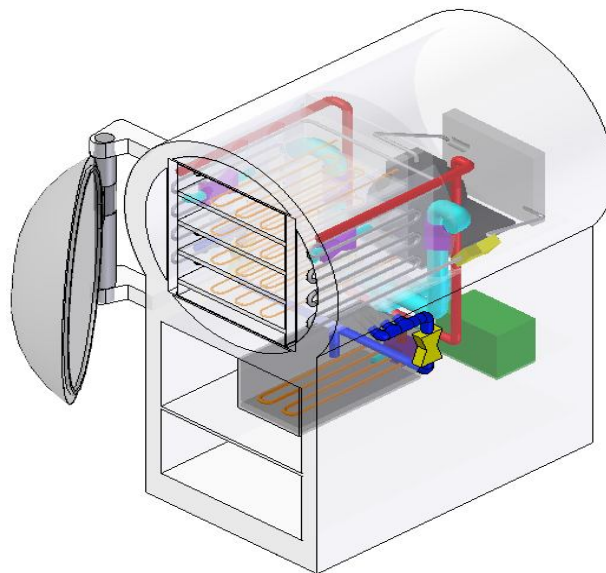


Figura 36. Alternativa de diseño # 3 modelada en CAD.

Fuente: autores

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> ✘ El sistema de forma cilíndrica garantiza mayor hermeticidad. ✘ El diseño es mucho más compacto ✘ El sistema de bandejas por resistencias de contacto directo es el apropiado para el proceso. 	<ul style="list-style-type: none"> ✘ Debido a su forma cilíndrica y el diseño de la puerta de la cámara de trabajo se hace la construcción se hace más compleja y por ende costosa. ✘ Es más complejo ubicar la cantidad de tubería requerida.

Tabla 4. Ventajas y Desventajas Alternativa de diseño 3.

Fuente: autores

Con el desarrollo de todas estas opciones de diseño y la evolución de las ventajas que cada una presenta por separado, se llegó a la propuesta definitiva que cumple con las especificaciones de diseño y muestra un perfil de solución al problema planteado dando cobertura a la mayoría de subproblemas que se presentan buscando obtener el sistema de liofilización con los parámetros y requerimientos fijados.

3.1.4. Alternativa de diseño 4 (Propuesta final)

En primer lugar encontramos la necesidad de continuidad del proceso para realizar el retiro total de la humedad del producto, por tal razón el sistema de refrigeración no puede trabajar por el método de plaquetero, es decir por tubería instalada en contacto directo a las paredes de la cámara ya que para lograr bajar a la temperatura requerida de -40°C se haría necesario instalar demasiada tubería y de acuerdo al diseño de la cámara no se contaría con el suficiente espacio y el sistema se haría ineficiente. Para solucionar esto se definió que el sistema de enfriamiento trabajará por evaporadores aleteados lo cuál hace más fácil llegar a la temperatura deseada basados en la capacidad de la unidad de refrigeración.

Teniendo en cuenta el aspecto de facilidad de construcción se definió para la alternativa final un diseño de simple cámara cuadrada, con compartimiento para 3 bandejas de producto y sistema de calentamiento por resistencias instaladas en contacto directo a las placas portabanderas.

Para mayor eficiencia en el proceso se estableció el sistema de descongelamiento por resistencias eléctricas el cuál funciona solamente al final del proceso de retiro de humedad del producto.

Para garantizar la hermeticidad de la cámara para el funcionamiento del sistema de vacío, la cámara llevará sello en fibra de vidrio en todas sus uniones y la puerta empaque magnético y doble manija de seguridad.

Para el control del proceso el equipo deberá contar con un controlador para el sistema de refrigeración y otros dos controles de temperatura por separado para las resistencias de calentamiento y para el producto. Con esto se busca poder realizar todo el monitoreo del proceso y el estudio de la evolución de la deshidratación de los productos.

El sistema de calentamiento constará de tres placas portabandejas en las que se instalarán las resistencias de calentamiento las cuales serán controladas de manera que el producto no alcance más de 60°C para que el procedimiento de

desprendimiento de vapor sea lento y en ningún momento se presente en estado líquido.

Basados en las especificaciones y los requerimientos de diseño, y tomando en cuenta los aspectos definidos para la alternativa final de diseño, se procedió a la etapa de diseño básico y detallado, en la que se realizó todo el proceso de diseño estructural y diseño térmico del equipo y el procedimiento de cálculos y selección de cada uno de los subsistemas y componentes del liofilizador piloto.

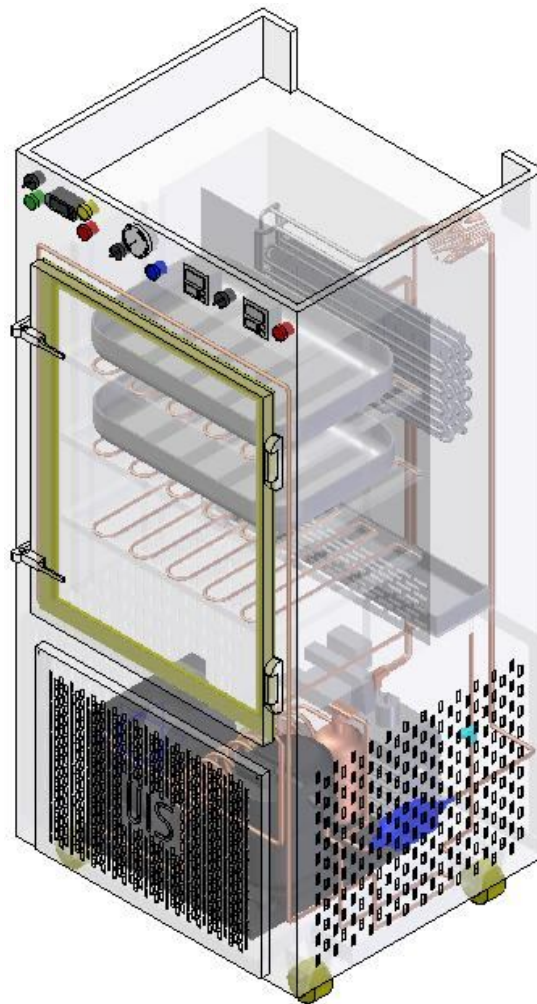


Figura 37. Alternativa de diseño # 4 (final) modelada en CAD.

Fuente: autores

4. DISEÑO BASICO Y DETALLADO DEL LIOFILIZADOR PILOTO.

Para dar inicio a la etapa de diseño básico y detallado del equipo se tomaron en cuenta cada uno de los parámetros definidos para la alternativa de diseño final y todos los requerimientos y especificaciones fijados en la etapa de diseño preliminar del liofilizador piloto.

4.1. DISEÑO ESTRUCTURAL.

La estructura principal del liofilizador piloto se compone de un mueble en el que se encuentran una cámara de trabajo compartimentada con bandejas y los alojamientos de cada uno de los subsistemas que componen el equipo.

Cabe resaltar que por tratarse de un equipo piloto, este debe ser de fácil manejo por parte del operador y de fácil traslado para efecto de pruebas, además debe tener una estructura compacta con suficiente resistencia mecánica sobre la cual se apoyen todos sus componentes, con elementos de fácil montaje resistentes y ergonómicos.

De acuerdo con esto y basados en el estudio del proceso de liofilización realizado en la etapa de diseño conceptual del proyecto y la información recopilada sobre los equipos de liofilización existentes utilizados en la actualidad para estudio de procesos piloto y para pruebas de laboratorio, se puede decir que comparten suficientes características que se pueden aprovechar para el diseño del liofilizador piloto; algunas de ellas son las dimensiones globales de la estructura, los materiales, los elementos principales del sistema de refrigeración y algunos elementos de control, entre otros.

Basados en esto, se definieron 10 Kg de producto como la carga máxima a liofilizar, con lo que se determinó las proporciones de la cámara de trabajo y el número de bandejas, las demás dimensiones del mueble se definieron de acuerdo a las dimensiones de los componentes del sistema.

4.1.1. Mueble.

De esta forma el armazón se dimensiona de la siguiente manera:

Alto: 169 cm
Ancho: 80 cm
Fondo: 70 cm

Como se explicó en las especificaciones de diseño, de acuerdo a las normas se definió la utilización de **Acero Inoxidable Brillante 430 calibre 22**, para la construcción tanto interna, de la cámara de trabajo y las bandejas, así como de toda la construcción externa del mueble, el cual se soporta en una estructura de ángulo coll roll.

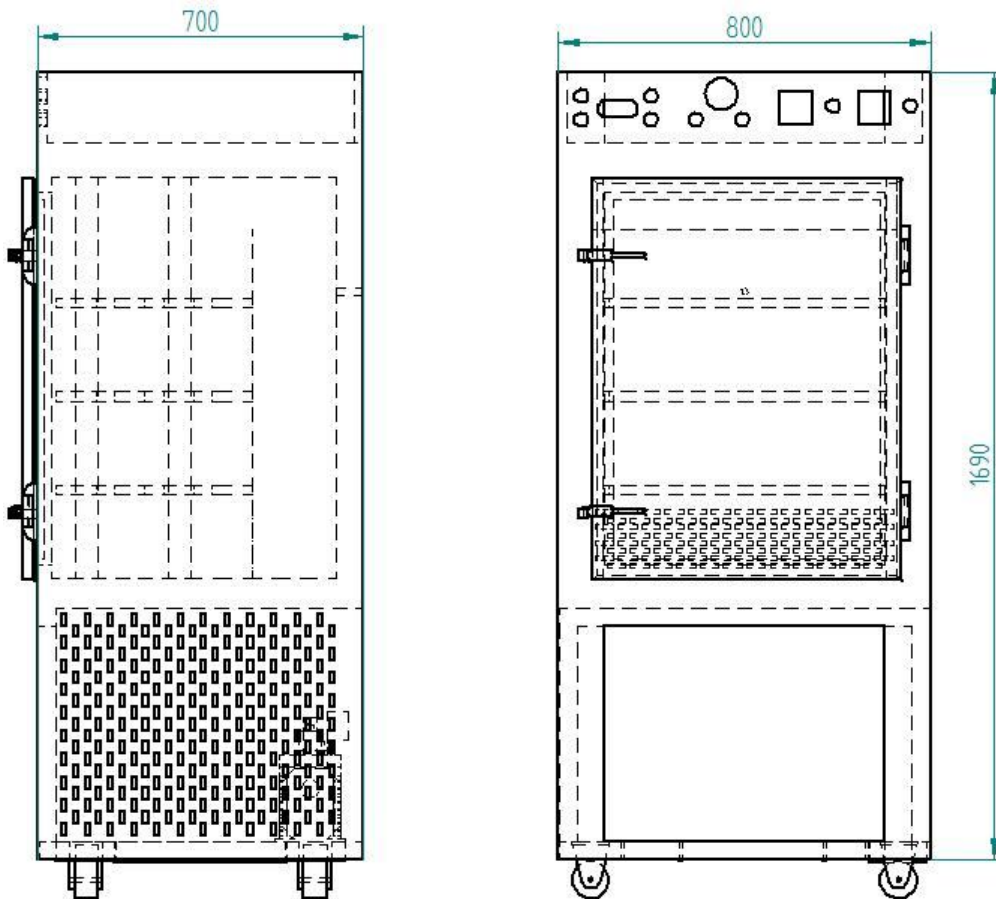


Figura 38. Vista frontal y lateral de la estructura del liofilizador piloto.

Fuente: autores

El mueble presenta tres zonas claramente identificadas; en la parte inferior se encuentra el área de ubicación de los subsistemas de refrigeración y vacío con sus respectivos componentes y tubería, en la parte intermedia se encuentra la cámara de trabajo, dentro de la cual se ubican el sistema de calentamiento del producto y el sistema de bandejas, en el fondo de la cámara de trabajo también se encuentra ubicado el evaporador del sistema de refrigeración, y en la parte superior se ubica el área del sistema de control con su respectivo tablero de mando y montaje eléctrico.

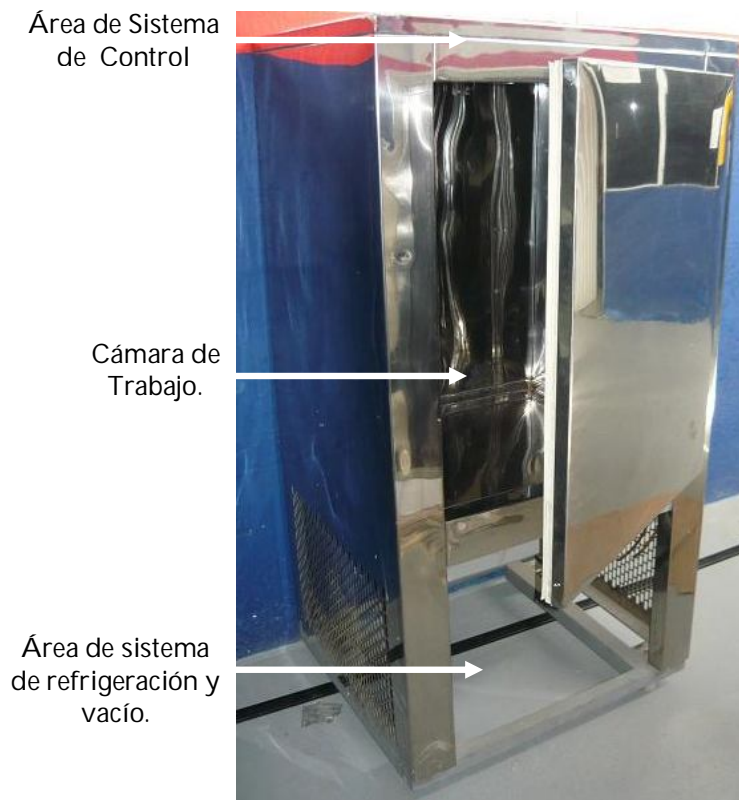


Figura 39. Mueble del liofilizador piloto.

Fuente: autores

4.1.2. Cámara de Trabajo.

La cámara de trabajo es el espacio en donde se lleva a cabo el proceso de deshidratación de los productos, en esta se encuentra ubicado el sistema de bandejas y el sistema de calentamiento de los productos, y es allí en donde se ubica el evaporador, elemento encargado del intercambio de energía entre el refrigerante y la carga presente en aquel lugar.

Sus dimensiones son:

Alto:	86 cm
Ancho:	65 cm
Fondo:	61 cm

Las paredes de la cámara son fabricadas con acero Inoxidable Brillante 430 calibre 22, con un espesor intermedio de aislamiento de poliuretano de 75 mm, para reducir al máximo la transferencia de calor entre la cámara y el ambiente exterior.

Además en todas las uniones y remaches de construcción de la cámara se aplicó Sica flex 2-21 y resina de fibra de vidrio para hacer un sello hermético en todo el interior de la cámara para el funcionamiento del sistema de vacío.

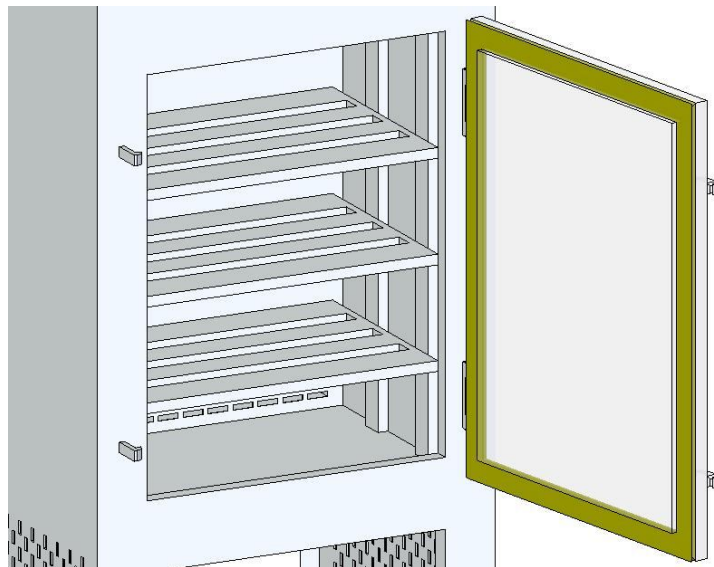


Figura 40. Cámara de Trabajo modelada en CAD.

Fuente: autores

4.1.3. Puerta.

La puerta de la cámara de trabajo al igual que el resto del mueble está construida en acero Inoxidable Brillante 430 calibre 22, con una capa de aislamiento interno de poliuretano de 45 mm.

Para mantener la hermeticidad dentro de la cámara se puso un empaque magnético en el marco de la puerta y dos manijas de seguridad para aplicar más presión al empaque.

Las dimensiones de la puerta son:

Alto: 86 cm
Ancho: 66 cm
Espesor: 4,5 cm

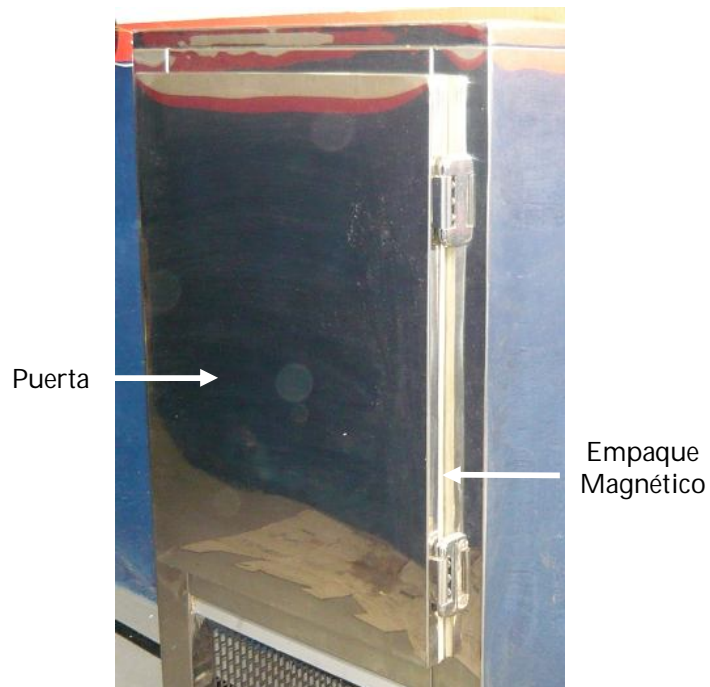


Figura 41. Puerta de la cámara de trabajo.

Fuente: autores

4.2. DISEÑO Y SELECCIÓN DEL SISTEMA DE REFRIGERACION.

El sistema de refrigeración juega un papel fundamental dentro del proceso de liofilización ya que es el encargado de realizar la primera etapa del proceso que consiste en llevar el producto a una temperatura por debajo de -35°C , para el liofilizador piloto se definió un sistema de refrigeración utilizando evaporador aleteado puesto que se logra una mayor eficiencia ya que se requiere llegar a una temperatura muy baja dentro de una cámara muy pequeña.

4.2.1. Diseño Térmico (Cálculos)

El diseño térmico del liofilizador piloto se basa en el cálculo de la carga total a extraer por parte del sistema de refrigeración. Este cálculo es de vital importancia ya que el diseño del prototipo final tiene características particulares que difieren en gran medida de las cámaras o neveras convencionales. Previamente, se deben definir los parámetros de entrada requeridos por el sistema, los cuales son:

- Temperatura ambiente exterior
- Temperatura de diseño de la cámara
- Temperatura de evaporación
- Temperatura de condensación

4.2.1.1. Determinación de Temperaturas.

4.2.1.1.1. Temperatura de ambiente exterior

Según el INSTITUTO DE HIDROLOGIA, METEOROLOGIA Y ESTUDIOS AMBIENTALES (IDEAM) la temperatura máxima en la ciudad de Bucaramanga varía de acuerdo a la época del año como se muestra en la figura 41.

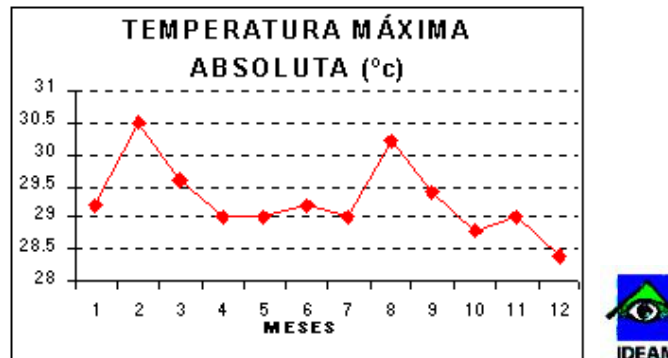


Figura 42. Temperatura máxima en la ciudad de Bucaramanga (IDEAM).
 Fuente: <http://www.ideam.gov.co:8080/sectores/aero/climat/tempebucaramanga.htm>

De aquí se puede apreciar que la máxima temperatura se alcanza en el segundo mes del año y corresponde a 30,5 °C, y es ésta la temperatura ambiente usada en el diseño de la cámara para efectos de seguridad.

Temperatura de ambiente exterior: 30'5°C= 86,9°F

4.2.1.1.2. Temperatura de diseño de la cámara

Según el estudio del proceso de liofilización la temperatura a obtener dentro de la cámara de trabajo debe ser la requerida para llevar los productos a deshidratar por debajo de -35°C

Temperatura de diseño de la cámara: -35°C=-31°F

4.2.1.1.3. Temperatura de evaporación

Para conocer la temperatura de evaporación del refrigerante a utilizar en nuestro caso es necesario saber la carga del sistema y la humedad relativa deseada para así calcular la capacidad del evaporador a diseñar y así por medio de una grafica calcular la DT del evaporador que se define como la diferencia entre la temperatura del aire que llega al evaporador tomada generalmente como la temperatura de diseño de la cámara y la temperatura de saturación del refrigerante correspondiente a la presión de salida del evaporador.

4.2.1.1.3. Temperatura de condensación

La temperatura de condensación depende del tipo del medio de condensación utilizado, aire o agua, la temperatura ambiente de diseño o la temperatura del agua y la capacidad del condensador seleccionado. Los condensadores enfriados por aire se seleccionan comúnmente para funcionar a diferencias de temperatura (DT) que oscilan entre los 10°F y los 30°F, utilizándose normalmente, la diferencia de temperatura mas baja para las aplicaciones de baja temperatura y la diferencia de temperatura mas elevada para las aplicaciones de alta temperatura en donde la relación de compresión es menos critica¹ Para los fines de nuestro proyecto utilizamos una diferencia de temperatura del condensador de 17°F.

$$DT = T_{cond} - T_{amb} = 17^{\circ}F$$

Despejando T_{cond} y reemplazando $T_{amb} = 86,9^{\circ}F$, se tiene

$$T_{cond} = 103,9^{\circ}F = 40^{\circ}C$$

4.2.1.2. Cálculo de Carga del sistema.

Las fuentes de calor que producen un aumento de la temperatura interior del sistema se pueden considerar que son las siguientes

- ✘ Cargas por paredes
- ✘ Cargas de los productos a liofilizar
- ✘ Cargas internas varias (motor del ventilador del evaporador)

Las cargas por servicio en este caso no aplican porque la cámara permanecerá cerrada durante todo el proceso.

4.2.1.2.1. Cargas por paredes

La carga representada por la cantidad de calor a través de las paredes se calcula utilizando la siguiente ecuación:

¹ Tomado de Copeland "Manual de refrigeración" Sección 16, Pág. 16-2

$$Q_p = A * U * D \quad [Btu]^2$$

Donde: A= Área [ft²]

U= Factor de transmisión de calor [Btu/ft².°F]

D= Diferencia de temperatura entre los dos lados de la pared [°F]

Para nuestro caso el aislante utilizado es poliuretano, ampliamente acogido en la industria de la refrigeración, el mueble o estructura del liofilizador esta construido con lámina de acero inoxidable 430 brillante calibre 22.

Datos de cálculo

✘ Dimensiones de la cámara

Altura: 860mm = 2,8215ft

Ancho: 650mm = 2,1325ft

Profundidad: 610mm = 2,001ft

✘ Temperaturas

T_{amb}= 30,5°C= 86,9°F

T_{cam}= -35°C= -31°F

$$D = T_{amb} - T_{cam} = 86,9 - (-31) = 117,9 \text{ } ^\circ\text{F}$$

✘ Conductividades térmicas

Poliuretano: k=0,16 [Btu/ft°F]³

Acero inoxidable: k= 108 [Btu/ft°F]⁴

Para calcular el factor de transmisión de calor utilizamos la siguiente ecuación.

² Tomado de roy J dossat "Principios de refrigeración" 18 Ed. Pág. 191

³ Tomado de Cengel Yunus A "Transferencia de Calor" 2da. Ed, Tabla A6i, Pág. 754.

⁴ Tomado de Cengel Yunus A "Transferencia de Calor" 2da. Ed, Tabla A6i, Pág. 754.

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{f_i} + \frac{x_1}{k_1} + \frac{x_2}{k_2} + \dots + \frac{1}{f_o} \quad \left[\frac{ft^2 \cdot ^\circ F}{Btu} \right]^5$$

Donde:

1/f_i y 1/f_o= Coeficientes de convección de las paredes interna y externa respectivamente (para nuestro caso es un valor despreciable ya que la velocidad del aire en ambas partes de la cámara es muy mínima)

X= espesor del material

K= conductividad térmica del material

Con los datos anteriores podemos completar la siguiente tabla:

UBICACIÓN	Area [ft ²]	Espesor [ft]		U [Btu/ft ² °F]	D [°F]
		Acero inox.	Poliuretano		
<i>Paredes Laterales</i>	2,8215 x 2,001	0,00246 x 2	0,246	0,6503	117,9
	5,6467 c/u				
<i>Piso</i>	2,1325 x 2,001	0,00246 x 2	0,246	0,6503	117,9
	4,2671				
<i>Techo</i>	2,1325 x 2,001	0,00246 x 2	0,246	0,6503	117,9
	4,2671				
<i>Fondo</i>	2,1325 x 2,8215	0,00246 x 2	0,246	0,6503	117,9
	6,017				
<i>Puerta</i>	2,1325 x 2,8215	0,00246 x 2	0,148	1,0839	117,9
	6,017				

Tabla 5. Tabla de datos para cálculo de carga por paredes.

Fuente: autores

Con los datos anteriores podemos calcular la carga a través de las paredes de la cámara:

UBICACIÓN	CANTIDAD	CALOR TRANSFERIDO [Btu]
<i>Paredes Laterales</i>	2	865,99
<i>Piso</i>	1	327,2
<i>Techo</i>	1	327,2
<i>Fondo</i>	1	461,39
<i>Puerta</i>	1	768,96
CARGA TOTAL POR PAREDES		2750,74

Tabla 6. Carga total a través de las paredes de la cámara.

Fuente: autores

⁵ Tomado de roy J dossat "Principios de refrigeración" 18 Ed. Pág. 197.

4.2.1.2.2. Cargas por producto

En el cálculo de las cargas por producto hay que tener en cuenta los siguientes factores:

- ✘ Calor sensible cedido por encima del punto de congelación
- ✘ Calor latente de congelación
- ✘ Calor sensible cedido por debajo del punto de congelación, hasta su temperatura final.
- ✘ Calor de respiración o de evolución del producto.

Para el cálculo de estos calores son necesarios los siguientes datos:

- | | |
|---|----------------------------------|
| ✘ Masa de producto a liofilizar: | m = 10kg = 22,04 lbs |
| ✘ Calor específico promedio por encima del punto de congelación: ⁶ | C _{ph} = 0,822 Btu/lb°F |
| ✘ Factor de rapidez de enfriamiento promedio: ⁷ | f _r = 0,8 |
| ✘ Calor latente promedio: ⁸ | h _{fi} = 103,5 Btu/lb |
| ✘ Calor específico promedio por Debajo del punto de congelación: ⁹ | C _{pl} = 0,422 Btu/lb°F |
| ✘ Temperatura de congelación promedio: ¹⁰ | T _c = 29,0°F |
| ✘ Temperatura Ambiente: | T _{amb} = 86,9°F |
| ✘ Temperatura de la cámara: | T _{cam} = -31°F |

4.2.1.2.2.1. Calculo del calor sensible por encima del punto de congelación

Para el cálculo de esta carga se aplica la siguiente ecuación

$$Q_{enf} = \frac{m \times C_{ph} \times \Delta T}{f_r} \quad [Btu] \quad ^{11}$$

Donde:

m: masa del producto [lb]

⁶ Tomado de Cengel Yunus A "Transferencia de Calor" 2da. Ed, Tabla A7i, Pág. 755.

⁷ Tomado de roy J dossat "Principios de refrigeración" 18 Ed, Tabla 10-9, Pág. 211.

⁸ Tomado de Cengel Yunus A "Transferencia de Calor" 2da. Ed, Tabla A7i, Pág. 755.

⁹ Tomado de Cengel Yunus A "Transferencia de Calor" 2da. Ed, Tabla A7i, Pág. 755.

¹⁰ Tomado de Cengel Yunus A "Transferencia de Calor" 2da. Ed, Tabla A7i, Pág. 755.

¹¹ Tomado de roy J dossat "Principios de refrigeración" 18 Ed, Pág. 212.

C_{ph}: calor específico por encima del punto de congelación (este se obtuvo de promediar los calores específicos de todos los posibles productos a liofilizar, obtenidos de la tabla A7i pg 755) [Btu/lb°F]

ΔT: Diferencia de temperatura entre la temperatura de entrada del producto y la temperatura de congelación del producto. [°F]

fr: factor de rapidez de enfriamiento (este factor se utiliza debido a que la carga del equipo durante la primera parte del periodo de enfriamiento es mayor que la carga promedio debido a la gran diferencia de temperatura que se tiene entre el producto y el aire del espacio refrigerado en este periodo. Este factor se aplica a cuartos de enfriamiento y asegura la capacidad de la maquina ya que incrementa el valor de la carga del producto al valor correspondiente a la condición de pico máximo.), este se obtuvo de promediar los factores de rapidez de enfriamiento de todos los posibles productos a liofilizar, obtenidos de la tabla ¹²) [Btu/lb°F]

Con los datos anteriores tenemos:

$$Q_{enf} = \frac{22,046 \times 0,822 \times (86,9 - 29)}{0,80} = 1311,56 \text{ [Btu]}$$

4.2.1.2.2.2. Calculo del calor latente de congelación

Para el cálculo de esta carga se aplica la siguiente ecuación

$$Q_{sol} = m \times h_{fi} \text{ [Btu]} \quad ^{13}$$

Donde:

m: masa del producto [lb]

h_{fi}: calor latente de congelación (este se obtuvo de promediar los calores latentes de todos los posibles productos a liofilizar, obtenidos de la tabla ¹⁴)

$$Q_{sol} = 22,046 \times 103,5 = 2281,76 \text{ [Btu]}$$

4.2.1.2.2.3. Calculo del calor sensible por debajo del punto de congelación

Para el cálculo de esta carga se aplica la siguiente ecuación

$$Q_{alm} = m \times C_{pl} \times \Delta T \text{ [Btu]}$$

¹² Tomado de roy J dossat "Principios de refrigeración" 18 Ed, Tabla 10-9, Pág. 211

¹³ Tomado de roy J dossat "Principios de refrigeración" 18 Ed, Pág. 213.

¹⁴ Tomado de Cengel Yunus A "Transferencia de Calor" 2da. Ed, Tabla A7i, Pág. 755.

Donde:

m: masa del producto [lb]

C_{pi}: calor específico por debajo del punto de congelación (este se obtuvo de promediar los calores específicos de todos los posibles productos a liofilizar, obtenidos de la tabla A7i pg 755) [Btu/lb°F]

ΔT: Diferencia de temperatura entre la temperatura de congelación y la temperatura de diseño de la cámara. [°F]

$$Q_{atm} = 22,046 \times 0,422 \times (29 - (-31)) = 558,20 \text{ [Btu]}$$

4.2.1.2.2.4. Calculo del calor respiración del producto

Es el calor eliminado por los productos durante su almacenamiento ya que estos son productos con vida y sufren un proceso mediante el cual el oxígeno del aire se combina con los carbohidratos en el tejido de la planta dando como resultado formación de dióxido de carbono y calor. Este calor debe ser considerado cuando la cantidad de producto es considerable y al ser almacenado por encima de su temperatura de congelación.

Para el cálculo de esta carga, es necesario definir el tiempo de duración del proceso de almacenamiento del producto en la cámara, para lo cual tomamos 6 horas.

Por lo tanto para el cálculo de esta carga se aplica la siguiente ecuación

$$Q_{resp} = m \times C_{resp} \times t \text{ [Btu]}^{15}$$

Donde:

m: masa del producto [lb]

C_{resp}: calor de respiración (este se obtuvo de promediar los calores de respiración de todos los posibles productos a liofilizar, obtenidos de la tabla 10-13 pg 217 dossat) [Btu/lb*h]

t: tiempo de almacenamiento del producto en la cámara [h]

¹⁵ Tomado de roy J dossat "Principios de refrigeración" 18 Ed, Cap 10, Pág. 216.

$$Q_{resp} = 22,06 \times 0,0487 \times 6 = 6,4 \text{ [Btu]}$$

Lo cual es un valor despreciable ya que la cantidad de producto no es significativa.

FUENTE DE CALOR	CALOR TRANSFERIDO [Btu]
Calor sensible antes de congelar	1311,56
Calor latente de congelacion	2281,76
Calor sensible despues de congelar	558,2
Calor de respiración	6,4
<u>CARGA TOTAL POR PRODUCTOS</u>	4157,92

Tabla 7. Carga total debida a productos.

Fuente: autores

4.2.1.2.3. Cargas varias

Para aumentar la tasa de transferencia de calor en el interior de la cámara, y la homogeneidad de temperatura en ella, instalamos un pequeño ventilador en la parte superior del evaporador, el cual tiene las siguientes características:

Velocidad: 2600 rpm
 Corriente: 0,58 A
 Frecuencia: 60 hz
 Voltaje: 110 V

El calor cedido por el ventilador es igual a la potencia consumida por el ventilador en las 6 horas de trabajo del sistema de refrigeración, por lo tanto, la ecuación a utilizar en este caso es:

$$Pot = V \times I = 110 \times 0,58 = 63,8 \text{ watts}$$

Partiendo del hecho de que 1 watt = 3.41 Btu/hora¹⁶, y del tiempo de trabajo del sistema de refrigeración del liofilizador equivalente a 6 horas, obtenemos:

¹⁶ Tomado de Copeland "Manual de refrigeración" Sección 15, Pág. 15-1

$$63,8 \text{ watts} = 217,558 \text{ Btu/h}$$

Multiplicando por las horas de trabajo del sistema de refrigeración:

$$Q_{vent} = 217,558 \times 6 = 1305,34 \text{ Btu en 6 horas de trabajo}$$

Conociendo cada una de las cargas presentes dentro de la cámara de trabajo se elaboró la tabla de la carga total a extraer por el sistema de refrigeración, para esto se suman los valores de las cargas debidas a paredes, productos y las cargas varias presentes.

	Q [Btu]	Q [Btu/h]
<i>Carga por paredes</i>	2750,74	458,456667
<i>Carga por productos</i>	4157,92	692,986667
<i>Cargas varias</i>	1305,34	217,556667
SUMA DE LAS CARGAS	8214	1369
<i>Factor de seguridad</i>	10%	10%
CARGA TOTAL A EXTRAER POR EL EQUIPO	9035,4	1505,9

Tabla 8. Resumen de cargas a extraer en 6 horas de trabajo.

Fuente: autores

4.2.2. Selección del sistema de Refrigeración.

4.2.2.1. Selección del Evaporador

La selección del evaporador es una de las etapas más importantes ya que por medio de este se retira el calor necesario del producto para llevar a cabo el proceso de liofilización. En este paso el tipo de evaporador a seleccionar y el área superficial del evaporador juega un papel importantísimo en la selección, por lo tanto debido al espacio y la aplicación fue necesario seleccionar un evaporador aleteado el cual no ocupa mucho espacio y tiene un rendimiento óptimo para aplicaciones de baja temperatura como fue nuestro caso. Buscando diseñar un evaporador con la capacidad requerida y el espacio disponible, fue necesario dividir el evaporador en dos trayectorias paralelas. Esto produce el efecto de reducir la velocidad del refrigerante en las dos trayectorias a la mitad del valor que tendría si no se hiciera la división y la caída de presión por pie se reduce hasta la octava parte del valor que

tendría en la parte inferior del evaporador con un circuito de serie simple mejorando su capacidad. Esto permite una mayor carga en el serpentín aun sin excederse del valor de la caída de presión permitida, al mismo tiempo que la velocidad en todas partes del serpentín es mantenida dentro de los límites deseados de modo que la transferencia de calor no se ve afectada.

Uno de los factores mas importante para la selección del evaporador es la DT de diseño del evaporador, la cual se define como la diferencia entre la temperatura del aire de entrada al evaporador tomada como la temperatura de diseño de la cámara y la temperatura de evaporación del refrigerante a la presión de salida del evaporador.

Con el dato de la capacidad requerida del evaporador podemos hallar la DT del evaporador con la siguiente grafica:

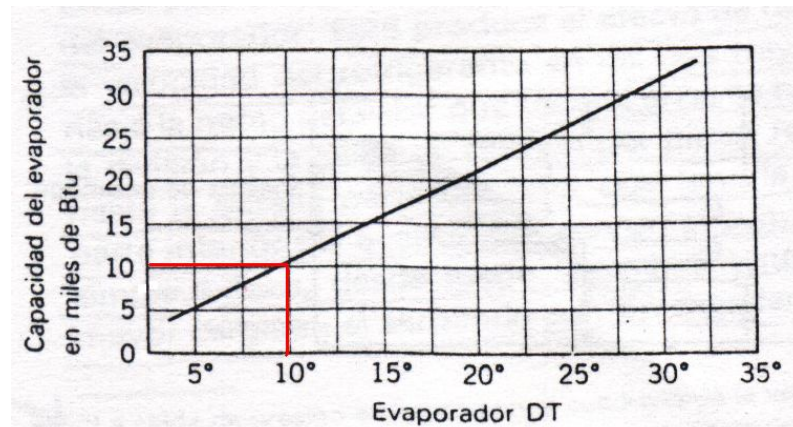


Figura 43. Variación de la capacidad del evaporador con DT evaporador.

Fuente: adaptada de roy J dossat "Principios de refrigeración" 18 Ed, Fig. 11-21, Pág. 244.

De la cual encontramos que la DT del evaporador es aproximadamente:

$$DT = 10^{\circ}F$$

Con este dato podemos hallar la temperatura de evaporación del refrigerante.

$$DT = T_{cam} - T_{evap} = 9,5^{\circ}F$$

Despejando T_{evap} y reemplazando $T_{cam} = -31^{\circ}F$, se tiene

$$T_{evap} = - 40,5^{\circ}F = - 40,2^{\circ}C.$$

Otros Datos para Calculo

Capacidad requerida: CAP = 9035,44 Btu
Tiempo total de trabajo del evaporador: t = 6 horas
Ancho de la cámara: 650 mm = 25,59 In

Dejando un espacio a cada lado del evaporador de 3 In para su acomodación, tendríamos un ancho disponible para el evaporador de:

Ancho disponible de evaporador: 19,59 In.

Con estos datos obtenemos la capacidad requerida por hora de trabajo

$$\frac{CAP}{h} = \frac{9035,44}{6} = 1505,9 \left[\frac{Btu}{h} \right]^{17}$$

Por lo tanto la capacidad requerida por °FDT será

$$\frac{CAP/h}{DT} = \frac{1505,9}{10} = 150,59 [Btu/h^{\circ}FDT]$$

La capacidad por pulgada de longitud de aleteado:

$$\frac{CAP/h/DT}{L_{alet}} = \frac{150,59}{19,59} = 7,70 [Btu/h^{\circ}FDTIn]^{18}$$

Con este dato vamos a la de capacidades de serpentines de enfriamiento de convección natural seleccionamos el modelo PK 26.

¹⁷ Tomado de roy J dossat "Principios de refrigeración" 18 Ed, Cap 11, Pág. 248.

¹⁸ Tomado de roy J dossat "Principios de refrigeración" 18 Ed, Cap 11, Pág. 248.

(7" menos del total) Modelo	Ancho	Núm. de rulos	Espac. aletas	Superficie pies cuadrados por plg	Htu por hr 1° Dt	por plg 15° DT
Serpentín de una hilera						
J-14	13"	4		1.26	1.47	22.1
K-16	18½"	6		0.86	1.21	18.2
L-18	24"	8		1.89	2.21	33.1
N-1.10	29½"	10		1.29	1.82	27.3
J-18	30"	8		2.52	2.94	44.1
K-1.12	42"	12		1.72	2.44	35.5
L-1.16	54"	16		3.15	3.68	51.2
PJ-14	13"*	8		2.15	3.04	43.9
PK-16	18½"*	12		2.52	2.94	44.2
PL-18	24"*	16		1.72	2.44	36.6
PN-1.10	29½"*	20		3.78	4.42	66.3
				2.58	3.55	54.8
				5.04	5.88	88.4
				3.44	4.87	73.2
				2.52	2.94	44.2
				1.72	2.44	36.6
				3.78	4.42	66.2
				2.58	3.65	54.8
				5.04	5.88	88.3
				3.44	4.87	73.0
				6.30	7.33	110.0
				4.30	6.10	91.1
Serpentín de dos hileras						
J-24	13"	8		2.52	2.65	39.8
K-26	18½"	12		1.72	2.23	33.5
L-28	24"	16		3.78	3.96	59.4
N-2.10	29½"	20		2.58	3.34	50.1
J-28	30"	16		5.04	5.30	79.5
K-2.12	42"	24		3.44	4.45	66.8
L-2.16	54"	32		6.30	6.62	99.3
PJ-24	13"*	16		4.30	5.57	83.6
PK-26	18½"*	24		5.04	5.30	79.5
PL-28	24"*	32		3.44	4.45	66.8
PN-2.10	29½"*	40		7.56	7.92	118.8
				5.16	6.68	100.2
				10.08	10.60	159.0
				6.88	8.90	133.5
				5.04	5.30	79.5
				3.44	4.45	66.8
				7.56	7.92	118.8
				5.16	6.68	100.2
				10.08	10.60	159.0
				6.88	8.90	133.5
				12.60	13.25	198.8
				8.60	11.12	166.8

Tipo J 14

Tipo K 16

Tipo L 18

Tipo N 1.10

Tipo J 24

Tipo K 26

Tipo L 28

Tipo N 2.10

Tipo J 18

Tipo K 1.12

Tipo L 1.16

Modelo KJ 42" ancho
(Serpentín plástico "J" en
tubo tipo "K")

Tipo J 28

Tipo K 2.12

Tipo L 2.16

Modelo LJ 54" ancho
(Serpentín plástico "J" en
tubo tipo "L")

Tipo PJ 14

Tipo PK 16

Tipo PL 18

Tipo PN 1.10

Tipo PJ 24

Tipo PK 26

Tipo PL 28

Tipo PN 2.10

Figura 44. Variación de la capacidad del evaporador con DT evaporador.

Fuente: adaptada de roy J dossat "Principios de refrigeración" 18 Ed, Tabla R - 1, Pág. 557.

Como podemos observar, el evaporador se divide en dos compartimientos de un ancho de 18,5 pulgadas.

El número de tubos del evaporador seleccionado fue: 24

Numero de aletas por pulgada: 3 aletas/In.

La capacidad del evaporador seleccionado es de 7,90 [Btu/h°FDTIn], con este dato hallamos el verdadero ancho del evaporador.

$$\frac{150,59}{7,90} = 19,06 \text{ In}$$

Lo cual se acomoda perfectamente con el espacio disponible para el evaporador.

4.2.2.2. Selección de la unidad condensadora.

4.2.2.2.1. Cálculos del Compresor.

Para el cálculo de la unidad condensadora fue necesario definir el refrigerante a utilizar para nuestra aplicación, donde optamos por el R404A, ya que es un refrigerante ecológico y económico que cumple con las condiciones termodinámicas para lograr los estados requeridos en el proceso.

Como primer paso debemos tener en cuenta las temperaturas de evaporación y condensación del refrigerante, ya que de acuerdo con el ciclo ideal de refrigeración, estas temperaturas son claves para determinar los estados en los diferentes puntos del sistema.

Para hallar la potencia mínima necesaria para comprimir el vapor de refrigerante llamada potencia teórica, utilizaremos la siguiente ecuación:

$$P = W \times m \left[\frac{KJ}{min} \right]$$

Donde.

W= trabajo de compresión

m= flujo másico del refrigerante

Estos podemos hallarlos de la siguiente manera:

$$W = h_d - h_c \text{ [KJ/Kg]} \quad 20$$

$$m = \frac{Q_{sis}}{ER} \left[\frac{Kg}{min} \right] \quad 21$$

Donde.

h_d = entalpia de vapor sobrecalentado a la salida del compresor, se halla siguiendo la línea isoentropica del refrigerante en la grafica presión-entalpia, desde el estado de salida del evaporador hasta interceptar con la línea de presión absoluta de liquido saturado de condensación.

h_c = entalpia de vapor saturado a la temperatura de evaporación del refrigerante.

Q_{sis} = carga del sistema

ER= efecto refrigerante del sistema.

El efecto refrigerante se puede hallar de la siguiente manera.

$$ER = h_c - h_b \left[\frac{KJ}{Kg} \right] \quad 22$$

Donde.

h_b = entalpia de liquido saturado a la salida del tubo capilar, la cual es igual a la entalpia a la salida del condensador ya que el paso por el capilar es un proceso isoentálpico.

Datos de cálculo:

¹⁹ Tomado de Pita Edgard G. "Principios y Sistemas de refrigeración" Cap 4, Pág. 75.

²⁰ Tomado de Pita Edgard G. "Principios y Sistemas de refrigeración" Cap 4, Pág. 75.

²¹ Tomado de Pita Edgard G. "Principios y Sistemas de refrigeración" Cap 4, Pág. 74.

²² Tomado de Pita Edgard G. "Principios y Sistemas de refrigeración" Cap 4, Pág. 73.

$$T_{ev} = -41\text{ }^{\circ}\text{F} = -40,5\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{cond} = 103,9\text{ }^{\circ}\text{F} = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$Q_{sis} = 1505,9\text{ Btu/h} = 25,1\text{ Btu/min.} = 26,48\text{ KJ/min}$$

Con estos datos y entrando en la tabla de propiedades termodinámicas del refrigerante R-404A ²³ (Anexo 1) encontramos lo siguiente:

Condiciones en el estado C (Salida del evaporador)

$$T_c = T_{ev} = 41\text{ }^{\circ}\text{F} = -40,5\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$h_c = 346,12\text{ KJ/Kg}$$

$$P_c = 1,322\text{ Bar}$$

Condiciones en el estado B (Entrada del evaporador)

$$T_b = T_{cond} = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$h_b = 246,08\text{ KJ/Kg}$$

$$P_b = 18,255\text{ Bar}$$

Condiciones en el estado D (salida del compresor) se halla con la grafica p vs h del refrigerante 404^a. (figura 43)

$$h_d = 405\text{ KJ/Kg}$$

$$P_d = 18,255\text{ bar.}$$

²³ Tomado del Catalogo Técnico Gas Refrigerante R-404A SALVADOR ESCODA S.A. (Anexo 1)

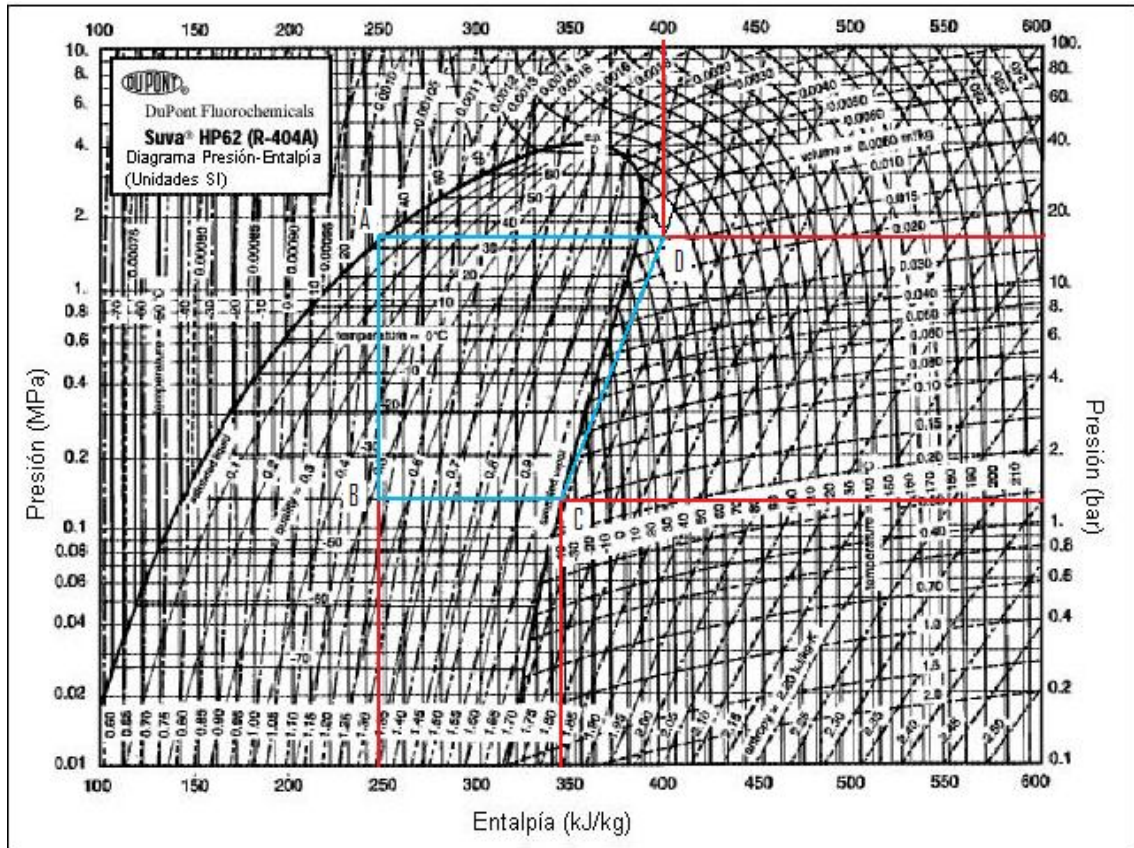


Figura 45. Diagrama de Presión-Entalpía para (R-404 A) en Unidades SI

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

Con las ecuaciones antes explicadas encontramos:

$$ER = h_c - h_b = 346,12 - 246,08 = 99,32 \left[\frac{KJ}{Kg} \right]$$

Con esto podemos hallar el flujo másico:

$$m = \frac{Q_{sis}}{ER} = \frac{26,48}{99,32} = 0,266 \left[\frac{Kg}{min} \right]$$

y el trabajo de compresión fue:

$$W = h_d - h_c = 405 - 346,12 = 58,88 \left[KJ/Kg \right]$$

Por lo tanto la potencia mínima hallada fue:

$$P = W \times m = 58,88 \times 0,266 = 15,70 \left[\frac{KJ}{min} \right]$$

La conversión para hallar la potencia en HP es la siguiente:

$$1 \text{ HP} = 42,42 \frac{\text{Btu}}{\text{min}} \times \frac{1,055 \text{ KJ}}{1 \text{ Btu}} = 44,755 \frac{\text{KJ}}{\text{min}}$$

Por lo tanto la potencia mínima requerida por el compresor para comprimir el vapor en HP es:

$$P = 15,70 \left[\frac{\text{KJ}}{\text{min}} \right] \times \frac{1 \text{ HP}}{44,755 \left[\frac{\text{KJ}}{\text{min}} \right]} = 0,35 \text{ HP}$$

Esta potencia, representa la potencia necesaria para comprimir al vapor en un sistema de 100% de eficiencia. En donde no se toma en cuenta la potencia necesaria para vencer la fricción en la compresión y otras pérdidas de potencia. La potencia real es por lo general 30 a 50% mayor que la potencia teórica calculada dependiendo de la eficiencia del compresor ²⁴

Por lo tanto teniendo en cuenta todos estos factores, sumamos un 50% de potencia por seguridad, lo cual nos da una potencia de:

$$P = 0,35 + (0,35 \times 0,5) = 0,525 \text{ HP}$$

Por lo tanto un compresor de ¾HP sería la opción correcta a utilizar para el liofilizador.

El desplazamiento teórico requerido por el compresor se puede hallar de la siguiente manera

$$V_t = v \times m \left[\frac{\text{cm}^3}{\text{min}} \right] \quad ^{25}$$

Donde.

v= volumen específico en la entrada del compresor.

De las mismas tablas: v= 143,69 dm³/Kg= 143690 cm³/kg

Entonces el desplazamiento teórico del compresor es de:

²⁴ Tomado de Roy J Dossat "Principios de refrigeración" 18 Ed, Cap 7, Pág. 137

²⁵ Tomado de Pita Edgard G. "Principios y Sistemas de refrigeración" Cap 4, Pág. 76.

$$Vt = 143690 \times 0,266 = 38221,54 \left[\frac{Cm^3}{min} \right]$$

Con este dato y con las especificaciones dadas por el fabricante del compresor seleccionado en cuanto a las dimensiones, podemos hallar las rpm necesarias para cumplir con los requerimientos de diseño.

4.2.2.2. Cálculos del Condensador.

Para el cálculo del condensador buscamos el calor de rechazo o calor removido por lb de refrigerante en el condensador:

$$C.R = h_d - h_a = h_d - h_b = 405 - 246,08 = 158,92 \left[\frac{KJ}{Kg} \right]^{26}$$

Por lo tanto LA CAPACIDAD DEL CONDENSADOR fue:

$$\begin{aligned} Q_r &= m \times (h_d - h_b) = 0,266 \times 158,92 = 42,27 \left[\frac{KJ}{min} \right] = 40,06 \left[\frac{Btu}{min} \right] \\ &= 2403,85 \left[\frac{Btu}{h} \right] \end{aligned}$$

4.2.2.3. Selección de la Unidad

Teniendo en cuenta los parámetros de diseño y los requerimientos de estructurabilidad para el diseño del liofilizador piloto se hace necesaria la selección de una unidad condensadora en la cual vienen integrados compresor y condensador, teniendo en cuenta las capacidades calculadas tanto para compresor como para condensador, se seleccionó una unidad TECUMSEH CAJ2432Z la cual cumple con todas las especificaciones de diseño y capacidades tanto para compresor como para condensador.

²⁶ Tomado de Pita Edgard G. "Principios y Sistemas de refrigeración" Cap 4, Pág. 78

60 Hz R404A									
4 T condensation	5 T évaporation	(°C)	-40	-35	-30	-25	-20	-15	-10
30	1 P frigorifique	(W)	397	576	797	1064	1382	1756	2189
	2 P absorbée	(W)	460	533	608	685	765	847	932
	3 I absorbée	(A)	2.2	2.52	2.85	3.21	3.57	3.96	4.36
40	1 P frigorifique	(W)	441	629	856	1127	1446	1818	2189
	2 P absorbée	(W)	435	525	618	714	811	912	1014
	3 I absorbée	(A)	2.07	2.47	2.89	3.33	3.78	4.24	4.73
50	1 P frigorifique	(W)		309	461	647	869	1132	1442
	2 P absorbée	(W)		497	608	721	837	955	1076
	3 I absorbée	(A)		2.34	2.84	3.36	3.9	4.45	5.02
60	1 P frigorifique	(W)			301	443	615	821	1066
	2 P absorbée	(W)			577	708	842	978	1117
	3 I absorbée	(A)			2.71	3.32	3.94	4.57	5.22

1 = refrigerating capacity 2 = watt input 3 = current 4 = condensing temperature 5 = evaporating temperature

Figura 46. Capacidades del Compresor para R404 A

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

De la figura 43 podemos observar que la capacidad refrigerante a las condiciones deseadas cubre perfectamente las necesidades de nuestro proyecto, y la potencia de la unidad es de ¾ HP.

Compresseur / Compressor
Code tension / Voltage code : H



CAJ2432Z

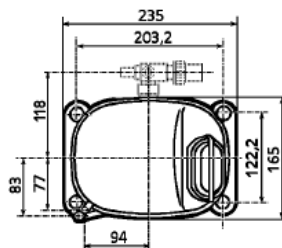
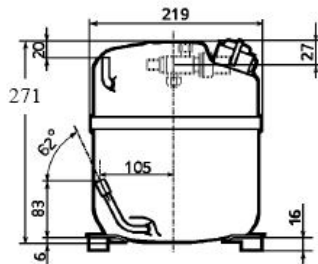
Froid commercial négatif (BP)
Low back pressure commercial application

208-220V / 60Hz - 1~

R404A

N° 124ET-H - ind e

Conditions Conditions	frequence frequency	Prod frigorifique nominale / nominal refrigerating capacity			Puis. sonore Sound level
		Watts	Kcal/h	BTU/h	
EN 12900	60 Hz	441	379	1504	NF S 31-026/ISO 3743-1 67 dBA
Cecomaf	60 Hz	588			



Cylindree / Displacement : 18.3 cm³
Poids net / Net weight : 21 Kg
Charge en huile / Oil charge : 887 cm³
Type d'huile / Oil type : P.O.E /
Détente / Expansion device : Capillaire/Détendeur
Capillaire/Exp^o valve
Ventilé / Forced

Resistance a 20° C / Windings resistances at 20° C

Phase princ. / Main Winding : 2 Ohms
aux. / Auxiliary Winding : 8.5 Ohms

Intensité / Current

nom. / Rated current RLA : 3.3 A
max. / Max current : 6.4 A
dém. / Start current LRA : 31 A

Ap. Electrique / Electrical equipment : CSR

Protecteur / Overload : MST24AJN
Temporisation / Time check : 2.8s - 5.2s / 26 A
T° ouverture / Opening temp.: 120° C
fermeture / Closing temp. : 69° C
Option / optional : T0422

Relais potentiel / Potential relay : RVA6AM**
enclenchement / Pick up : 239/268V
déclenchement / Drop out : 60/135V
Option / optional : 3ARR3*4A*

Condensateur dém. / Start capacitor : 88 µF / 260 V
Condensateur Perm./ Run capacitor : 15 µF / 400 V

* EN12900: T°cond.+40°C / T°évap.-35°C/ T°gas aspirés. +20°C /
Sous refroidissement. OK

* EN 12900 : Cond. T° +40°C / Evap. T° -35°C / Return gas T° +20°C /
Subcooling. OK

Pour conduites Ø ext / For tubing O.D.

Aspiration Suction	Refoulement Discharge	Charge Process
12.7 (1/2")	7.9 (5/16")	6.35 (1/4")

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.

Figura 47. Especificaciones compresor Tecumseh CAJ2432Z

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

4.2.2.3. Selección del Tubo Capilar

Dado que no existen formulas matemáticas que nos indiquen la dimensión exacta del capilar en determinada aplicación, utilizamos para este proyecto dos métodos encontrados de selección de tubos capilares.

El primero consta de una tabla para el refrigerante R404A, en la cual es necesario saber la capacidad frigorífica del compresor, que para nuestro caso es igual a la capacidad del compresor seleccionado (1500 Btu/h) equivalente a 377,9 Kcal/h.

Los datos de esta tabla son para unas condiciones de $T_{cond} = 45^{\circ}\text{C}$ y $T_{evap} = 30^{\circ}\text{C}$ que son muy cercanas a las condiciones de nuestro proyecto.

TABLE FOR REFRIGERANT R404A (LBP)															
		Capillary tube length (m)													
QASH	M	Capillary tube internal diameter (mm) & Evaporating temperature ($^{\circ}\text{C}$)													
		0,6		0,7		0,8		0,9		1		1,2		1,5	
kcal/h	kg/h	-30	-23,3	-30	-23,3	-30	-23,3	-30	-23,3	-30	-23,3	-30	-23,3	-30	-23,3
130	3,51	1,39	1,47	3,22	3,38										
135	3,64	1,29	1,36	2,99	3,13										
140	3,78	1,20	1,26	2,77	2,91										
145	3,91	1,11	1,18	2,58	2,71										
150	4,05	1,04	1,10	2,41	2,52										
155	4,18		1,03	2,25	2,36										
160	4,32			2,11	2,21										
165	4,45			1,98	2,08										
170	4,59			1,87	1,96										
175	4,72			1,76	1,84	3,68	3,81								
180	4,86			1,66	1,74	3,48	3,60								
190	5,13			1,49	1,56	3,11	3,22								
200	5,40			1,34	1,40	2,80	2,90								
225	6,07			1,05	1,10	2,20	2,28								
250	6,74					1,77	1,83	3,35	3,49						
275	7,42					1,46	1,51	2,75	2,87						
300	8,09					1,22	1,26	2,30	2,40						
325	8,77					1,04	1,07	1,94	2,03	3,55	3,69				
350	9,44							1,67	1,74	3,04	3,17				
375	10,12							1,45	1,51	2,64	2,74				
400	10,79							1,27	1,32	2,30	2,40				
425	11,46							1,12	1,17	2,03	2,11				
450	12,14								1,04	1,80	1,88				
475	12,81									1,61	1,68				
500	13,49									1,45	1,51				
525	14,16									1,31	1,36	3,54	3,78		

Figura 48. Tabla para selección del tubo capilar para refrigerante 404.

Fuente: <http://www.cubigel.com/java/X?cgi=cubigel.infotecnica.InformacionTecnicaArticulo2.pattern&seccion=informaciontecnica#TablasGraficos>

Con la ayuda de la grafica anterior encontramos que la longitud del tubo capilar con un diámetro interno de 1mm es de $L_{cap}=2,64 m$.

El otro método consiste en la utilización del software CAP TUBE, proporcionado por la misma empresa fabricante de nuestro compresor, Tecumseh de Brasil, en la cual se introducen los parámetros de trabajo del sistema, tales como: refrigerante, diámetro interno del tubo capilar (1mm), carga térmica del sistema, temperatura de evaporación, temperatura de condensación; temperatura de succión y grado de subenfriamiento (dados por el fabricante del compresor).

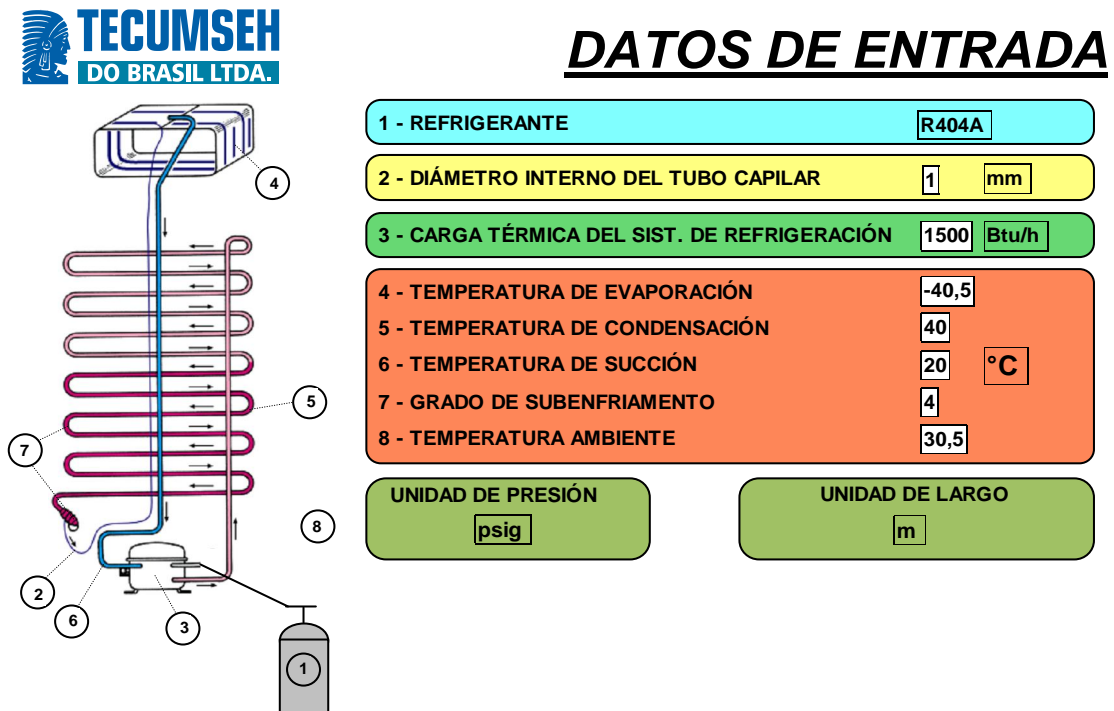


Figura 49. Cálculo del tubo capilar mediante utilización de CAP TUBE.

Fuente: <http://www.tecumseh.com.br>

Al introducir los datos requeridos, el programa lanza una tabla de resultados en la cual obtenemos un resultado muy similar al obtenido por el primer método anteriormente utilizado.

RESULTADOS

REFRIGERANTE	R404A	
CARGA TÉRMICA DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN	1500	Btu/h
TEMPERATURAS		
EVAPORACIÓN	-40,5	°C
CONDENSACIÓN	40	°C
LÍNEA DE SUCCIÓN	20	°C
SUBENFRIAMIENTO	4	°C
AMBIENTE	30,5	°C
PRESIONES		
EVAPORACIÓN	4,438	psig
CONDENSACIÓN	250	psig
TUBO CAPILAR SUGERIDO		
LARGO	2,671	m
DIÁMETRO INTERNO	1	mm

TECUMSEH DO BRASIL Ltda.

Figura 50. Resultados del cálculo del tubo capilar con CAP TUBE.

Fuente: <http://www.tecumseh.com.br>

Donde finalmente la longitud del tubo capilar es de:

$$L_{cap} = 2,67m.$$

4.3. SELECCIÓN DEL SISTEMA DE VACIO.

En el desarrollo del proceso de liofilización, una vez se logra mantener la congelación de los productos por debajo de -35°C, se requiere obtener una presión de vacío dentro de la cámara de 610 Pa (0,089 psi), para poder dar paso al proceso de retiro de humedad de los productos.

Para esto se realizó la selección de una bomba de vacío buscando realizar la disminución de la presión en un tiempo corto para que no se presente un aumento de la temperatura dentro de la cámara debido a la extracción continua de aire frío hacia el exterior.

Para el cálculo del caudal de la bomba a utilizar tomamos los siguientes datos:

Dimensiones de la cámara de trabajo

Altura: 860mm = 2,8215 ft
 Ancho: 650mm = 2,1325 ft
 Profundidad: 610mm = 2,001 ft

Vol = 12,039 ft³

Con el volumen de la cámara entramos a la tabla de selección de VACUUM PUMP para bombas de vacío de paletas rotativas en baño de aceite de doble efecto, estas bombas son especialmente diseñadas para ser utilizadas como bombas previas en aplicaciones de medio y alto vacío, indicadas para caudales elevados de bombeo en condiciones duras de trabajo.

Es necesario tener en cuenta que para evitar las fugas en la cámara se aplicó sello con fibra de vidrio en todas las uniones de construcción interna de las paredes y en los orificios de entrada de las tuberías, además la puerta lleva empaque magnético y doble manija de seguridad, pero en todo caso es casi imposible lograr una hermeticidad completa, por está razón aunque se trate de una cámara de pequeña se debe considerar la ineficiencia que se presenta por fugas internas.

MANUAL DE SELECCION		VACUUM PUMP		
PARAMETROS TECNICOS				
CARACTERISTICAS	UNID.	QVP-800	QVP-2000	QVP-4000
Caudal nominal	CFM	8	20	40
Capacidad de aceite	ml	500	5800	5000
Presión total última obtenible	Pa	5×10^{-4}	2×10^{-7}	2×10^{-7}
Potencia del Motor	HP	3/4	2	3

Voltaje	V/Hz	110/60	110/60	110/60
Peso neto	Kg	20,5	70	120
Dimensiones	mm	385x140x280	395X255X835	395X255X950

Figura 51. Datos técnicos de bombas de vacío VACUUM PUMP.

Fuente: Manual de selección VACUUM PUMP.

De acuerdo con los datos técnicos se seleccionó la bomba de vacío modelo QVP-800, la cual nos da un caudal de 8 CFM, el cuál nos dará el rendimiento suficiente, superando las pérdidas por fugas.



Figura 52. Bomba de Vácuo VACUUM PUMP modelo QVP-800.

Fuente: Fuente: Manual de selección VACUUM PUMP.

4.4. SELECCIÓN DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO.

El sistema de calentamiento es el encargado de generar el desprendimiento de la humedad del producto en forma de vapor, una vez el producto ha sido llevado a la temperatura de -35°C y en la cámara de trabajo se baja a una presión de vacío de 0,089 psi, se debe comenzar a suministrar calor al producto a través de unas resistencias de calentamiento instaladas en los portabanderas con el fin de acelerar la sublimación.

En el periodo siguiente se mantiene el vacío suficientemente alto y se controla el calor de manera que su intensidad sea un poco menor que la que se requeriría para derretir el hielo, de manera que, al proseguir, el límite del hielo se va retirando hacia el centro del alimento, es decir que el alimento se deshidrata desde la superficie hacia adentro. En esta fase el producto se sublima hasta un contenido en agua del 15% (sobre su peso húmedo).

La última etapa del secado comienza cuando se ha agotado el hielo en el producto y la humedad proviene del agua parcialmente ligada en el material que se está secando, el equipo se mantiene a baja presión y se eleva la temperatura hasta un valor próximo al del ambiente, la liofilización prosigue y el frente de sublimación se traslada hacia el interior del alimento. El vapor de agua escapa del alimento a través de los canales formados por la sublimación del hielo. En este punto el contenido de humedad del producto queda reducido hasta el 2% (sobre su peso húmedo).

4.4.1. Selección de las resistencias de calentamiento.

Las resistencias de calentamiento se fabricaron de acuerdo a las medidas de las placas portabandejas y teniendo en cuenta que el producto no puede llegar a pasar su temperatura de 60°C a la cual el hielo comenzaría a derretirse.

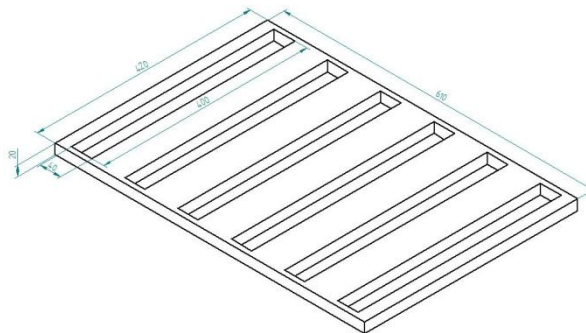


Figura 53. Placa Portabandejas modelada en CAD.

Fuente: autores

Como se puede observar en la figura 48, las placas portabandejas son fabricadas en una estructura acanalada para permitir el paso del vapor que se desprende de los productos, puesto que las resistencias serán instaladas bajo la estructura de la placa portabandejas, podemos obtener la longitud total de la resistencia.

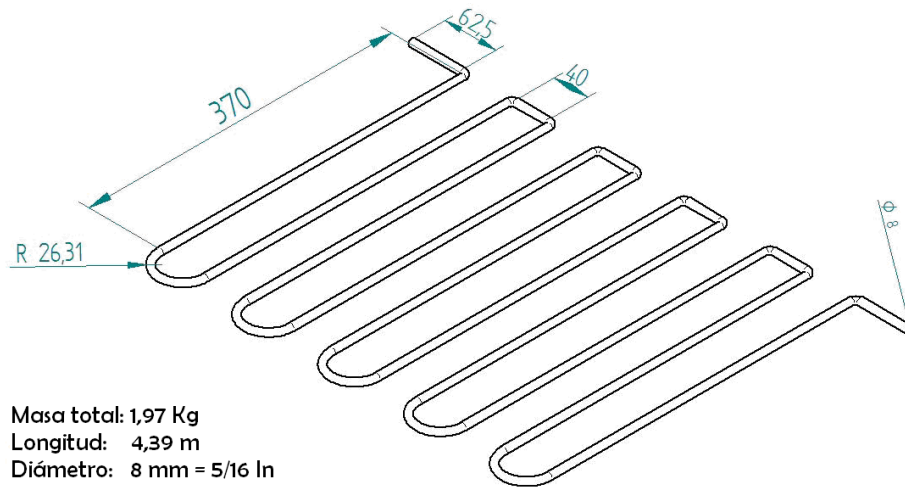


Figura 54. Resistencia de calentamiento modelada en CAD.

Fuente: autores

De acuerdo con esto la longitud total de la resistencia se halla sumando la longitud de cada uno de los tramos que la componen.

$$\text{Longitud} = 4,39 \text{ m}$$

Para la fabricación de la resistencia se escogió barra de cobre de 5/16 in, por eficiencia de calentamiento, para hallar la potencia de diseño de la resistencia tomamos los datos de calor específico y densidad del cobre puro:

$$C_{p_{\text{cobre}}} = 385 \text{ J/Kg} \cdot \text{K} \quad ^{27}$$

$$\rho_{\text{cobre}} = 8933 \text{ Kg/m}^3 \quad ^{28}$$

con la densidad y el volumen se halló la masa de cobre:

$$\text{Vol} = \pi \cdot r^2 \cdot L$$

$$\text{Vol} = \pi (0,004 \text{ m})^2 \cdot 4,39 \text{ m} = 0,00022 \text{ m}^3$$

$$m = \rho \cdot V = 8933 \text{ Kg/m}^3 \cdot 0,00022 \text{ m}^3 = 1,97 \text{ Kg}$$

Para determinar la potencia se requiere conocer la temperatura de calentamiento de la resistencia y el tiempo de trabajo; como los productos no pueden llegar a fundirse, tomamos el valor de temperatura máxima de los

²⁷ Tomado de Cengel Yunus A "Transferencia de Calor" 2da. Ed, Tabla A3, Pág. 720.

²⁸ Tomado de Cengel Yunus A "Transferencia de Calor" 2da. Ed, Tabla A3, Pág. 720.

productos de 60°C como temperatura máxima de las resistencias y se estimó que el calentamiento se realice en 20 minutos ya que el desprendimiento de humedad debe ser lento.

$$Q = m * C_p * \Delta T = 1,97 \text{ Kg} * 385 \text{ J/Kg} * \text{K} * (333,15 - 238,15) \text{ K} = 72096,80 \text{ J}$$

$$Q = 68,33 \text{ Btu}$$

Considerando que el calentamiento se realiza en 20 minutos entonces tenemos

$$\text{Pot} = 68,33 \text{ Btu} / (1/3 \text{ hora}) = 205 \text{ Btu/hora}$$

$$1 \text{ Watt} = 3,41 \text{ Btu/hora}$$

$$\text{Pot} = 60,11 \text{ Watts}$$

El sistema de calentamiento se compone entonces por tres placas portabandejas acanaladas con tres resistencias de 60 Watts a 220 Volt.

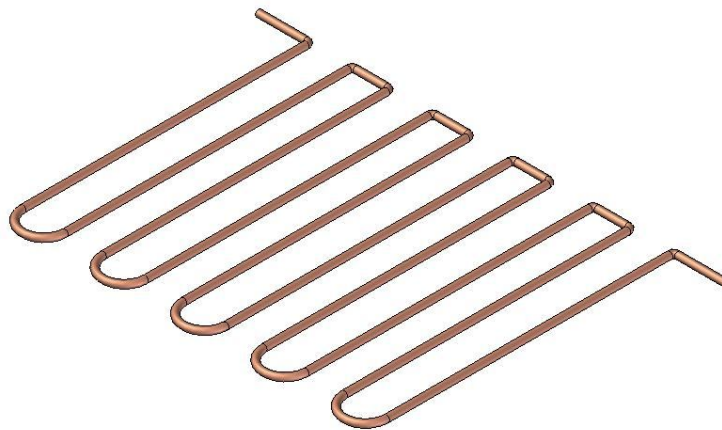


Figura 55. Esquema de una resistencia de calentamiento modelada en CAD.

Fuente: autores

4.5. SELECCIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL Y POTENCIA.

Para cumplir con la aplicación del presente proyecto de realizar el estudio de la implementación de un proceso de liofilización para productos agroindustriales en el medio local, se requiere dar un enfoque al diseño del liofilizador piloto como una aplicación netamente académica en la que se requiere que cada una de las etapas y condiciones del proceso sean realizadas de forma manual y visual por los estudiantes quienes realicen las prácticas, para poder familiarizarse con cada una de las fases del proceso de liofilización y con los subsistemas que componen el equipo.

Es necesario también contar con elementos que permitan realizar el monitoreo del comportamiento de los productos y la evolución del proceso dentro de la cámara de trabajo, para obtener más datos de cara al estudio de los resultados de la experimentación del proceso.

De acuerdo con esto se busca que la operación del equipo se realice de la forma más manual posible y con opción de visualización de los parámetros de progreso del proceso.

El montaje y selección del control se estructuró de acuerdo al orden de activación del funcionamiento de los sistemas de refrigeración, vacío, calentamiento y deshielo dentro de las distintas distribuciones, sus periodos de operación, de retardo, su control y sus señales de mando.

Para esto se hace conveniente describir el tipo de mando de control a usar para cada subsistema; detrás del cual se detallará cada uno de los arreglos dispuestos para la operación.

4.5.1. Control del sistema de refrigeración.

Para el control del sistema de refrigeración se escogió un controlador electrónico EKC 201 de Danfoss el cuál se ajusta adecuadamente a los requerimientos de funcionamiento.

El controlador electrónico EKC-201 de Danfoss es un dispositivo flexible que consiste en un termostato electrónico en el que se han integrado algunas funciones técnicas de refrigeración de forma que puede sustituir a un conjunto de termostatos y programadores tradicionales.

El controlador cuenta con dos sensores de temperatura, que captan las temperaturas de la cámara de trabajo y la temperatura del refrigerante a la salida del evaporador; una entrada digital (DI), y una serie de funciones de control de tiempo, a través del cual es posible programar los intervalos de funcionamiento y parada del compresor, intervalo entre desescarches, como también una serie de periodos de retardo del ventilador y alarmas.

El procesamiento interno por parte del controlador de estas señales captadas (temperatura) o programadas (intervalos de tiempo y límites de temperatura), son las que hacen posible el comando de los cuatro relés de salida que posee (relé de refrigeración, relé de desescarche, relé de ventiladores y relé de alarmas o luces); con lo cual se da lugar al apropiado control de temperatura on/off en el compresor o solenoide, control de desescarche eléctrico o desescarche por "gas caliente", control del ventilador del evaporador y control de las señales para alarma o luces.



Figura 56. Controlador EKC 201 de Danfoss.

Fuente: www.danfoss.com

4.5.1.1. Principio de funcionamiento.

El control de temperatura se realiza a través de una sonda o sensor Pt 1000 PTC ($R_{25} = 1000 \text{ ohm}$), el cual normalmente se colocará en la corriente de aire a la entrada, o salida del evaporador.

Los controladores permiten realizar el control de temperatura ambiente por arranque/parada de compresor o solenoide y se han agrupado en cuatro aplicaciones principales, dependiendo del tipo de desescarche y su control.

Los controladores se utilizan para:

- control de temperatura
- control de desescarche
- control de ventilador
- señales de alarma

Función	Aplicación			
	1	2	3	4
Control de temperatura ambiente por arranque/parada de compresor o solenoide				
Desescarche natural				
Desescarche eléctrico o por gas caliente controlado por temperatura				
Desescarche eléctrico o por gas caliente controlado por tiempo				
Control del ventilador				

Figura 57. Aplicaciones del controlador EKC 201 de Danfoss.

Fuente: Folleto Técnico "Controladores electrónicos EKC 201 y EKC 301" Danfoss 2006

Para el diseño del liofilizador piloto se escogió la aplicación 3 con la cuál se controla la temperatura ambiente por arranque/parada del compresor, se ejerce descongelmiento eléctrico controlado por tiempo y el control del ventilador del evaporador.

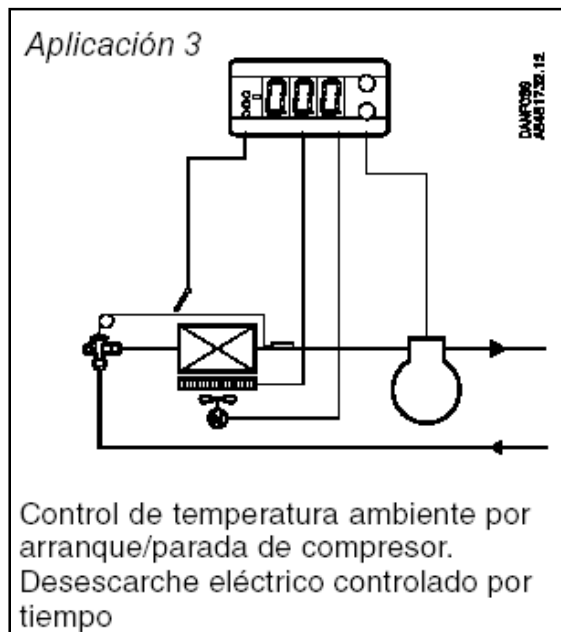


Figura 58. Aplicación # 3 del controlador EKC 201 de Danfoss.

Fuente: Folleto Técnico "Controladores electrónicos EKC 201 y EKC 301" Danfoss 2006

Se dispone de dos a cuatro relés de salida cuya función depende de la aplicación seleccionada (ver figura 57):

- Relé de refrigeración C (activación del compresor)
- Relé de desescarche D (activación de la resistencia eléctrica)
- Relé de ventilador F
- Relé de alarma o luces A

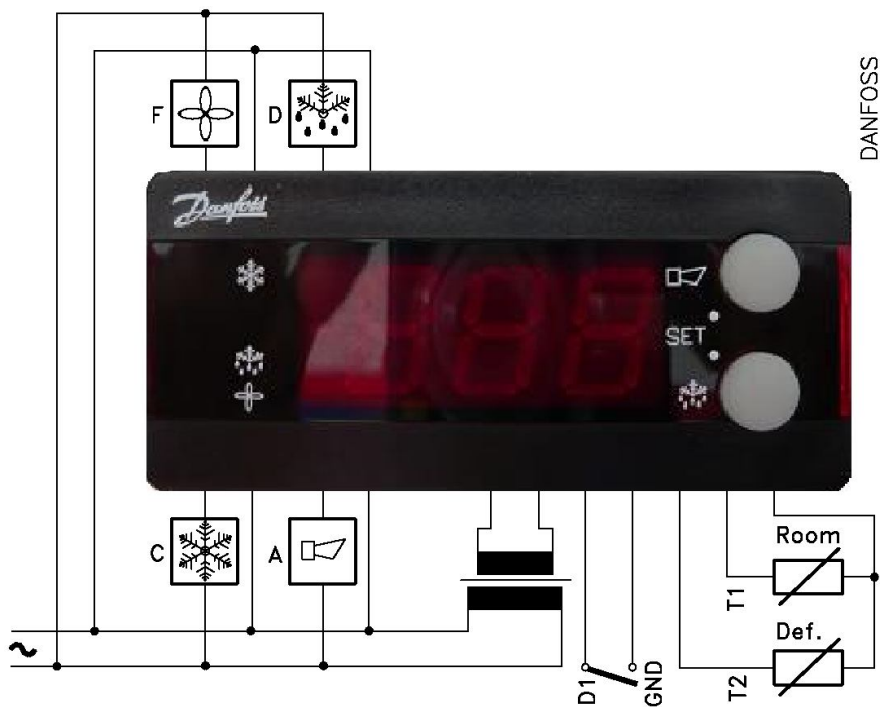


Figura 59. Señales de entrada y salida del controlador EKC 201 de Danfoss.

Fuente: autores

4.5.1.1.1. Control en el Congelamiento.

Durante el congelamiento el control del sistema se enfoca en la conservación de la temperatura de la cámara de congelación, arrancando o parando el compresor a través del relé C que trabaja en función del termostato.

Además del relé C, se mantiene activo el relé F el cual permite el funcionamiento del ventilador del evaporador garantizando la distribución del aire frío dentro de las cámaras.

El relé C sólo se activa cuando el termostato demanda refrigeración, condición que se cumple cuando la temperatura dentro de la cámara de congelación, captada por el sensor T₁, supera el valor de referencia más el diferencial (r01)²⁹.

El relé de nuevo se desactivará cuando la temperatura baje al punto de consigna (Temperatura de corte).



Figura 60. Diferencial de temperatura del controlador EKC 201 de Danfoss.

Fuente: Folleto Técnico "Controladores electrónicos EKC 201 y EKC 301" Danfoss 2006

No obstante, para evitar funcionamientos irregulares, se pueden ajustar valores para controlar los tiempos de funcionamiento (c01) y parada del compresor (c02) mediante el temporizador incorporado el controlador.

Adicionalmente a los parámetros ya mencionados se deben fijar en el controlador los ajustes pertinentes al periodo de congelamiento los cuales se estipulan en la siguiente tabla.

Función	Código	Ajuste
<i>Temperatura de corte</i>	---	-40 °C

²⁹ En adelante se mostraran algunos códigos correspondientes a la programación interna del controlador, para mayor información ver el Folleto Técnico del Controlador electrónico EKC 201, en el Anexo 2

<i>Diferencial del termostato</i>	r01	7 K
<i>Limite máximo al ajustar la temperatura de corte</i>	r02	43 °C
<i>Limite mínimo al ajustar la temperatura de corte</i>	r03	-43 °C
<i>Mínimo tiempo de compresor en marcha</i>	c01	15 min
<i>Mínimo tiempo entre dos arranques consecutivos</i>	c02	15 min
<i>Parar ventilador al parar compresor</i>	F01	NO

Tabla 9. Configuración de parámetros para el congelamiento.

Fuente: autores

4.5.1.1.2. Control en el Desongelamiento.

El control en el periodo de descongelamiento se hace esencial en sus puntos de quiebre, es decir, en el inicio y finalización del mismo, para el caso del liofilizador piloto el descongelamiento se realiza al final del proceso de liofilización completo.

Por facilidad de construcción y eficiencia se seleccionó descongelamiento eléctrico controlado por tiempo, en este tipo de deshielo se usa una resistencia eléctrica ubicada cerca al serpentín evaporador, la cual eleva su temperatura hasta fundir el hielo formado en la superficie del mismo.

A manera general el ciclo de descongelamiento eléctrico se inicia con la detención del compresor por el controlador electrónico EKC-201. Inmediatamente, se energiza el elemento de calentamiento del evaporador, en este caso la resistencia eléctrica, y se apaga el ventilador de manera que el calor no es sacado del espacio refrigerado. Después que se ha descongelado el evaporador, la resistencia eléctrica es desenergizada por el relé de desescarhe, activándose simultáneamente tanto la válvula solenoide de la línea de líquido y el compresor, permitiendo la operación normal del sistema.

Para efectuar la apropiada sincronización, anteriormente descrita, de los elementos que actúan en el proceso de deshielo eléctrico, es necesario realizar en el controlador una serie de ajustes en los parámetros de funcionamiento del mismo; algunos de ellos dependen del tipo de control empleado (tiempo, temperatura) y se presentan a continuación:

Función	Código	Ajuste
<i>Tipo de desescarhe</i>	d01	EL

Temperatura de fin de desescarche	d02	-----
Intervalo de tiempo entre desescarches	d03	6 horas
Duración máxima de desescarche	d04	20 minutos
Desplazamiento del 1er deshielo	d05	60 minutos
Tiempo de goteo	d06	3 minutos
Retardo del ventilador tras desescarche	d07	1 minuto
Ventilador en marcha durante desescarche	d09	no
Sonda de fin de desescarche	d10	0 = no
Desescarche bajo demanda(temp)	d19	-----

Tabla 10. Configuración de parámetros para el descongelamiento eléctrico.

Fuente: autores

A través del parámetro d01 se selecciona el descongelamiento eléctrico (EL) mediante el cual el relé de desescarche D funcione de acuerdo a esta configuración. Este ajuste influye en el funcionamiento del relé del compresor (C) desactivándolo durante el desescarche.

- Inicio de descongelamiento eléctrico controlado por tiempo

Con la función d05 (desplazamiento del 1er deshielo tras dar tensión al equipo) se programa el intervalo de tiempo para el cual el controlador realiza el primer desescarche después de que se conecta el EKC 201.

Complementario a esto se debe ajustar el parámetro correspondiente al intervalo de tiempo entre desescarches (d03), fijando así los deshielos periódicos, que se realizarán después de haberse realizado el primero en d05.

En el presente tipo de deshielo los elementos del sistema conservan el siguiente estado:

El compresor debe permanecer apagado durante el periodo de descongelamiento, para evitar daños en el sistema debidos al exceso de presión en la línea de alta que se encontrará bloqueada tanto por la válvula solenoide de líquido como por la de gas caliente. El relé del compresor C se apaga automáticamente cuando el relé de desescarche D se activa, deteniendo el funcionamiento del compresor.

Una vez activado el relé D se activa la resistencia eléctrica de descongelamiento e inactiva la válvula solenoide de líquido (que impide la inundación de refrigerante al evaporador).

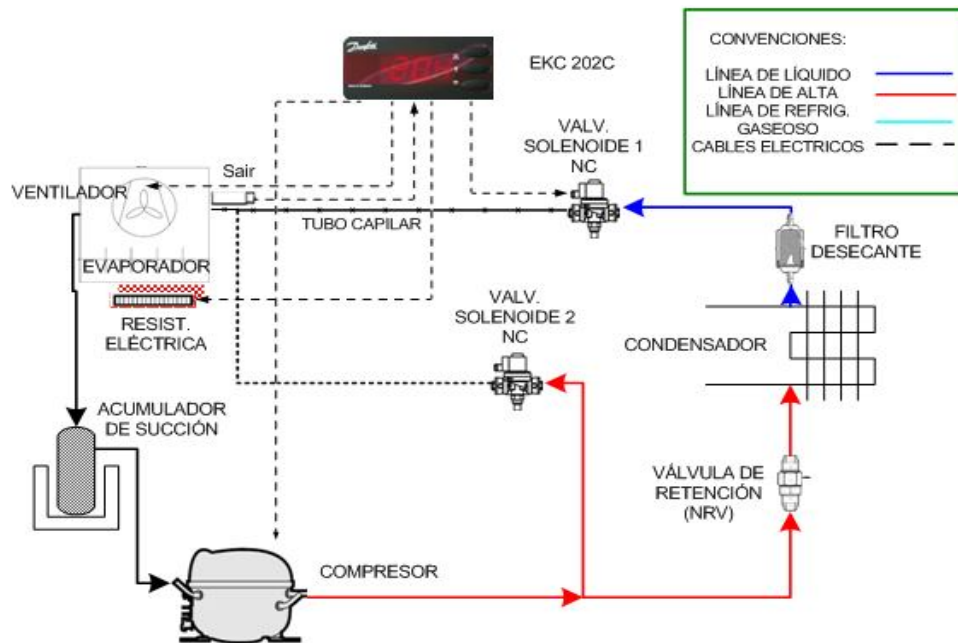


Figura 61. Control de temperatura ambiente por arranque/parada de compresor. Desescarche eléctrico controlado por tiempo.

Fuente: autores

- Fin de descongelmiento eléctrico controlado por tiempo

Para terminar los desescarches en el tiempo deseado se debe programar siempre un valor de duración máxima del desescarche, a través del parámetro codificado en d04

4.5.2. Control del sistema de calentamiento.

Una vez se logra el vacío en la cámara de trabajo se requiere encender las resistencias de calentamiento del producto para iniciar el proceso de desprendimiento de vapor, para el diseño del liofilizador piloto se requiere que esta función se maneje de forma manual, ya que el control del sistema de vacío se realiza con un manovacuómetro análogo, el cuál no permite el envío de una señal digital para el encendido de las resistencias.

Para el funcionamiento del sistema de calentamiento se requiere hacer control de dos variables que definen su encendido y apagado; la temperatura del

producto a lo largo del proceso y la temperatura de las resistencias durante la etapa de calentamiento.

Cuando se alcanza la presión de vacío dentro de la cámara de trabajo, se debe visualizar la temperatura del producto, cuando esta se logra mantener en -35°C , el sistema de refrigeración se apaga y se enciende el sistema de calentamiento de forma manual, se empieza a realizar el desprendimiento de vapor seco del producto manteniendo la cámara con el vacío suficiente y se debe controlar que los productos en ningún momento sobrepasen un valor de temperatura de 60°C .

Para realizar el control de temperatura de los productos y las resistencias se seleccionaron dos controladores de temperatura TOKY TE7/TM7 los cuales a través de una termocupla permiten visualizar la evolución de las temperaturas a lo largo del proceso y manejar el encendido y apagado de las resistencias durante la etapa de calentamiento.

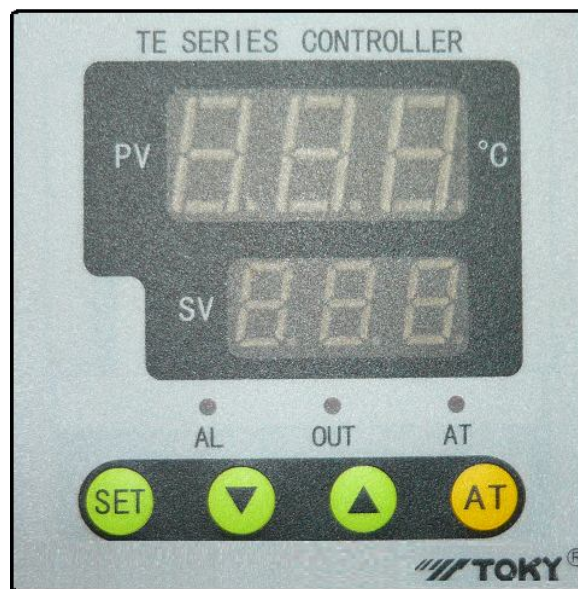


Figura 62. Controlador de temperatura TOKY TE7/TM7

Fuente: autores

4.5.3. Sistema de potencia eléctrico del liofilizador Piloto.

El sistema de potencia eléctrico del liofilizador piloto requiere una fuente de tensión de 220V, dado que la mayoría de los elementos que hacen parte del mismo así lo demandan; sin embargo, el controlador electrónico EKC 201 es el único dispositivo que necesita para su funcionamiento una fuente de tensión de 12V, para lo cual es empleado un convertidor de voltaje 220V a 12V para mecanismos de hasta 50 Watt.



Figura 63. Convertidor de Voltaje Danfoss 220V-12V

Fuente: autores

En el diagrama de cableado, se encuentran elementos adicionales que cumplen una función relevante en el control de los actuadores principales.

El sistema de potencia eléctrico está compuesto por un breaker totalizador que por seguridad se instaló para efectos de control de sobrecargas en el sistema, por medio de este elemento se energizan los demás componentes; un contactor principal y cuatro relés que permiten o interrumpen el flujo de corriente hacia los elementos que requieren de energía durante ciertos momentos específicos.

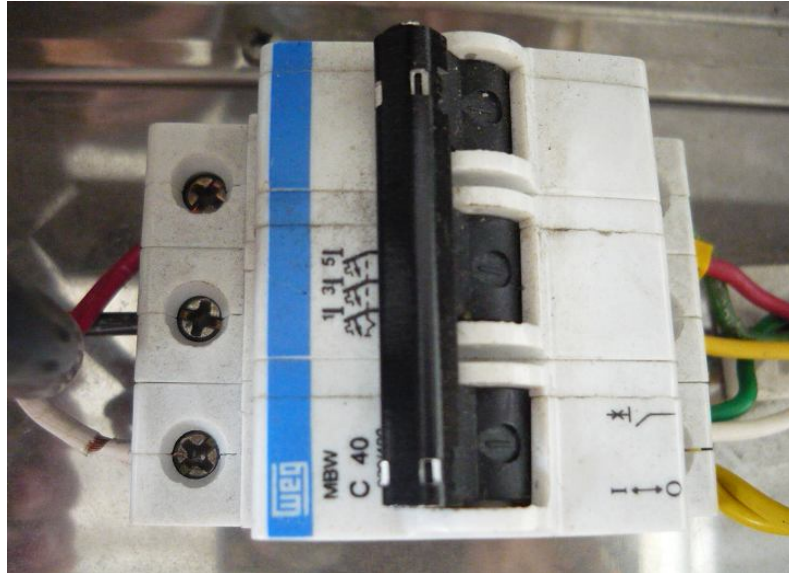


Figura 64. Breaker trifásico de 50 Amp.

Fuente: autores

El contactor principal es un relevo de 1 Hp a 220 V con cabeza para contactos auxiliares, integrado a el se instaló un Relé térmico de de 20 Amp. Para protección por temperaturas del sistema.

El contactor principal es alimentado por el breaker totalizador y este a su vez alimenta a los relés R1, R2 y R3; el relé R4 es alimentado directamente por el breaker totalizador.

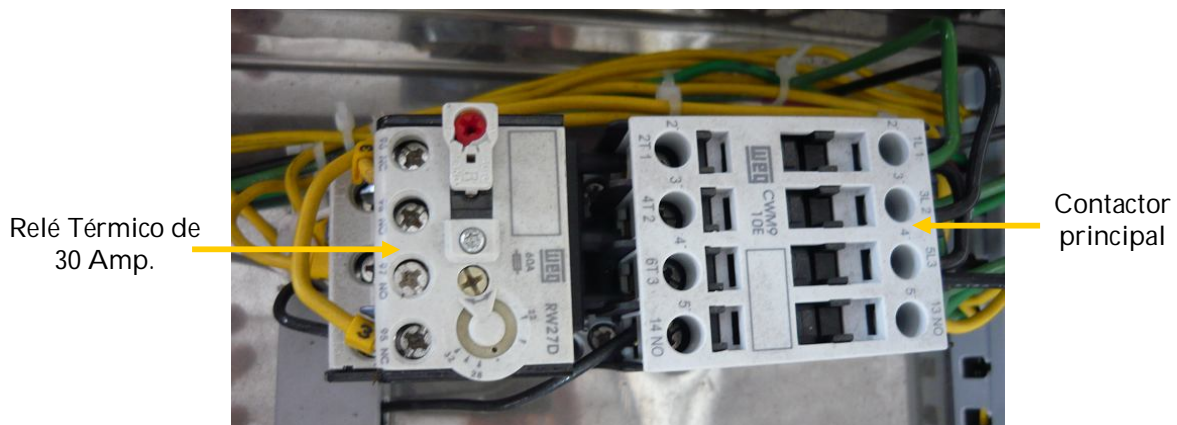


Figura 65. Contactor principal con el relé de protección térmica.

Fuente: autores

Los relés tienen la función de suministrar la potencia eléctrica a los subsistemas del liofilizador piloto para realizar su tarea; el relé R1 es el encargado de arrancar las resistencias de descongelamiento y apagar el ventilador del evaporador mediante una señal enviada por el controlador EKC 201, el R2 recibe la señal del switch de vacío de activación manual y da paso al funcionamiento de la bomba de vacío, el relé R3 se acciona con el switch principal del equipo y acciona ventilador del evaporador y envía señal hacia el relé R4 para dar apertura a la operación del sistema de refrigeración.

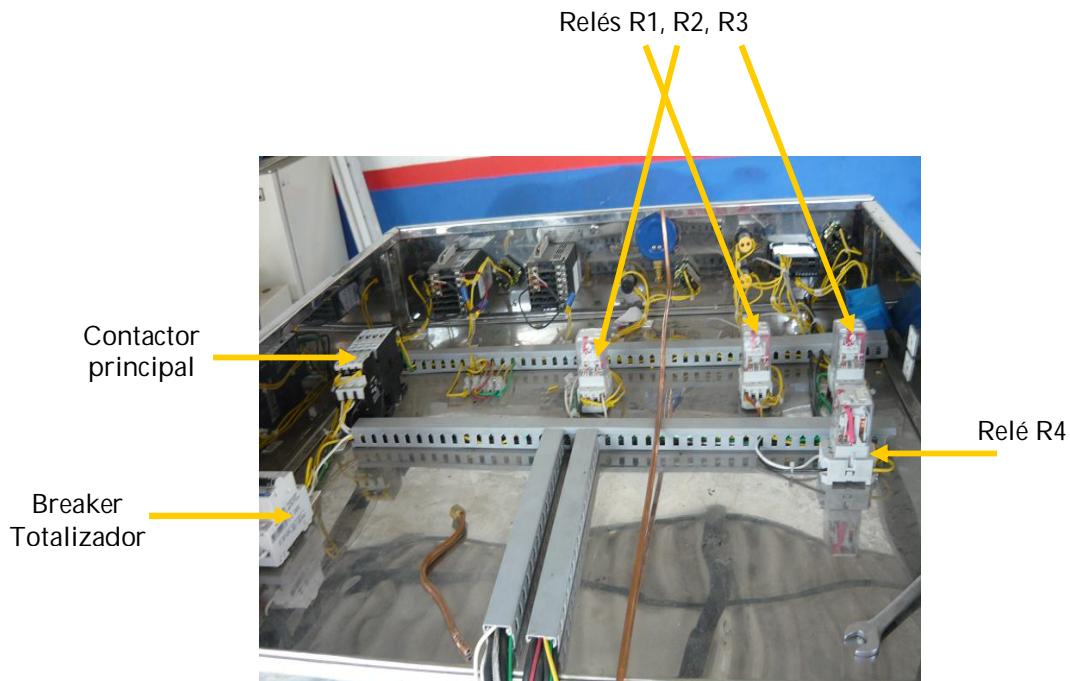


Figura 66. Vista panorámica del sistema de potencia eléctrica.

Fuente: autores

El relé R2 además recibe señal del control de presión de la Bomba de vacío el cuál al superar el taraje límite de presión interrumpe la señal eléctrica y apaga la bomba de vacío.

Al relé R3 le llega la señal de presión del control del compresor el cual apaga el compresor el cuál lo apaga por presión de baja cuando supera este límite.



Figura 67. Relevos VCP de 8 pines a 220 V (Relés R1, R2, R3 y R4).

Fuente: autores

En el esquema eléctrico del sistema se muestra la disposición de cada uno de los componentes que constituyen el sistema de potencia eléctrica, así como el cableado, los pilotos de señalización y los switches de arranque de cada subsistema.

Se indica la conexión del sistema de potencia con los controladores de temperatura y con el control EKC 201 del sistema de refrigeración, para señalización se utilizaron identificadores numerados.

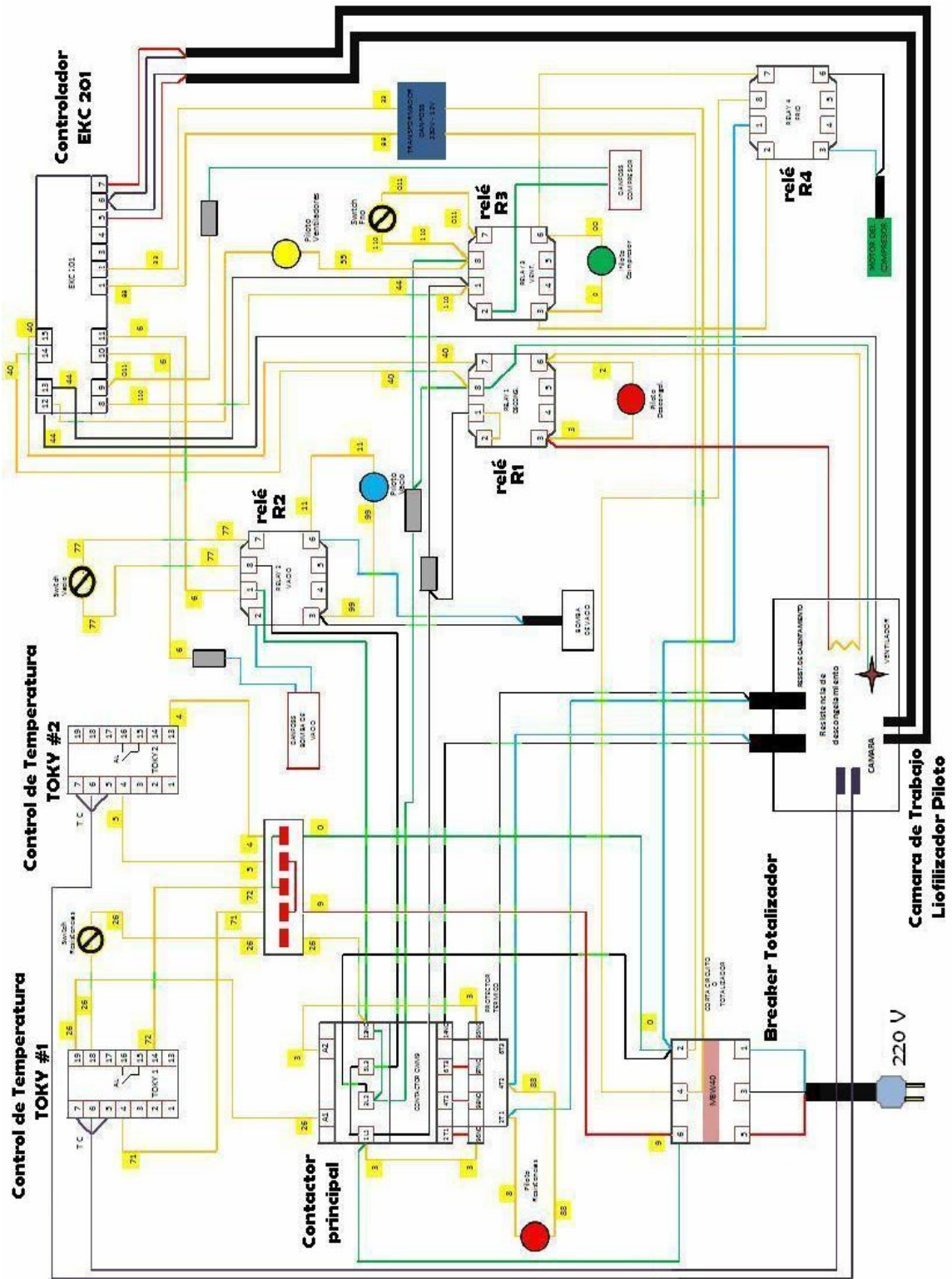


Figura 68. Esquema eléctrico del sistema.

Fuente: autores

5. ARGUMENTACION DE DISEÑO.

Con el diseño y construcción del liofilizador piloto es posible reproducir el proceso de liofilización en condiciones idénticas a un equipo industrial, con lo que se puede dar paso a la realización del estudio sobre su aplicabilidad en el medio local, buscando dar cobertura a la necesidad de obtener nuevos productos agroindustriales mediante este novedoso método de deshidratación al vacío.

En el capítulo anterior se determinaron todos los cálculos y los parámetros de selección de los sistemas y elementos que componen el liofilizador piloto. A continuación se describirá el sistema operativo del equipo y cada uno de los elementos que lo componen y se corroborará que cumplan con los requerimientos de diseño aquí calculados.

5.1. Descripción del sistema operativo.

El liofilizador piloto es un sistema semiautomático de liofilización, que permite realizar la deshidratación de pequeñas muestras de productos agroindustriales mediante secado al vacío de manera óptima y eficiente.

Consta de una estructura base y cuatro subsistemas principales que se encargan de realizar las funciones básicas para realizar el proceso de liofilización:

- ✘ Cámara de trabajo.
- ✘ Sistema de refrigeración.
- ✘ Sistema de Vacío.
- ✘ Sistema de calentamiento.

La estructura base consiste en un mueble en el cual se encuentra ubicada la cámara de trabajo y sobre el que se soportan cada uno de los componentes de los sistemas principales del equipo.

Dentro de la cámara de trabajo se encuentran las placas portabandejas, sobre las cuales se colocan las bandejas cargadas con el producto a liofilizar, también se encuentra el sistema de calentamiento que consiste en unas

resistencias calefactoras instaladas debajo de las placas portabandejas y tiene por función el suministro de calor a los productos una vez se ha llevado a los valores de temperatura y presión requeridos dentro de la cámara de trabajo.

El sistema de refrigeración está ubicado en la parte inferior del mueble y basa su principio de funcionamiento en una unidad condensadora y un evaporador aleteado ubicado dentro de la cámara de trabajo y que son los encargados de lograr bajar la temperatura de los productos dentro de la cámara.

La operación se inicia con la alimentación del producto a liofilizar en la cámara de trabajo, en donde el sistema de refrigeración se encarga de llevar la temperatura del producto por debajo de -35°C .

El sistema para su operación tiene un tablero de control que por ergonomía y facilidad de visualización de datos por parte del operario se encuentra ubicado en la parte superior del mueble, este tablero se compone de tres switches con los que se energizan los subsistemas de la máquina, un controlador para el sistema de refrigeración, un manovacuómetro para indicar la presión de vacío dentro de la cámara y dos controles de temperatura encargados de monitorear y controlar las temperaturas del producto y las resistencias de calentamiento.

El sistema de vacío está compuesto por una bomba de vacío que se encuentra ubicada en la parte inferior del mueble junto al sistema de refrigeración y es el encargado de llevar la cámara de trabajo a una presión de vacío de 610 Pa.

Una vez se ha logrado el vacío se observa el comportamiento de la temperatura del producto cuando se logra mantenerla en el valor de -35°C se apaga el sistema de refrigeración y se enciende el sistema de calentamiento para continuar con el desarrollo del proceso de liofilización, se continúa manteniendo la cámara a baja presión y se eleva la temperatura hasta un valor próximo al del ambiente, la liofilización prosigue y el contenido de humedad del producto queda reducido hasta el 2%.

A continuación se hace una breve descripción de cada uno de los elementos y conjuntos que componen el liofilizador piloto para dar mayor claridad a la descripción del sistema como tal.

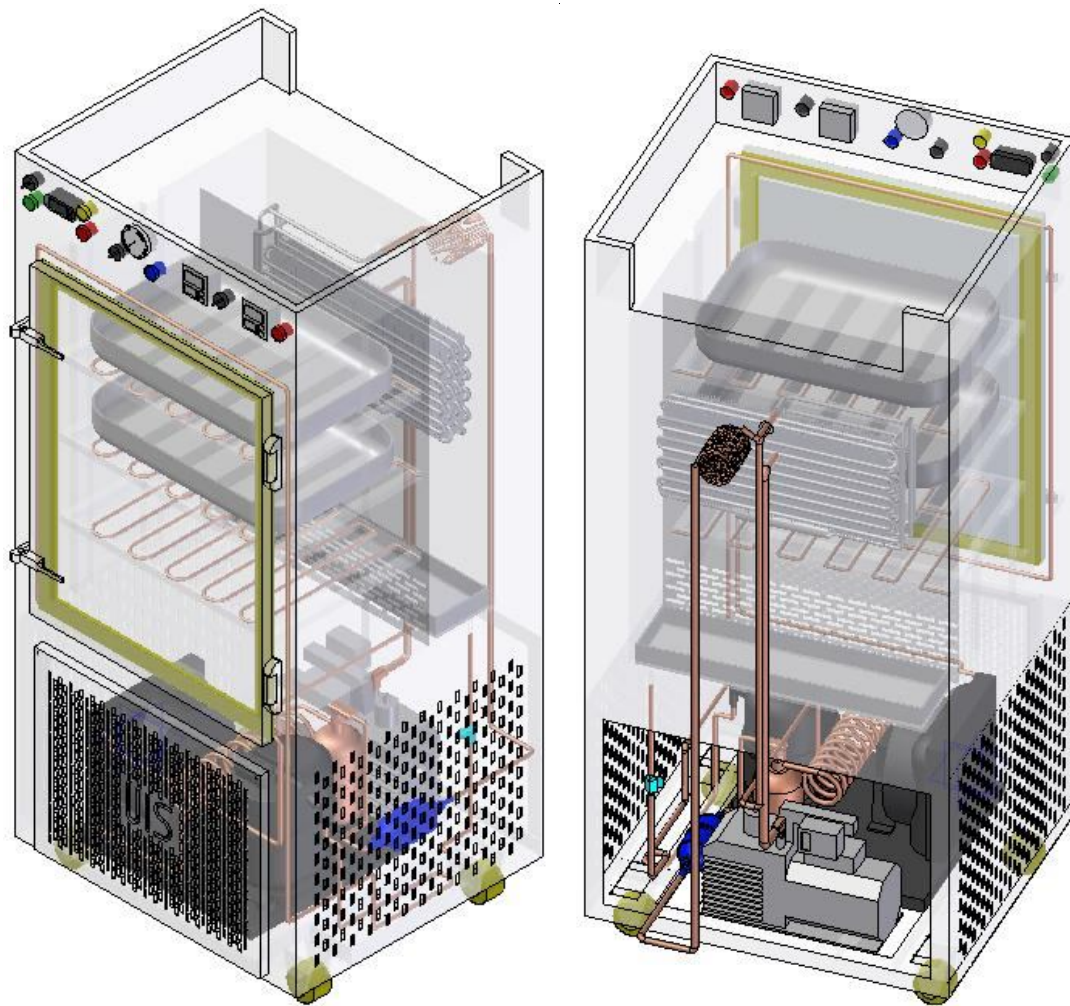


Figura 69. Liofilizador piloto modelado en CAD.

Fuente: autores

5.2. Descripción de los componentes.

Todos los elementos y materiales de construcción de los sistemas que componen el liofilizador piloto son de fácil consecución en el mercado local, se revisó su estandarización y soporte técnico.

Se realiza una breve descripción de cada uno de estos elementos, explicando sus características técnicas y su ubicación y función principal en el liofilizador piloto.

5.2.1. Mueble.

Como se había mencionado el mueble es la estructura principal del liofilizador piloto, sobre el se soportan todos los elementos de los sistemas que lo componen, el mueble consiste en un armazón de 169 cm de alto, 80 cm de ancho y 70 cm de profundidad, construido completamente en **Acero Inoxidable Brillante 430 calibre 22**, y soportado en una estructura de ángulo coll roll con uniones remachadas y en soldadura.

El mueble presenta un diseño ergonómico con mandos y controles de fácil manejo por parte del operador y una estructura compacta de fácil traslado para efecto de pruebas, la cual cuenta con la suficiente resistencia mecánica para soportar los componentes apoyados en el, además tiene rejillas de fácil montaje y desmontaje para mantenibilidad.

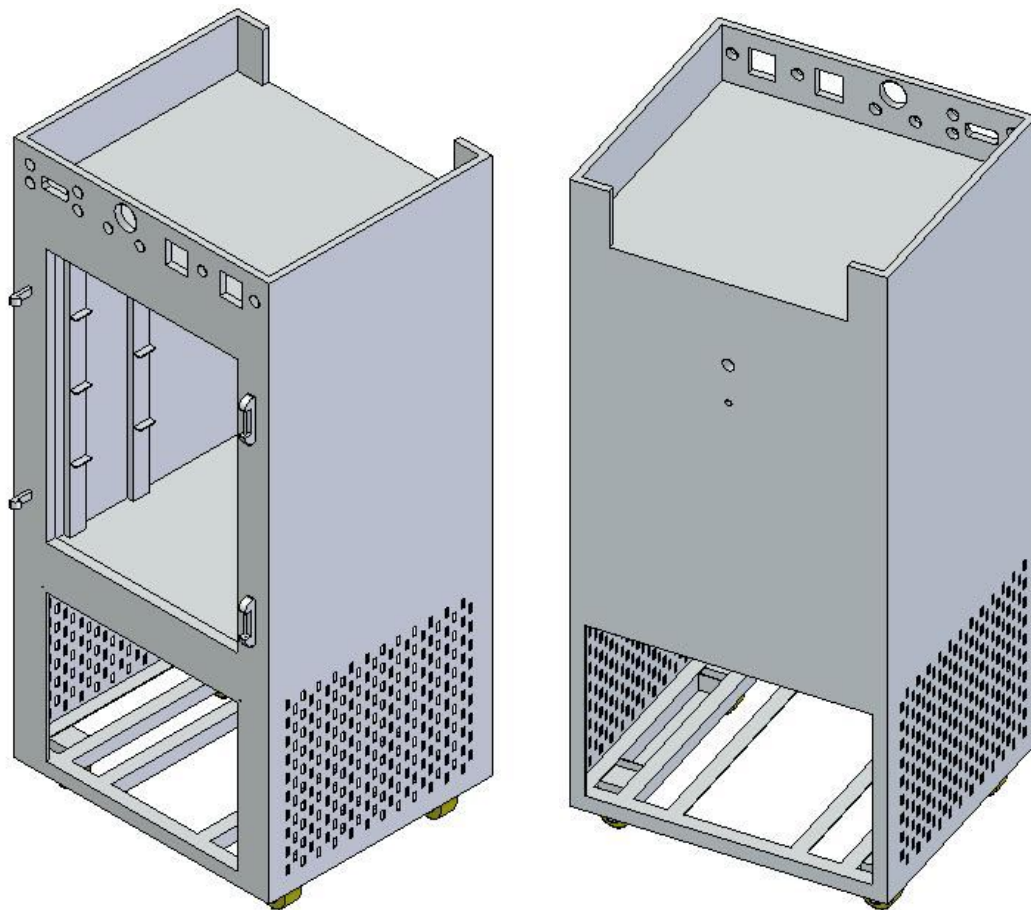


Figura 70. Mueble modelado en CAD.

Fuente: autores

En la parte inferior de la estructura se encuentran ubicados los sistemas de refrigeración y vacío con sus respectivos componentes y tubería, en la parte intermedia se encuentra la cámara de trabajo compartimentada con tres placas portabandejas sobre las cuales se colocan las bandejas cargadas con el producto a liofilizar y en la parte superior frontal se ubica el tablero de control y sobre la estructura está montado el sistema de potencia eléctrica del equipo.

5.2.2. Puerta.

La puerta de la cámara de trabajo está fabricada en acero Inoxidable Brillante 430 calibre 22, con una capa de aislamiento interno de poliuretano de 45 mm. Tiene 86 cm de alto, 66 cm de ancho y 4,5 cm de espesor, para mantener la hermeticidad dentro de la cámara se puso un empaque magnético en el marco de la puerta y dos manijas de seguridad para aplicar más presión al empaque.

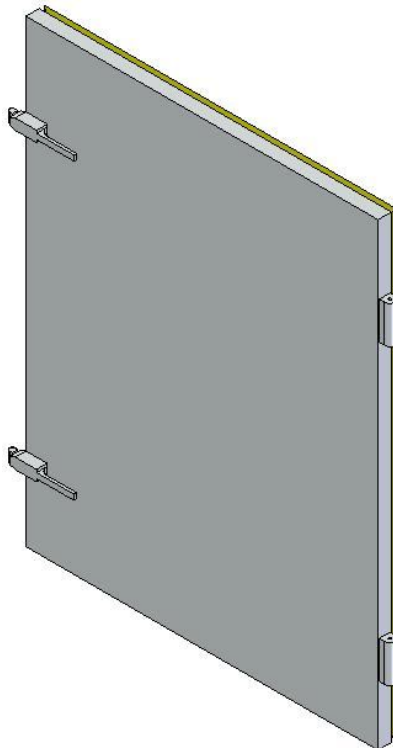


Figura 71. Puerta con manijas de seguridad y empaque, modelada en CAD.

Fuente: autores



Figura 72. Manijas de seguridad de la puerta de la cámara.

Fuente: autores

5.2.3. Cámara de Trabajo.

La cámara de trabajo es un espacio de 86 cm de alto, 65 cm de ancho y 61 cm de fondo; compartimentado con tres placas portabandejas, en donde se lleva a cabo todo el proceso de deshidratación de los productos, construida internamente en acero Inoxidable Brillante 430 calibre 22, sus paredes llevan un espesor intermedio de aislamiento de poliuretano de 75 mm, para reducir al máximo la transferencia de calor entre la cámara y el ambiente exterior y todas las uniones y remaches de construcción de la cámara están sellados con Sica flex 2-21 y resina de fibra de vidrio para lograr la hermeticidad en todo su interior.

La cámara de trabajo está dividida en dos partes, en el fondo está ubicado el evaporador que es el encargado del intercambio de energía entre el refrigerante y la carga presente en la cámara y también se encuentra el recipiente recolector de agua de descongelamiento, estos elementos van tapados por una placa troquelada para permitir la recirculación de la corriente de aire por el evaporador para el enfriamiento, delante de esta tapa se ubican las placas portabandejas y el sistema de calentamiento de los productos, en esta zona la cámara lleva cremalleras donde se montan las tres placas portabandejas y se instalan las resistencias de calentamiento. Las bandejas de carga del producto se montan sobre unas pequeñas guías evitando que queden en contacto directo con las placas calentadoras.

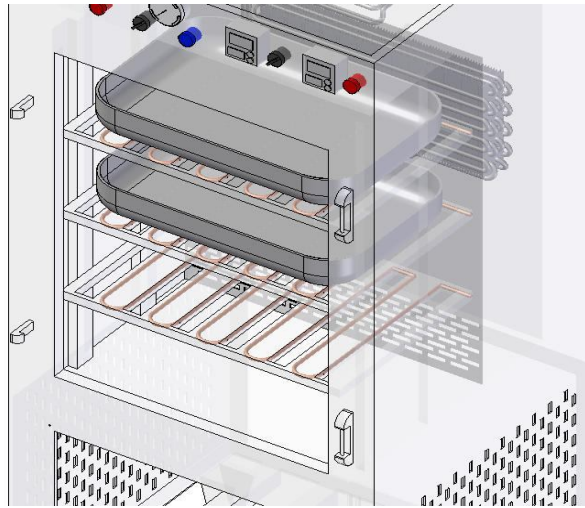


Figura 73. Cámara de trabajo modela en CAD.

Fuente: autores

5.2.4. Placas portabandejas.

Al igual que todos los elementos de construcción interna, las placas portabandejas son fabricadas en acero Inoxidable Brillante 430 calibre 22, consisten en una estructura de 61 cm de ancho, 42 cm de profundidad y un espesor de 2 cm, su diseño acanalado permite el paso del vapor que se desprende de los productos, los canales tienen 4 cm de ancho.

Las placas se instalan en la cámara mediante unas cremalleras instaladas en las paredes y se pueden remover fácilmente para efectos de mantenimiento.

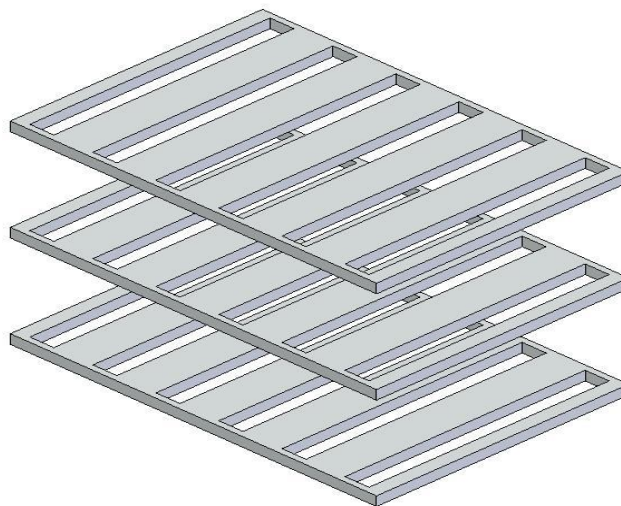


Figura 74. Placas portabandejas modelas en CAD.

Fuente: autores

5.2.5. Bandejas.

Las bandejas son charolas de acero inoxidable fabricadas por prensado y en ellas se coloca el producto a liofilizar, sus dimensiones son 57 cm de ancho, 38 cm de profundidad y 8 cm de alto.

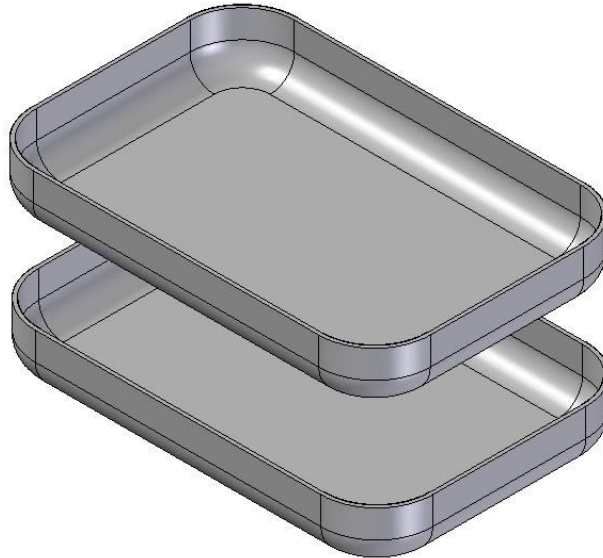


Figura 75. Bandejas modelas en CAD.

Fuente: autores

5.2.6. Sistema de calentamiento.

El sistema de calentamiento es el encargado de generar el desprendimiento de la humedad del producto en forma de vapor cuando se alcanzan los valores de presión y temperatura requeridos para el producto dentro de la cámara, se compone de tres resistencias de 4,4 m de largo, fabricadas en tubo de cobre, de 60 Watts de potencia a 220 Volt.

La temperatura de las resistencias es controlada mediante el control de temperatura TOKY #1, el cuál está programado para que cada vez que la resistencia llegue a una temperatura de 60°C se envíe una señal y se apaguen; esto con el fin de evitar que el producto llegue a la temperatura de fusión y el hielo comience a derretirse durante el proceso y el secado no se realice en seco, y tambien para evitar que los productos se quemen en la parte final del proceso cuando se ha retirado el mayor porcentaje de humedad.

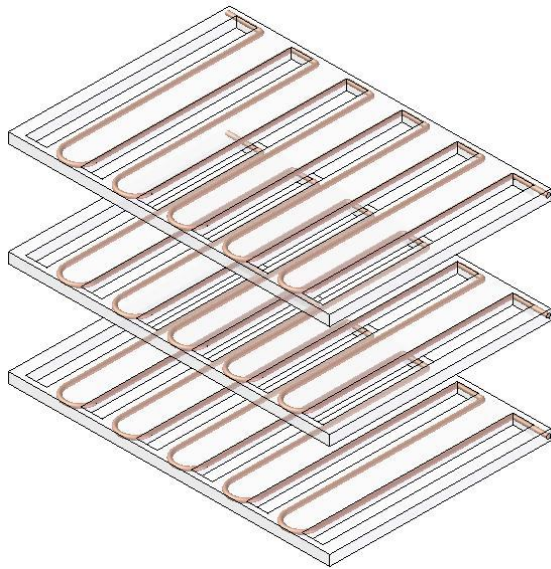


Figura 76. Resistencias de calentamiento montadas en las placas portabandejas, modelas en CAD.

Fuente: autores

5.2.7. Sistema de vacío.

El sistema de vacío es el encargado de lograr una presión dentro de la cámara de 610 Pa (0,089 psi), para poder dar paso al proceso de retiro de humedad de los productos. Está compuesto por una bomba de vacío de paletas rotativas en baño de aceite de doble efecto VACUUM PUMP modelo QVP-800, de 8 CFM de caudal, diseñada para ser utilizada en aplicaciones de medio y alto vacío, indicada para caudales elevados de bombeo en condiciones duras de trabajo. Sus dimensiones son 385 mm x 140 mm x 280 mm, y pesa 20,5 Kg. Utiliza motor de $\frac{3}{4}$ hp y un voltaje de 110 V a 60 Hz.

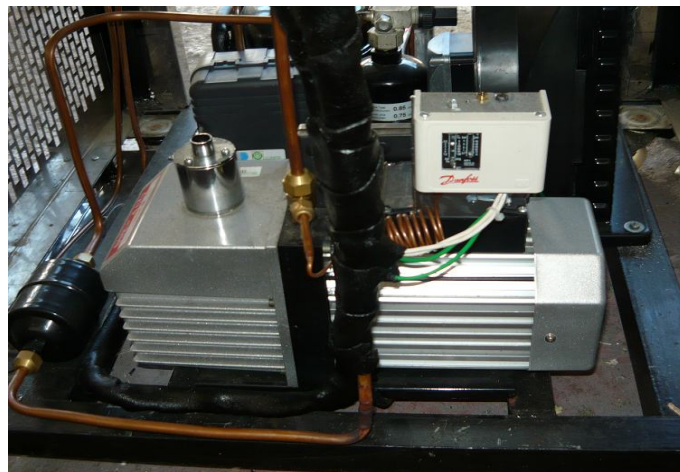


Figura 77. Bomba de Vacío.

Fuente: autores

La medición de la presión de vacío se realiza mediante un manovacuómetro análogo, que permite la medición de bajas presiones de vacío en psi.



Figura 78. Manovacuómetro para medición de presión de vacío.

Fuente: autores

Para el control de la presión de vacío dentro de la cámara se utiliza un control de presión de vacío de Danfoss el cual está tarado en un valor permitido de presión y si la bomba sobrepasa este límite, se envía una señal de alarma al controlador EKC 201 y este apaga la bomba.



Figura 79. Control de presión de vacío Danfoss.

Fuente: autores

5.2.8. Sistema de refrigeración.

El sistema de refrigeración está diseñado para operar por baja presión de retorno (Low Back Pressure), la capacidad de la unidad condensadora junto

con la disposición del evaporador y el aislamiento, permiten la obtención de la temperatura de congelación muy baja requeridas para la condensación y posterior congelamiento de la humedad presente en las cercanías del evaporador. A continuación se describen los elementos principales del sistema de refrigeración.

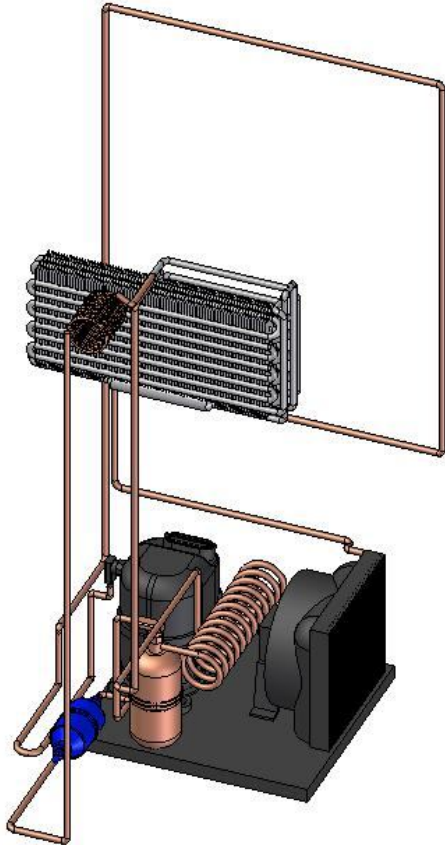
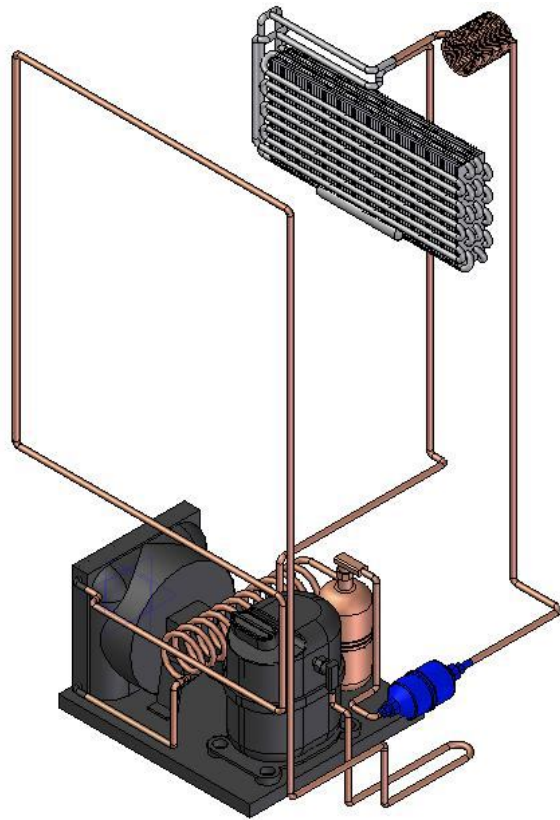


Figura 80. Sistema de refrigeración modela en CAD.

Fuente: autores

5.2.8.1. Unidad condensadora.

La unidad condensadora pertenece a la casa fabricante Tecumseh Europe y tiene las siguientes características:

Modelo:	TECUMSEH CAJ2432Z
Capacidad:	1500 Btu/hora
Refrigerante utilizado:	R-404A
Voltaje / frecuencia:	220V / 60Hz
Potencia del motor:	$\frac{3}{4}$ Hp
Desplazamiento:	18,3 cm ³



Figura 81. Unidad Condensadora TECUMSEH CAJ2432Z.

Fuente: autores

El compresor de esta unidad tiene una gran flexibilidad en cuanto a sus aplicaciones; pudiéndose utilizar en aplicaciones de baja (LBP), media (MBP) y alta temperatura (HBP).

Los parámetros de selección del refrigerante van íntimamente ligados a la aplicación del sistema de refrigeración y por ende a las características del compresor utilizado para tal fin. Debido a lo anterior, y a la imperante necesidad de proteger la capa de ozono, es indiscutible la utilización de un tipo de refrigerante HFC (Hidrofluorocarbonado), específicamente el R-404A, el cual presenta varias ventajas sobre los otros refrigerantes.



Figura 82. Compresor Hermético TECUMSEH.

Fuente: autores

5.2.8.2. Evaporador.

El evaporador es el encargado de retirar el calor necesario del producto para llevar a cabo el proceso de liofilización.

El evaporador del liofilizador piloto está constituido por dos evaporadores JORVAN de aluminio montados en paralelo, cada uno de dos hileras de 8 tubos en fondo de 19,5 in de largo y 3/8" de diámetro, su capacidad es de 1500 btu/hora, tiene 76 aletas en una disposición de 4 aletas/in.

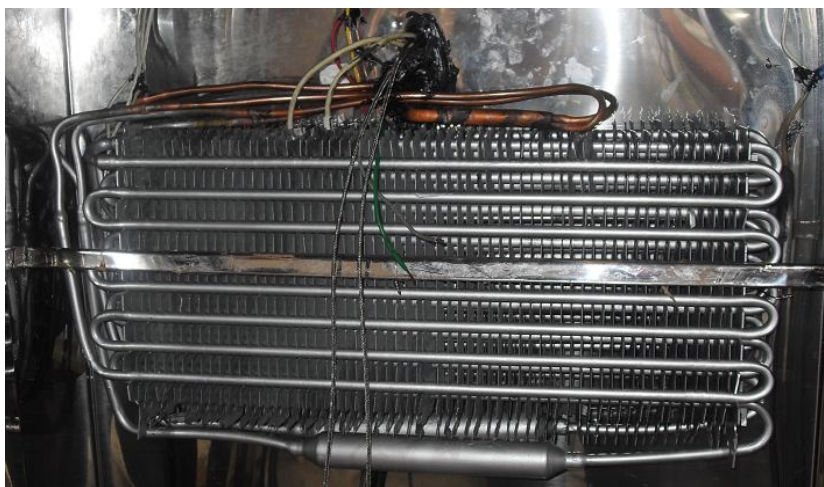


Figura 83. Evaporador JORVAN montado en la cámara de trabajo.

Fuente: autores

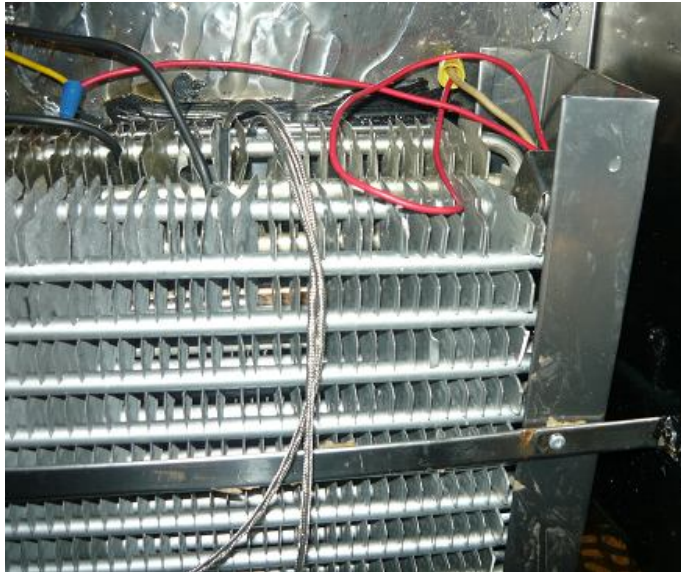


Figura 84. Disposición de los dos evaporadores en paralelo.

Fuente: autores

5.2.8.3. Ventilador.

Para aumentar la tasa de transferencia de calor en el interior de la cámara, y la homogeneidad de temperatura en ella, instalamos un pequeño ventilador en la parte superior del evaporador, el cual tiene las siguientes características:

Velocidad: 2600 rpm
Corriente: 0,58 A
Frecuencia: 60 hz
Voltaje: 110 V
Potencia 63,8 watts

El ventilador hace circular el aire por encima de la lámina que tapa al evaporador para separarlo de la cámara de trabajo la cual en la parte inferior está troquelada para permitir la subida del aire nuevamente al evaporador.



Figura 85. Ventilador del evaporador.

Fuente: autores

5.2.8.4. Dispositivo de expansión.

Todo sistema de refrigeración necesita de un elemento de control de flujo de refrigerante que puede ser una válvula de expansión o un tubo capilar.

El tubo capilar además de unir el condensador con el evaporador, permite la caída de presión del fluido frigorígeno causada por el drástico cambio de sección en él, lo cual, permite la alimentación del evaporador con refrigerante expandido, sin embargo, no logra un ajuste automático de fluido hacia el evaporador en función de la carga del mismo, como si lo pueden hacer otros dispositivos tal como la válvula de expansión.

Sin embargo en circuitos dotados de tubo capilar, las presiones en los lados de succión y descarga se igualan durante la parada del compresor, lo que facilita posteriormente su puesta en marcha y permite la utilización de un motor de bajo par de arranque.

En el diseño del liofilizador piloto no se alcanzaría la temperatura requerida utilizando válvula de expansión, por esta razón se calculó un tubo capilar de 2,67 m de longitud.



Figura 86. Tubo Capilar.

Fuente: autores

5.2.8.5. Control de presión de succión.

Para controlar la presión a la entrada del compresor se dispone de un control de presión de baja, el cuál en caso de una baja de presión en la succión envía una señal al controlador EKC 201 y se interrumpe el funcionamiento del compresor.



Figura 87. Control de presión de succión Danfoss.

Fuente: autores

5.2.8.6. Acumulador de líquido de succión.

El acumulador de succión o botella de aspiración tiene por objeto, evitar la aspiración accidental de fluido frigorígeno no evaporado en el compresor, ya que los compresores son extremadamente susceptibles a daños por refrigerante en estado líquido. Un excesivo retorno de líquido al compresor puede no sólo provocar una dilución del aceite (pérdida de lubricación), sino que la pérdida completa de la carga de aceite. Además el líquido en el compresor provoca deterioro debido al golpeteo de los pistones al tratar de comprimir el refrigerante líquido (golpe de líquido) y un gasto prematuro de los cojinetes.



Figura 88. Acumulador de líquido de succión.

Fuente: autores

5.2.8. Sistema de descongelamiento.

En el liofilizador piloto el descongelamiento se realiza al final del proceso de liofilización, para esto se activa la resistencia eléctrica ubicada cerca al serpentín evaporador, la cual eleva su temperatura hasta fundir el hielo formado en la superficie del mismo.

El agua que va cayendo del evaporador se recolecta en el recipiente para condensado de descongelamiento ubicado en la cámara de trabajo justo debajo del evaporador.



Figura 89. Recipiente de condensado de la cámara de trabajo.

Fuente: autores

De la cámara de trabajo sale una tubería que comunica el recipiente de condensado de la cámara con el recipiente de reevaporación ubicado en la parte inferior del equipo, a la salida de la cámara esta tubería tiene una válvula solenoide que se activa con el descongelamiento y permite el desagüe del condensado el cual se calienta con la energía suministrada por el gas caliente que sale del compresor y se evapora hacia el aire exterior.



Figura 90. Recipiente de reevaporación exterior.

Fuente: autores

6. HERRAMIENTAS PARA LA FABRICACION

Para la construcción del liofilizador piloto se elaboraron una serie de herramientas que permiten llevar a cabo cada uno de los procesos y tareas que son necesarias para la construcción y puesta en funcionamiento del sistema.

A continuación se presentan las herramientas para la construcción del liofilizador piloto.

6.1. Planos de construcción. (Anexo 3)

Para la comprensión de cada uno de los subsistemas del liofilizador piloto se presentan 5 planos que muestran las vistas de construcción con sus dimensiones de cada uno de los componentes que forman el y se muestra además el liofilizador piloto completo y armado con la indicación de sus partes principales.

En el plano número 1, se muestra el liofilizador piloto completo en vista isométrica y un corte, con todos sus componentes indicados y la tabla donde se da el nombre y características de los componentes que forman el sistema. En el plano número 2 se presentan las vistas principales del liofilizador completo con sus dimensiones generales y algunos detalles para dar claridad del montaje de algunas piezas. En los planos del 3 al 5 se muestran las vistas con dimensiones de cada uno de los componentes del sistema.

6.2. Procesos de manufactura. (Anexo 4)

Para la fabricación de cada una de las piezas del liofilizador piloto se presentan cartas de producción de cada una de las piezas que son manufacturadas; en estas cartas se indican las dimensiones en bruto de material que se debe comprar para la fabricación de la pieza y las dimensiones generales de la pieza ya terminada, además se enlistan cada uno de los procesos de fabricación que se tienen que hacer para llegar a la pieza acabada.

6.3. Manual de funcionamiento. (Anexo 5)

Para obtener claridad en el funcionamiento del sistema liofilizador piloto se presenta el Manual de Funcionamiento, en el que se describe paso a paso todas las funciones y se da una guía general de funcionamiento del equipo..

6.4. Manual de mantenimiento general. (Anexo 6)

Para el mantenimiento general del equipo se entrega un pequeño instructivo en el que se dan algunas actividades de cuidado básico y de inspección de cada uno de los subsistemas del liofilizador piloto.

CONCLUSIONES

El proceso de investigación realizado en este trabajo de grado ha servido en principio para formar una base sobre el estudio del proceso de liofilización, el cuál no a incursionado con mucha fuerza en nuestro país y dadas todas sus ventajas como técnica de deshidratación y conservación de productos, es de gran aplicación en nuestro medio.

Del proceso de construcción se concluye que la pequeña diferencia existente entre la base teórica y la práctica lleva a cometer algunos errores en el diseño, construcción y selección de los componentes de un equipo, pero dan la experiencia requerida para proyectos futuros, sin embargo, es la teoría sobre la que se fundamenta el diseño de cualquier sistema.

En el desarrollo del proceso de construcción del equipo se encontraron un sin número de dificultades que obligaron a realizar cambios en algunos de los parámetros de diseño fijados al inicio del proyecto; lograr el correcto funcionamiento del sistema de vacío, ha sido una de las tareas más complicadas debido a la dificultad de llegar a la hermeticidad de la cámara de trabajo, sin embargo se realizaron ajustes y varios tipos de sellos para el funcionamiento más óptimo, el sistema de calentamiento debió ser modificado en varias ocasiones en busca de encontrar las resistencias que lograran realizar el calentamiento dentro de la cámara de forma lenta y uniforme para no quemar los productos de prueba.

Otro aspecto que queda como experiencia es que en el diseño estructural de un equipo se debe realizar un estudio muy detallado y cálculos muy exactos antes de empezar a realizar todos los procesos de manufactura para evitar al máximo las pérdidas de material y tiempo en la construcción de elementos.

El haber logrado la construcción de este equipo permite realizar pruebas del proceso de liofilización para una gran variedad de productos y adquirir datos importantes que se pueden convertir en la base de futuros proyectos consistentes en el estudio de la implementación de este novedoso proceso para aplicarlo a nivel industrial en nuestro medio.

RECOMENDACIONES.

Se recomienda para la etapa de pruebas del equipo, realizar pruebas con productos que presenten contenidos de humedad altos, tales como fresas o café; para poder visualizar los efectos del proceso, el producto debe congelarse previamente en un congelador convencional para hacer mas eficiente el proceso ya que mantener la baja temperatura y la presión de vacío durante tiempos prolongados resulta difícil debido a las pérdidas del sistema.

Antes del proceso de pruebas se recomienda inspeccionar muy bien el correcto funcionamiento de los controles y medidores que son los que permiten el monitoreo de los datos que sirven como referencia para el estudio de las pruebas.

Para la toma de pruebas se recomienda hacer observación del producto liofilizado y tomar muestras de factores como el encogimiento, deformación y pérdida de la textura natural, que pueden servir como comparativo entre la deshidratación por liofilización y la deshidratación convencional.

Se recomienda realizar inspecciones periódicas al equipo para asegurar su correcto funcionamiento antes de realizar las pruebas.

BIBLIOGRAFIA

- ✘ **FELLOWS, Peter.** Tecnología del procesado de los alimentos, Principios y Prácticas. Editorial ACRIBIA, S.A. Zaragoza España. 1994.
- ✘ **BARBOSA, Gustavo V.** Deshidratación de alimentos. Editorial ACRIBIA, S.A. Zaragoza España. 2000.
- ✘ **POTTER, Norman N.** La Ciencia de los Alimentos. The AVI Publishing Company, Inc. Westport Connecticut. Second Printing. 1970.
- ✘ **PITA, Edgard G.** Principios y sistemas de refrigeración, Editorial LIMUSA S.A. Balderas, México, D.F. 1998
- ✘ **DOSSAT J, Roy.** Principios de Refrigeración, Compañía editorial Continental, S.A. México, 1998
- ✘ **CENGEL, Yunus A.** Transferencia de Calor, Mc Graw Hill, segunda edición.
- ✘ **HAWTHORN, Jhon.** Recent Advances in Food Science, Vol II. Ed. Butter Worths. Londres. 1981.
- ✘ **DESROSIER, W Norman.** Elementos de Tecnología de Alimentos. Editorial Continental S.A. CV, México. 1983
- ✘ **DANFOSS.** Manual Automatización de instalaciones de refrigeración comerciales. 2004

ANEXOS

**Anexo 1. CATALOGO TÉCNICO GAS REFRIGERANTE R-404A
SALVADOR ESCODA S.A.**

01 GAS REFRIGERANTE R-404A

- ✓ Refrigerante zeotrópico que contiene R-125, R-143a y R-134a (44/52/4 % en peso).
- ✓ El refrigerante debe ser cargado por fase líquida.
- ✓ Propiedades físicas y termodinámicas comparables al R502.
- ✓ No inflamable.
- ✓ Los compresores deben ser cargados con aceites poliolester.

R-404A
El sustituto
del R502
sin más...

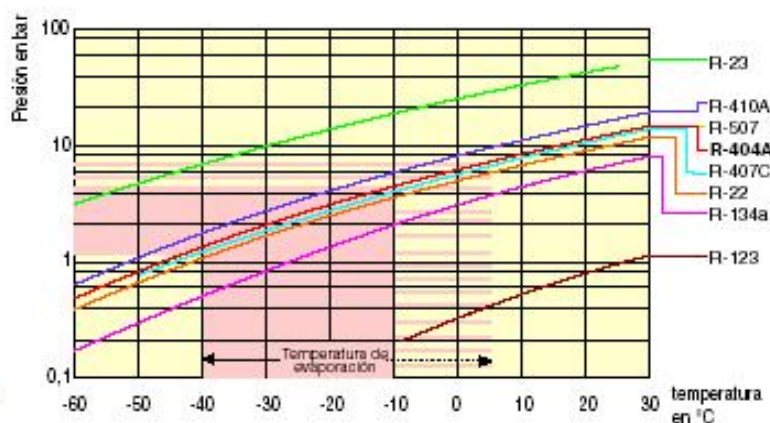
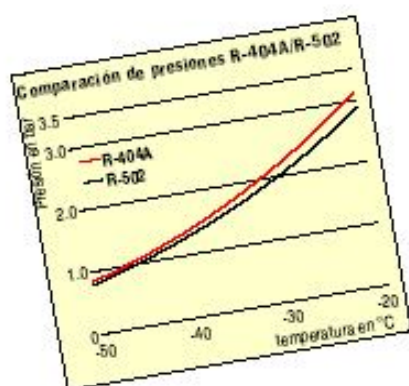
Aplicaciones:

- Almacenamiento de productos refrigerados.
- Máquinas de hielo.
- Sustitución del R502 en el transporte refrigerado.
- Expositores de supermercado.
- Retrofit de instalaciones de R502.

Especificaciones técnicas		R-404A
Descripción química		Pentafluoroetano/ 1,1,1-Trifluoroetano/ 1,1,1-Tetrafluoroetano
Fórmula química		$\text{CHF}_2\text{-CF}_3/\text{CH}_2\text{-CF}_3/CF_2\text{-CH}_2\text{F}$
Peso molecular	Kg/kmol	97,60
Punto de ebullición a 1.013 bar	°C	-46,4/45,7
Punto burbuja/Punto rocío		
Temperatura crítica	°C	72,07
Presión crítica	bar	37,32
Densidad crítica	Kg/m ³	485
Volumen crítico	m ³ /Kg	2,06 x 10 ⁻³
Densidad del líquido a 25°C	Kg/m ³	1.045
Densidad del vapor saturado a 25°C	Kg/m ³	64,033
Calor de vaporización a 25°C	kJ/kg	143,68
Calor específico a 25°C (líquido)	kJ/kgK	1,64
Calor específico a 25°C y 1.013 bar (vapor)	kJ/kgK	1,03



Rango de aplicaciones:



Propiedades termodinámicas del R-404A:

t	n'	n''	v'	v''	rho'	rho''	h'	h''	r	s'	s''
°C	bar	bar	dm ³ /kg	dm ³ /kg	kg/dm ³	kg/dm ³	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kgK	kJ/kgK	
-60	0.504	0.482	0.745	369.44	1.342	2.707	114.52	333.07	218.55	0.6456	1.6710
-59	0.532	0.509	0.746	350.75	1.340	2.851	115.87	333.72	217.85	0.6521	1.6694
-58	0.562	0.538	0.748	333.18	1.337	3.001	117.92	334.38	217.15	0.6585	1.6678
-57	0.593	0.568	0.750	316.67	1.334	3.158	118.58	335.03	216.45	0.6649	1.6663
-56	0.625	0.600	0.751	301.14	1.331	3.321	119.93	335.68	215.75	0.6713	1.6649
-55	0.659	0.633	0.753	286.51	1.329	3.490	121.29	336.34	215.05	0.6777	1.6634
-54	0.694	0.667	0.754	272.74	1.326	3.667	122.65	336.99	214.34	0.6840	1.6621
-53	0.731	0.703	0.756	259.75	1.323	3.850	124.01	337.65	213.64	0.6903	1.6607
-52	0.769	0.740	0.757	247.51	1.320	4.040	125.37	338.30	212.93	0.6966	1.6594
-51	0.809	0.779	0.759	235.96	1.317	4.238	126.74	338.96	212.22	0.7028	1.6581
-50	0.851	0.819	0.761	225.06	1.315	4.443	128.11	339.61	211.51	0.7090	1.6569
-49	0.894	0.861	0.762	214.78	1.312	4.656	129.48	340.26	210.79	0.7153	1.6556
-48	0.938	0.905	0.764	205.02	1.309	4.877	130.85	340.92	210.07	0.7214	1.6545
-47	0.985	0.950	0.766	195.82	1.306	5.107	132.22	341.57	209.35	0.7276	1.6533
-46	1.033	0.998	0.767	187.11	1.303	5.344	133.60	342.22	208.63	0.7338	1.6522
-45	1.084	1.047	0.769	178.87	1.300	5.591	134.97	342.87	207.90	0.7399	1.6511
-44	1.136	1.098	0.771	171.06	1.297	5.846	136.36	343.53	207.17	0.7460	1.6501
-43	1.190	1.151	0.773	163.67	1.294	6.110	137.74	344.18	206.44	0.7521	1.6490
-42	1.246	1.206	0.774	156.66	1.291	6.383	139.12	344.83	205.70	0.7581	1.6480
-41	1.304	1.263	0.776	150.01	1.288	6.666	140.51	345.47	204.96	0.7642	1.6471
-40	1.364	1.322	0.778	143.69	1.285	6.959	141.90	346.12	204.22	0.7702	1.6461
-39	1.427	1.383	0.780	137.70	1.282	7.262	143.30	346.77	203.47	0.7762	1.6452
-38	1.491	1.446	0.782	132.01	1.279	7.575	144.69	347.42	202.72	0.7822	1.6443
-37	1.558	1.512	0.784	126.61	1.276	7.898	146.09	348.06	201.97	0.7882	1.6435
-36	1.627	1.580	0.785	121.47	1.273	8.233	147.50	348.70	201.21	0.7942	1.6426
-35	1.699	1.650	0.787	116.58	1.270	8.578	148.90	349.35	200.45	0.8002	1.6418
-34	1.773	1.723	0.789	111.93	1.267	8.934	150.31	349.99	199.69	0.8061	1.6411
-33	1.849	1.798	0.791	107.50	1.264	9.303	151.72	350.63	198.91	0.8120	1.6403
-32	1.928	1.875	0.793	103.28	1.261	9.682	153.14	351.27	198.14	0.8179	1.6396
-31	2.009	1.955	0.795	99.26	1.258	10.074	154.55	351.91	197.36	0.8238	1.6389
-30	2.093	2.038	0.797	95.43	1.255	10.479	155.95	352.56	196.57	0.8297	1.6382
-29	2.180	2.124	0.799	91.78	1.251	10.896	157.41	353.20	195.79	0.8356	1.6375
-28	2.270	2.212	0.801	88.29	1.248	11.326	158.84	353.83	194.99	0.8415	1.6369
-27	2.362	2.303	0.803	84.97	1.245	11.769	160.26	354.46	194.20	0.8473	1.6362
-26	2.457	2.397	0.805	81.79	1.242	12.226	161.70	355.09	193.39	0.8531	1.6356
-25	2.555	2.493	0.807	78.76	1.239	12.696	163.13	355.72	192.59	0.8589	1.6350
-24	2.656	2.593	0.809	75.87	1.235	13.181	164.57	356.34	191.77	0.8647	1.6344
-23	2.760	2.696	0.812	73.10	1.232	13.681	166.01	356.97	190.96	0.8705	1.6339
-22	2.867	2.801	0.814	70.45	1.229	14.195	167.45	357.59	190.13	0.8763	1.6333
-21	2.978	2.910	0.816	67.92	1.225	14.724	168.90	358.21	189.31	0.8820	1.6328
-20	3.091	3.022	0.818	65.49	1.222	15.269	170.35	358.82	188.47	0.8877	1.6323
-19	3.208	3.138	0.820	63.17	1.219	15.830	171.80	359.44	187.64	0.8935	1.6318
-18	3.328	3.256	0.823	60.95	1.215	16.407	173.26	360.05	186.79	0.8992	1.6313
-17	3.452	3.378	0.825	58.82	1.212	17.001	174.72	360.66	185.94	0.9049	1.6308
-16	3.578	3.504	0.827	56.78	1.209	17.612	176.18	361.27	185.09	0.9106	1.6304
-15	3.709	3.633	0.830	54.83	1.205	18.240	177.65	361.88	184.23	0.9163	1.6299
-14	3.843	3.765	0.832	52.95	1.202	18.886	179.12	362.48	183.36	0.9219	1.6295
-13	3.980	3.901	0.834	51.15	1.198	19.550	180.59	363.08	182.49	0.9276	1.6291
-12	4.122	4.041	0.837	49.42	1.195	20.233	182.06	363.67	181.61	0.9332	1.6286
-11	4.267	4.185	0.839	47.77	1.191	20.935	183.54	364.27	180.73	0.9388	1.6283
-10	4.416	4.332	0.842	46.18	1.188	21.656	185.02	364.86	179.84	0.9445	1.6279
-9	4.568	4.483	0.844	44.65	1.184	22.398	186.50	365.45	178.94	0.9501	1.6275
-8	4.725	4.639	0.847	43.18	1.181	23.159	187.99	366.03	178.04	0.9557	1.6271
-7	4.885	4.798	0.850	41.77	1.177	23.942	189.48	366.61	177.13	0.9612	1.6268
-6	5.050	4.961	0.852	40.41	1.173	24.746	190.97	367.19	176.21	0.9668	1.6264
-5	5.219	5.128	0.855	39.10	1.170	25.573	192.47	367.76	175.29	0.9724	1.6261
-4	5.392	5.300	0.858	37.85	1.166	26.421	193.97	368.33	174.36	0.9779	1.6257
-3	5.569	5.476	0.860	36.64	1.162	27.293	195.47	368.90	173.43	0.9835	1.6254
-2	5.751	5.656	0.863	35.48	1.159	28.188	196.98	369.46	172.48	0.9890	1.6251
-1	5.937	5.840	0.866	34.36	1.155	29.108	198.49	370.02	171.53	0.9945	1.6248

t	n'	n''	v'	v''	rho'	rho''	h'	h''	r	s'	s''
°C	bar	bar	dm ³ /kg	dm ³ /kg	kg/dm ³	kg/dm ³	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kgK	kJ/kgK	
0	6.127	6.029	0.869	33.28	1.151	30.052	200.00	370.58	170.58	1.0000	1.6245
1	6.322	6.223	0.872	32.24	1.147	31.022	201.52	371.13	169.61	1.0055	1.6242
2	6.522	6.421	0.875	31.23	1.144	32.017	203.03	371.67	168.64	1.0110	1.6239
3	6.726	6.623	0.877	30.27	1.140	33.040	204.58	372.21	167.66	1.0165	1.6236
4	6.935	6.831	0.880	29.33	1.136	34.089	206.08	372.75	166.67	1.0219	1.6233
5	7.149	7.043	0.884	28.44	1.132	35.167	207.61	373.28	165.67	1.0274	1.6230
6	7.367	7.260	0.887	27.57	1.128	36.274	209.14	373.81	164.67	1.0328	1.6227
7	7.591	7.483	0.890	26.73	1.124	37.411	210.68	374.33	163.65	1.0382	1.6224
8	7.820	7.710	0.893	25.92	1.120	38.577	212.22	374.85	162.63	1.0437	1.6221
9	8.053	7.942	0.896	25.14	1.116	39.774	213.78	375.36	161.60	1.0491	1.6218
10	8.292	8.179	0.900	24.39	1.112	41.008	215.31	375.87	160.58	1.0545	1.6216
11	8.536	8.422	0.903	23.66	1.108	42.289	216.86	376.37	159.51	1.0599	1.6213
12	8.785	8.670	0.906	22.95	1.103	43.616	218.41	376.87	158.45	1.0653	1.6210
13	9.040	8.923	0.910	22.27	1.099	44.989	219.97	377.37	157.39	1.0707	1.6207
14	9.300	9.182	0.913	21.61	1.095	46.407	221.53	377.84	156.31	1.0761	1.6204
15	9.566	9.447	0.917	20.98	1.091	47.872	223.10	378.32	155.22	1.0814	1.6201
16	9.838	9.717	0.921	20.36	1.086	49.384	224.67	378.79	154.12	1.0868	1.6198
17	10.115	9.992	0.924	19.76	1.082	50.942	226.24	379.25	153.01	1.0921	1.6195
18	10.397	10.274	0.928	19.19	1.078	52.541	227.81	379.71	151.89	1.0975	1.6192
19	10.686	10.561	0.932	18.63	1.073	53.686	229.41	380.16	150.75	1.1028	1.6188
20	10.981	10.855	0.936	18.09	1.069	55.284	230.99	380.60	149.61	1.1082	1.6185
21	11.281	11.154	0.940	17.56	1.064	56.945	232.59	381.03	148.45	1.1135	1.6182
22	11.588	11.460	0.944	17.05	1.059	58.645	234.18	381.46	147.28	1.1188	1.6178
23	11.901	11.771	0.948	16.56	1.055	60.381	235.79	381.88	146.09	1.1242	1.6175
24	12.220	12.089	0.952	16.08	1.050	62.166	237.39	382.29	144.90	1.1295	1.6171
25	12.546	12.414	0.957	15.62	1.045	64.003	239.01	382.69	143.68	1.1348	1.6167
26	12.877	12.745	0.961	15.17	1.040	65.892	240.63	383.08	142.48	1.1401	1.6163
27	13.216	13.082	0.966	14.73	1.036	67.835	242.25	383.47	141.21	1.1455	1.6159
28	13.561	13.428	0.970	14.31	1.031	69.835	243.88	383.84	139.95	1.1509	1.6155
29	13.913	13.777	0.975	13.90	1.026	71.884	245.52	384.20	138.68	1.1561	1.6151
30	14.272	14.135	0.980								

**Anexo 2. FOLLETO TÉCNICO CONTROLADORES ELECTRONICOS
EKC 201 Y EKC 301, DANFOSS 2006.**

Danfoss



Controladores electrónicos EKC 201 y EKC 301

REFRIGERATION AND
AIR CONDITIONING

Folleto técnico

Introducción



Los EKC 201 (para montaje en panel) y EKC 301 (para montaje en rai DIN) han sido especialmente desarrollados para tareas de control en instalaciones de refrigeración, para que las operaciones de ajuste y programación se optimicen y simplifiquen tanto como sea posible.

Todos los controladores están diseñados para control de temperatura ambiente por arranque/parada de compresor o solenoide y se han agrupado en cuatro aplicaciones principales dependiendo del tipo de desescarche y su control. Ver "Aplicaciones del controlador".

Los EKC 201 y 301 se utilizan para

- control de temperatura
- control del ventilador
- control de desescarche
- señales de alarma

Con solo dos pulsadores, se puede ajustar y programar todas las funciones.

El display muestra la temperatura ambiente actual, pero activando los pulsadores el display cambia a la temperatura ajustada o a la temperatura del sensor de desescarche.

Acoplando un módulo de comunicación, mediante un bus estándar (Echelon), permite el acceso a todos los parámetros del controlador.

La entrada digital puede ser programada para:

- recibir señales de alarma desde una fuente de alarma externa (alarma de puerta)
- arrancar el desescarche desde un reloj externo
- enviar señales de alarma al sistema de comunicación por bus

Características

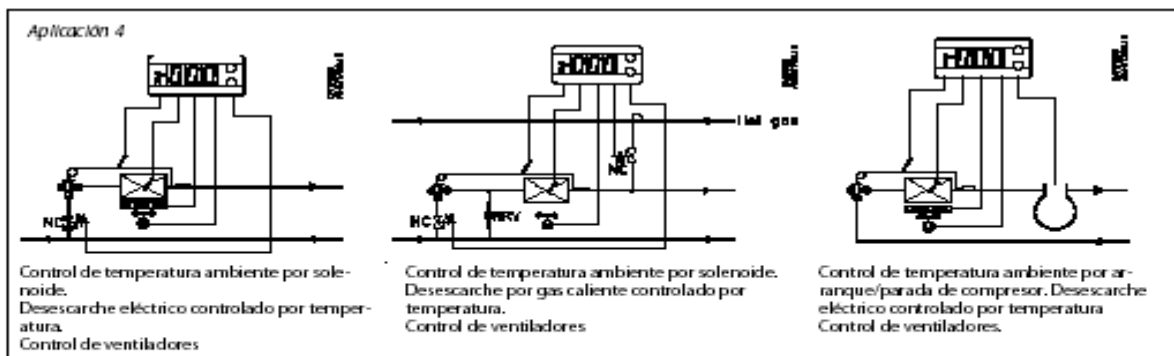
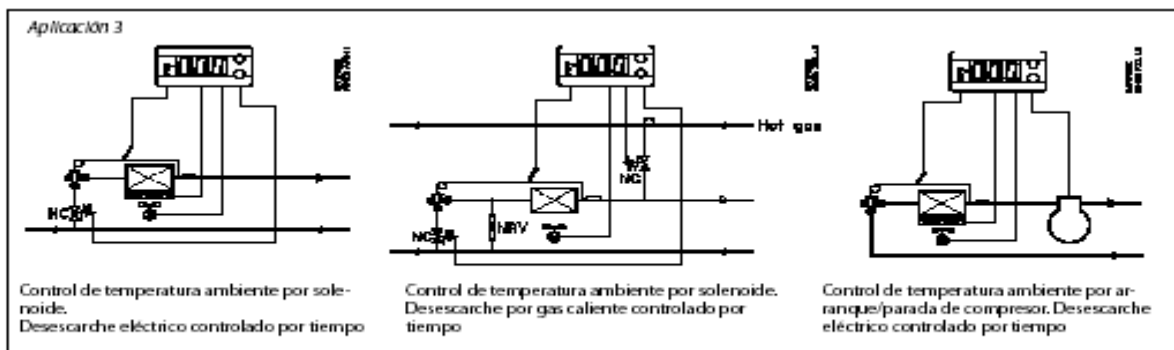
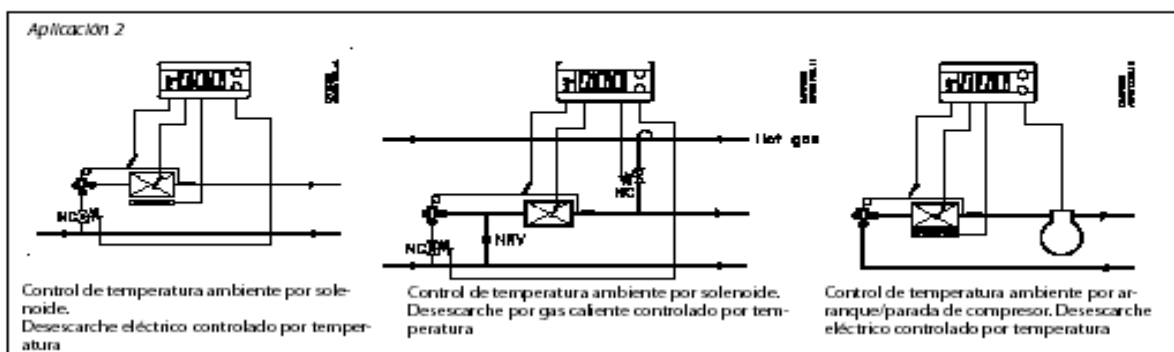
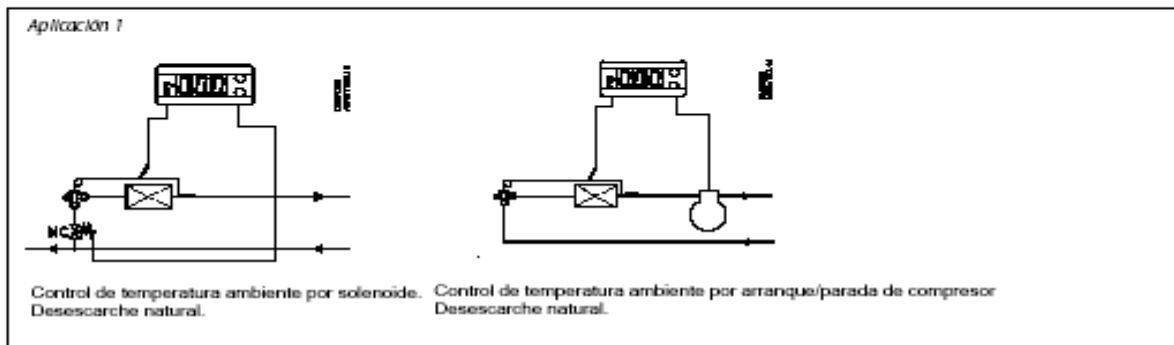
- Un controlador electrónico, puede sustituir varios controladores tradicionales y relojes de desescarche.
- Se suministra en versión para montaje en panel y en rai DIN.
- La lectura del display indica: temperaturas, condiciones de operación, códigos de parámetros así como códigos de alarma y error.
- Tres señales luminosas (LED's) indican el estado actual del sistema:
 - refrigeración
 - desescarche
 - ventilador en funcionamiento
- Rearme sencillo a ajuste de fábrica
- En caso de una función de error, puede leerse el código de dicho parámetro
- Las alarmas se indican con un parpadeo simultáneo de las tres señales luminosas.
- Los sensores Danfoss Pt 1000:
 - no se precisa una calibración del sistema de sensores
 - el sistema de controlador/sensor puede utilizarse directamente para registro de datos
- Posibilidades de comunicación por bus con sistemas SCADA
- Puede acoplarse un reloj de tiempo real (funcionamiento por pilas)

Aplicaciones del controlador

Función	Aplicación			
	1	2	3	4
Control de temperatura ambiente por arranque/parada de compresor o solenoide				
Desescarche natural				
Desescarche eléctrico o por gas caliente controlado por temperatura				
Desescarche eléctrico o por gas caliente controlado por tiempo				
Control del ventilador				

¡aj. El controlador para la aplicación no. 3 satisface los requisitos para:

- 1) Control de temperatura ambiente (termostato de ambiente) por arranque/parada de compresor o por solenoide.
- 2) Desescarche eléctrico o por gas caliente controlado por tiempo
- 3) Control del ventilador.



Características técnicas
Alimentación de tensión

Versión en panel : 12 V c.a./c.c. +15/-15%
230 V +10/-15%, 50/60 Hz
(en algunas aplicaciones)
Versión en rail DIN: 230 V +10/-15%, 50/60 Hz

Consumo de potencia

Versión en panel: 2.5 VA
Versión en rail DIN: 5.0 VA

Transformador

Los controladores de 12 V tienen que conectarse a un transformador separado de 3 VA mínimo

Sensores

Tipo: Pt 1000
PTC ($R_{25} = 1000 \text{ ohm}$)

Sistema de controlador/sensor

Rango de medida: -60 → +50°C
Precisión: ± 0.5°C para temperaturas de sensor de -35 → +25°C
± 1°C para temperaturas de sensor de -60 → -35°C y +25 → +50°C

Display

Pantalla de lectura de 3 dígitos.
Precisión de medida: 0,1 °C

Contacto de alarma externo

Contacto SPST estándar (alarma de puertas)

Cableado de conexión

Versión panel:
Cable de varios hilos de 1,5 mm²
Versión rail DIN:
Cable de varios hilos de 2,5 mm²

Relés
Relé del controlador

SPST NO Imáx = 6 A Ohmico/3 A CA 15° Inductivo

Relé de desescarche

SPST NO Imáx = 6 A Ohmico/3 A CA 15° Inductivo

Relé de motor del ventilador

SPST NO Imáx = 6 A Ohmico/3 A CA 15° Inductivo

Relé de alarma

SPST NC $I_{max} = 4 \text{ A Ohmico/1 A CA 15° Inductivo}$

$I_{max} = 1 \text{ mA en 100 mV}^{**}$

* Carga CA 15 según EN 60947-5-1

** Un contacto dorado asegura el contacto a bajas cargas

Ambiente

Funcionamiento: 0 → +55°C
Transporte: -40 → +70°C
20-80 Rh, sin condensación
Sin influencia por vibraciones ni por impactos

Protección

Versión panel: P 54
Versión rail DIN: P 32

Homologaciones:

Cumple con directivas U.E. de baja tensión y estipulaciones EMC para marcado CE.
Pruebas LVD, según EN 60730-1 y EN 60730-2-9
Pruebas EMC, según EN 50081-1 y EN 50082-1

Códigos
EKC 201, Controladores para montaje en panel

Aplicación	Código							
	Controlador + Pt 1000 ohm sensor(es) tipo AKS 12 con 1,5 m cable				Controlador + PTC sensor(es) tipo EKS 111 con 1,5 m cable			
	12 V a.c./d.c.		230 V a.c.		12 V a.c. / d.c.		230 V a.c.	
	Sin relé de alarma	Con relé de alarma	Sin relé de alarma	Con relé de alarma	Sin relé de alarma	Con relé de alarma	Sin relé de alarma	Con relé de alarma
1	084B7025	084B7028	084B7031	084B7032	084B7605	084B7608	084B7611	084B7612
2	084B7026	084B7030			084B7606	084B7610		
3	084B7027	084B7030			084B7607	084B7610		
4	084B7027	084B7030			084B7607	084B7610		

EKC 301, Controladores para montaje en rail DIN

Aplicación.	Código	
	Controlador	
	230 V a.c.	
	Sin relé de alarma	Con relé de alarma
1	084B7513	084B7516
2	084B7514	084B7517
3	084B7515	084B7518
4	084B7515	084B7518

Accesorios
Módulos acoplables

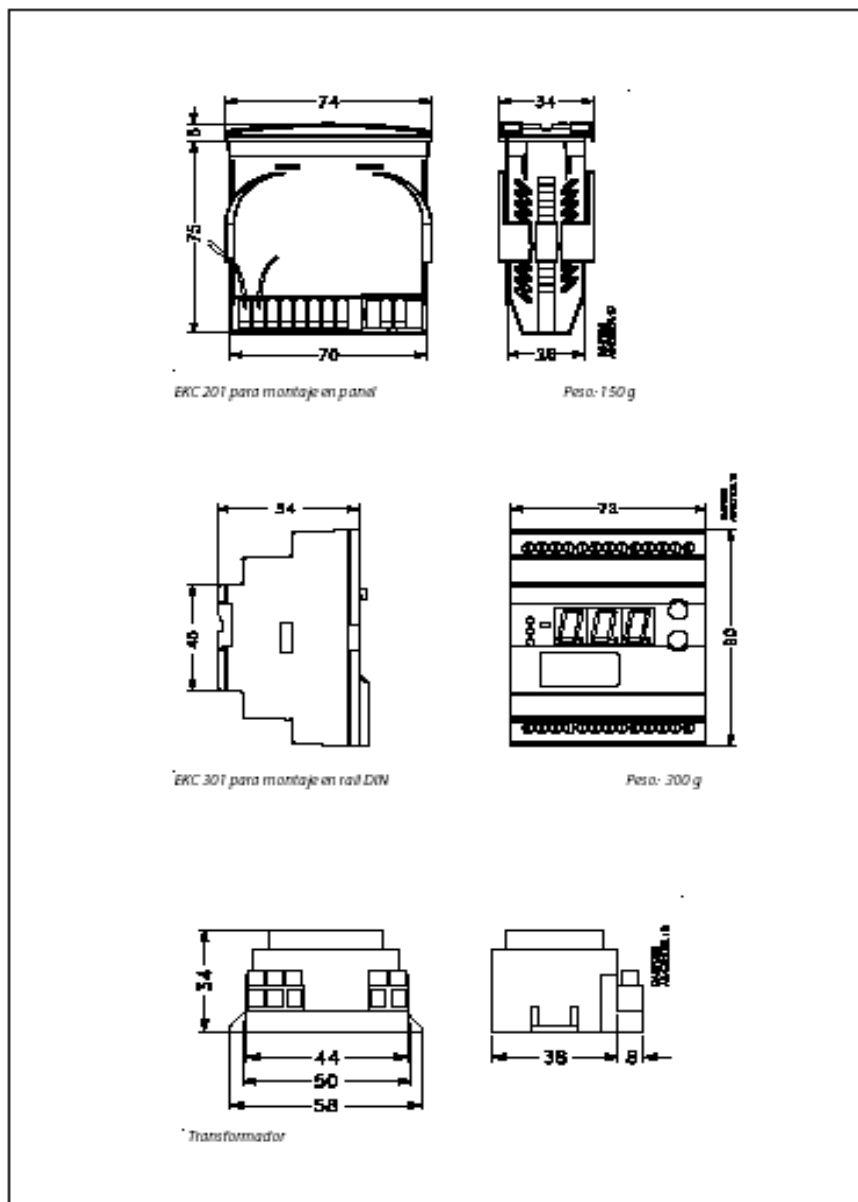
Descripción	Tipo	Código		
		EKC 201		EKC 301
		12 V	230 V	
Reloj de tiempo real	EKA 172	084B7070	084B7070	084B7069
Tarjeta de comunicación por bus FTI *	EKA 173	084B7125		084B7092
Tarjeta de comunicación por bus RS 485 *	EKA 175	084B7126	084B7126	084B7093

*Ver: Installation Guide for Data communication, RC.BA.C

Transformador, 230/12 V

Código 084B7090 (uno por controlador)

Dimensiones y pesos



Parámetros de ajuste y lectura	Código	Aplicación regulación				Valor mín.	Valor max.	Ajuste fábrica ⁵⁾	Ajuste actual
		1	2	3	4				
Operación normal									
Temperatura del regulador, temperatura de referencia de corte						-60°C	50°C	3°C	
Termostato									
Ajuste del diferencial de temperatura ¹⁾	r01					0,1 K	20 K	2 K	
Bloqueo superior de la referencia	r02					-59°C	50°C	50°C	
Bloqueo inferior de la referencia	r03					-60°C	49°C	-60°C	
Calibración de la sonda de temperatura	r04					-20 K	20 K	0,0 K	
Unidades de temperatura (°C/°F)	r05							°C	
Relé de alarma									
Alarma de alta temp. (superior al ajuste de temp.+diferencial ²⁾)	A01					0 K	50 K	10 K	
Alarma de baja temperatura (inferior al ajuste de temp.) ²⁾	A02					-50 K	0 K	-10 K	
Retardo alarma de temperatura	A03					0 min	90 min	30 min	
Retardo alarma de puerta	A04					0 min	90 min	60 min	
Compresor									
Tiempo de marcha mínimo del compresor	c01					0 min	15 min	0 min	
Tiempo de parada mínimo del compresor	c02					0 min	15 min	0 min	
Funcionamiento en % compresor en caso de fallo de la sonda de temp. ³⁾	c03					0%	100%	0%	
Para el compresor al abrir las puertas (yes/no)	c04							no	
Desescarche									
Desescarche eléctrico o por gas caliente (EL/GAS)	d01							EL	
Temperatura de fin de desescarche	d02					0°C	25°C	6°C	
Intervalo de tiempo entre arranques de desescarches	d03					OFF	48 timer	8 timer	
Máximo tiempo de desescarche	d04					0 min	180 min	45 min	
Desviación del tiempo de desescarche al inicio	d05					0 min	60 min	0 min	
Tiempo de vaciado del evaporador después del desescarche	d06					0 min	20 min	0 min	
Retardo del ventilador después del desescarche	d07					0 min	20 min	1 min	
Temp. de arranque del vent. (finaliza el retardo anterior sin agotar el tiempo)	d08					-15°C	0°C	-5°C	
Ventiladores en marcha (yes) o parados (no)	d09							no	
Utilización de sonda de desescarche	d10							yes	
Retardo de alarma de temperatura después del desescarche	d11					0 min	199 min	90 min	
Retardo en visualizar la temp. después de terminar el desescarche	d12					0 min	15 min	1 min	
Desescarche al recibir tensión	d13					no	yes	no	
Ventiladores									
Parada de ventiladores al parar compresor	F01							no	
Retardo de parada del ventilador	F02					0 min	30 min	0 min	
Para el ventilador al abrir las puertas (yes/no)	F03							yes	
Otros									
Retardo de la señal de salida después de un arranque	o01					0 s	600 s	5 s	
Señal digital de entrada ⁴⁾ (0=no usada, 1=puerta, 2=desescarche, 3=bus, 4=función principal)	o02							0	
Código de acceso	o05					OFF	100	OFF	
Sensor utilizado tipo (Pt / PTC)	o06							Pt/PTC	
Reloj de tiempo real (opcional)									
Seis tiempos de arranque para desescarche Programando OFF pueden cortarse todos	t01-t06					0	23	OFF	
Ajuste de horas	t07					0 timer	23 timer	0 timer	
Ajuste de minutos	t08					0 min	59 min	0 min	

Códigos de fallos en pantalla		Códigos de alarma en pantalla		Código de estado en pantalla	
E 1	Fallo en el regulador	A 1	Alarma de alta temperatura	S 2	Tiempo de funcionamiento
E 2	Sensor de cámara desconectado	A 2	Alarma de baja temperatura	S 3	Tiempo parado
E 3	Sensor de cámara cortocircuitado	A 4	Alarma de puerta	S 4	Vaciado del evaporador
E 4	Sensor de desescarche desconectado			S 10	Parada refrigeración
E 5	Sensor de desescarche cortocircuitado				
E 6	Cambio batería+ chequear reloj				

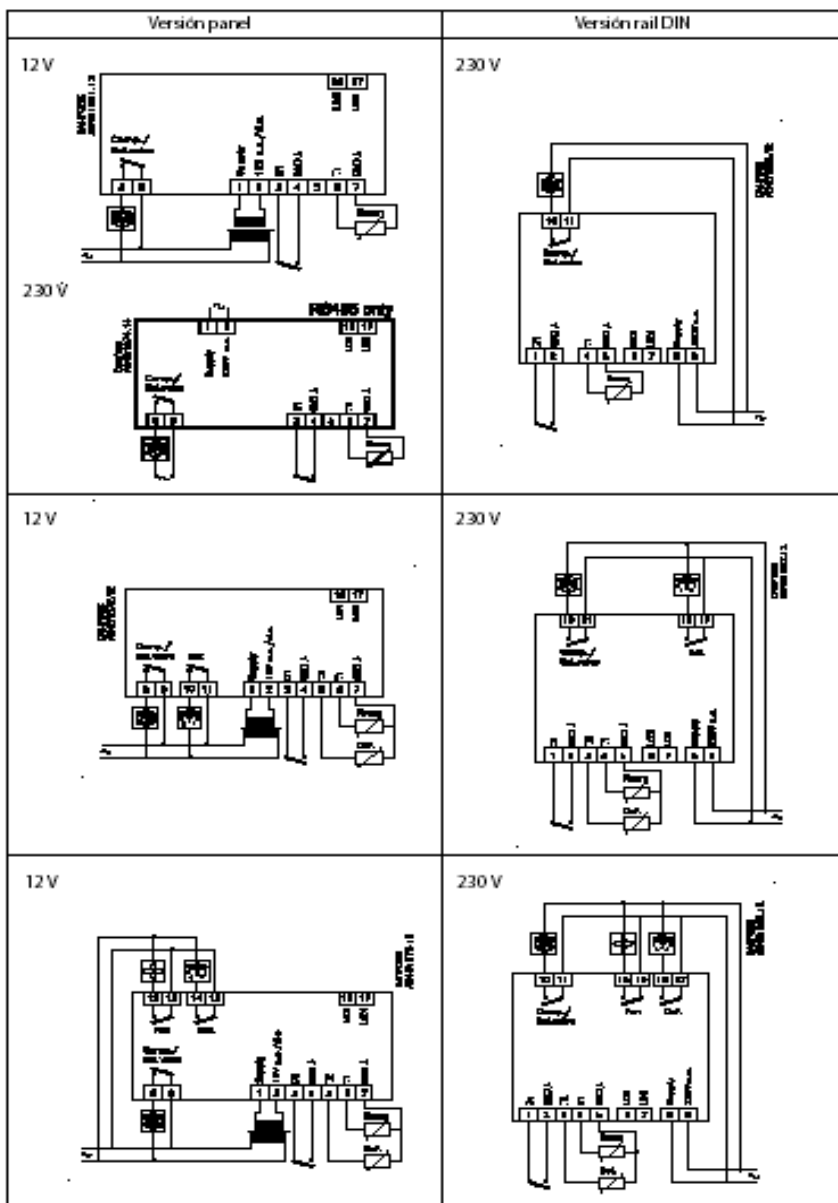
¹⁾ El relé del compresor cierra cuando la temperatura de la cámara es mayor que el valor de corte más el diferencial.
²⁾ Alarma de fallo del sensor, si hay una desviación de 5°C o más, fuera del rango de ajuste -60 → 50°C.
³⁾ El controlador utilizará este valor después del arranque y durante tres días y noches. Después de este tiempo, el controlador es capaz de calcular el valor promedio de los tiempos de marcha y parada.
⁴⁾ Las posibilidades con un contacto SPST conectado a los terminales 3 y 4 son las siguientes:
Alarma de puerta: Si SPST está abierto, comienza la señal de alarma y el ventilador se para, parámetros A04 ó F03.
Desescarche: Si SPST está cerrado, comienza el desescarche. (Además, si d03 no está en OFF, los desescarches también se realizarán según los intervalos de tiempo establecido)

Bus: Con una tarjeta de comunicación instalada, se registrará la posición de los contactos SPST por medio del BUS de comunicación.
Interrupción principal: arranque /parada, ajustar

⁵⁾ Los ajustes de fábrica son para las unidades estándar. Otros números de código tienen ajustes personalizados.

Conexión eléctrica

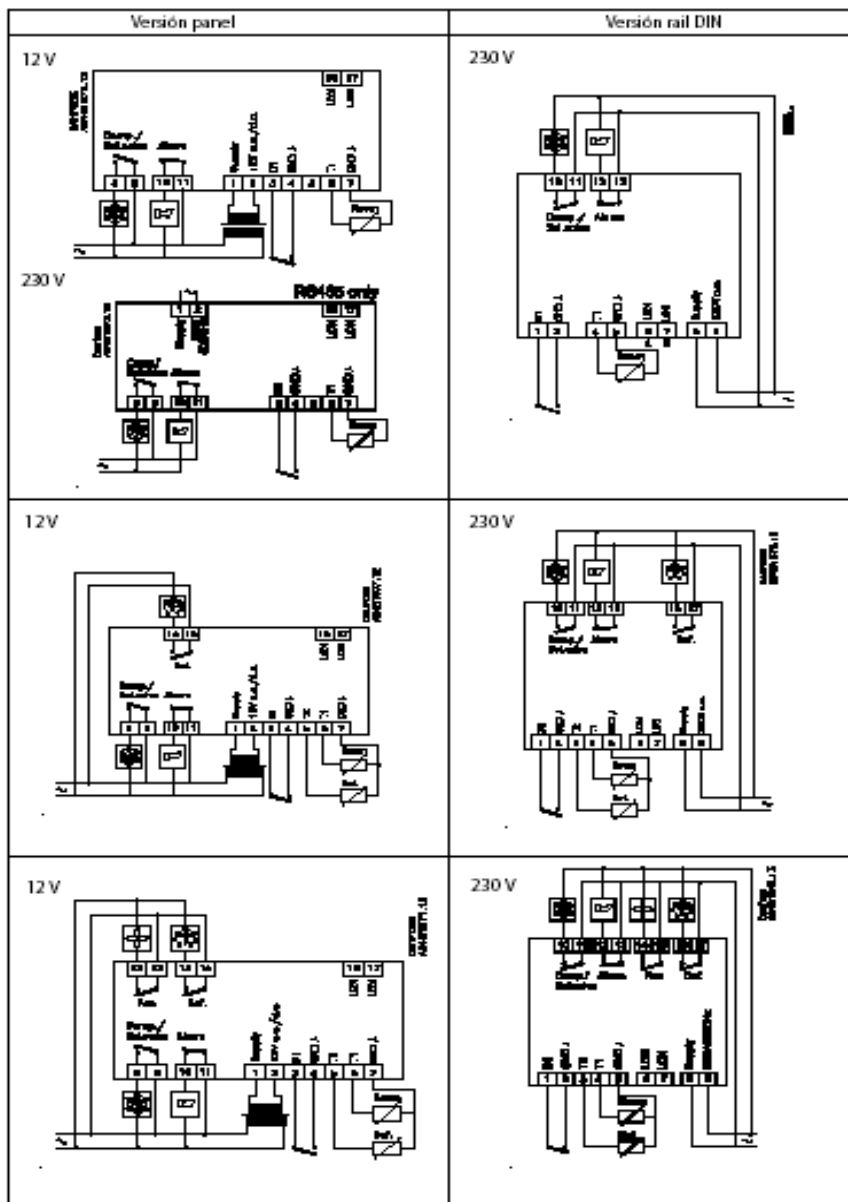
Aplicación 1
sin relé de alarma



Aplicación 2
sin relé de alarma

Aplicaciones 3 y 4
sin relé de alarma

Aplicación 1
con relé de alarma



Aplicación 2
con relé de alarma

Aplicaciones 3 y 4 con
relé de alarma

60 Hz:

Si la frecuencia es de 60Hz, existirán las siguientes limitaciones:

EKC 201, 12 V: - Longitud máxima de cable entre transformador y EKC es de 1m.

- Solo se debe conectar el EKC en el secundario del transformador.

- La longitud máxima del cable entre el EKC y los sensores es de 100 m

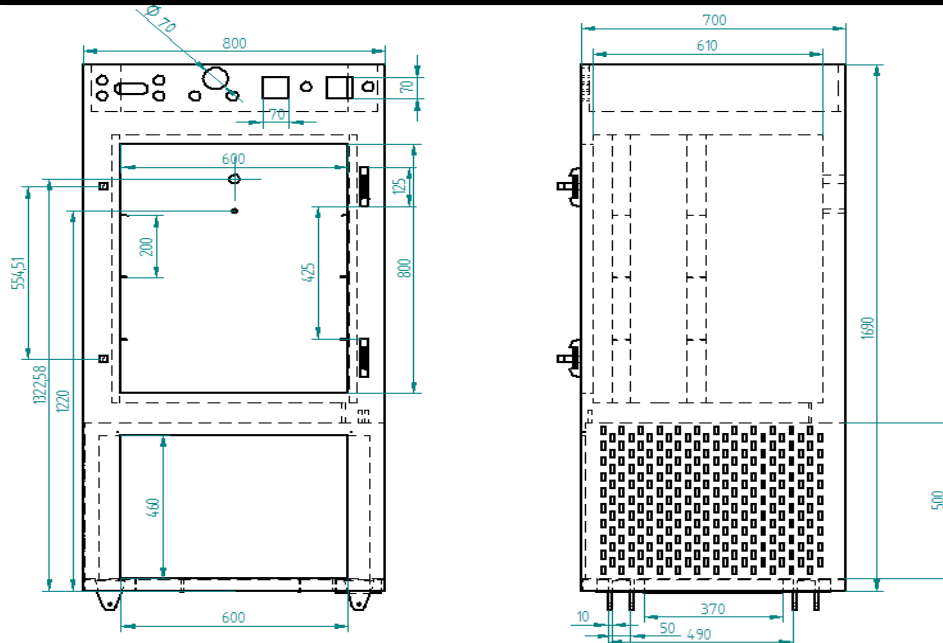
EKC 301: - La longitud máxima del cable entre el EKC y los sensores es de 100m

Anexo 3. PLANOS DE CONSTRUCCION

Anexo 4. CARTAS DE PRODUCCION.

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN LIOFILIZADOR PILOTO PARA EL ESTUDIO DE PROCESOS DE DESHIDRATACION Y CONSERVACION DE PRODUCTOS AGROINDUSTRIALES MEDIANTE SECADO AL VACIO

PIEZA Mueble o Estructura	No. 1	CANTIDAD POR UNIDAD		1
DIMENSIONES EXTERNAS	Altura	Ancho	Profundidad	Calibre
	1690 mm	800 mm	700 mm	
	CAMARA DE TRABAJO	650 mm	610mm	
CAMARA DE MAQUINAS	500 mm	720 mm	687 mm	22
MATERIAL BASE	Acero Inoxidable		REFERENCIA	430



NO.	OPERACIONES	MAQUINA
1	Corte de láminas de cada cara	Tijeras para metal
2	Troquelado de laminas	Troqueladora
3	Creación de perfiles	Dobladora
4	Aplicación del poliuretano y formación de la pared térmica.	Manual
5	Ensamble y unión de las aristas	Equipo de soldadura y remaches
6	Ensamble y unión de accesorios	Equipo de soldadura y tornillos

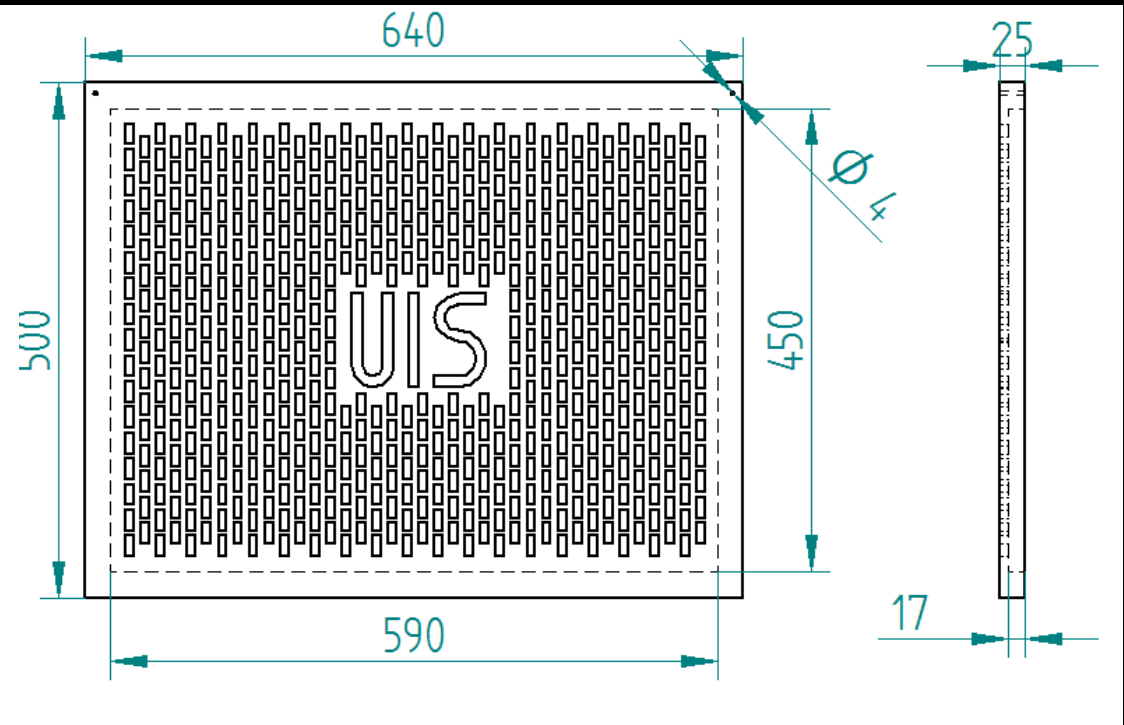
OBSERVACIONES: La soldadura utilizada es antimonio.

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN LIOFILIZADOR PILOTO PARA EL ESTUDIO DE PROCESOS DE DESHIDRATACION Y CONSERVACION DE PRODUCTOS AGROINDUSTRIALES MEDIANTE SECADO AL VACIO				
PIEZA Puerta	No. 2	CANTIDAD POR UNIDAD		1
DIMENSIONES CARA EXTERNA CARA INTERNA	Altura	Ancho	Profundidad	Calibre 22
	860 mm	660 mm	45 mm	
	860mm	660 mm	25mm	
	770 mm	570 mm	20 mm	
MATERIAL BASE	Acero Inoxidable	REFERENCIA	430	
NO.	OPERACIONES	MAQUINA		
1	Corte de láminas de cada cara	Tijeras para metal		
2	Creación de perfiles	Dobladora		
3	Aplicación del poliuretano y formación de la pared térmica.	Manual		
4	Ensamble y unión de las aristas	Equipo de soldadura y remaches		
5	Ensamble y unión de accesorios	Equipo de soldadura y tornillos		

OBSERVACIONES: La soldadura utilizada es antimonio.

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN LIOFILIZADOR PILOTO PARA EL ESTUDIO DE PROCESOS DE DESHIDRATACION Y CONSERVACION DE PRODUCTOS AGROINDUSTRIALES MEDIANTE SECADO AL VACIO

PIEZA Puerta de Máquinas	No. 3	CANTIDAD POR UNIDAD	1
DIMENSIONES	Altura 450 mm	Ancho 640 mm	Profundidad 25 mm Calibre 22
MATERIAL BASE	Acero Inoxidable	REFERENCIA	430



NO.	OPERACIONES	MAQUINA
1	Corte de lámina	Tijeras para metal
2	Troquelado	Troqueladora
3	Creación de perfiles	Dobladora y Equipo de soldadura

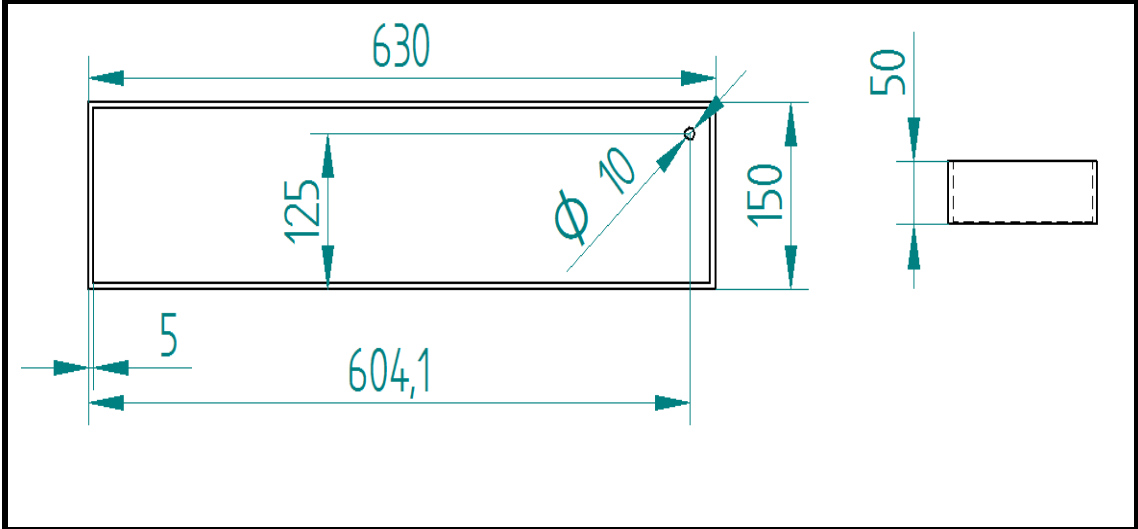
OBSERVACIONES: La soldadura utilizada es antimonio.

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN LIOFILIZADOR PILOTO PARA EL ESTUDIO DE PROCESOS DE DESHIDRATACION Y CONSERVACION DE PRODUCTOS AGROINDUSTRIALES MEDIANTE SECADO AL VACIO				
PIEZA	Bandejas	No. 4	CANTIDAD POR UNIDAD	3
DIMENSIONES		Altura 80 mm	Ancho 570 mm	Profundidad 380 mm Calibre 22
MATERIAL BASE	Acero Inoxidable	REFERENCIA	430	
NO.	OPERACIONES	MAQUINA		
1 2 3	Corte de lámina Moldeo Acabados	Tijeras para metal Prensa Pulidora		

OBSERVACIONES:

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN LIOFILIZADOR PILOTO PARA EL ESTUDIO DE PROCESOS DE DESHIDRATACION Y CONSERVACION DE PRODUCTOS AGROINDUSTRIALES MEDIANTE SECADO AL VACIO

PIEZA	Recolector de condensado de descongelamiento.	No. 5	CANTIDAD POR UNIDAD		1
DIMENSIONES		Altura 50 mm	Ancho 630 mm	Profundidad 150 mm	Calibre 22
MATERIAL BASE	Acero Inoxidable	REFERENCIA		430	



NO.	OPERACIONES	MAQUINA
1	Corte de lámina	Tijeras para metal
2	Unión de aristas	Equipo de soldadura
3	Acabados	Pulidora
4	Orificio de desagüe	Taladro broca 3/8"

OBSERVACIONES:

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN LIOFILIZADOR PILOTO PARA EL ESTUDIO DE PROCESOS DE DESHIDRATACION Y CONSERVACION DE PRODUCTOS AGROINDUSTRIALES MEDIANTE SECADO AL VACIO				
PIEZA Puerta de la cámara del evaporador	No. 6	CANTIDAD POR UNIDAD		1
DIMENSIONES	Altura 806,61 mm	Ancho 650 mm	Profundidad 2 mm	Calibre 22
MATERIAL BASE	Acero Inoxidable	REFERENCIA	430	
NO.	OPERACIONES	MAQUINA		
1	Corte de lámina	Tijeras para metal		
2	Troquelado	Troqueladora		
3	Doblez de las aristas	Dobladora y prensa		
OBSERVACIONES:				

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN LIOFILIZADOR PILOTO PARA EL ESTUDIO DE PROCESOS DE DESHIDRATAACION Y CONSERVACION DE PRODUCTOS AGROINDUSTRIALES MEDIANTE SECADO AL VACIO				
PIEZA Portabandejas	No. 7	CANTIDAD POR UNIDAD		3
DIMENSIONES	Altura 20 mm	Ancho 610 mm	Profundidad 420 mm	Calibre 22
MATERIAL BASE Acero Inoxidable	REFERENCIA 430			
NO.	OPERACIONES	MAQUINA		
1	Corte de lámina	Tijeras para metal		
2	Creación de cada separación individual	Dobladora		
3	Creación de orificios para las resistencias	Taladro broca 3/8"		
4	Ensamble y unión de cada separación	Remachadora y equipo de soldadura		
OBSERVACIONES: La soldadura utilizada es antimonio.				

Anexo 5. MANUAL DE FUNCIONAMIENTO

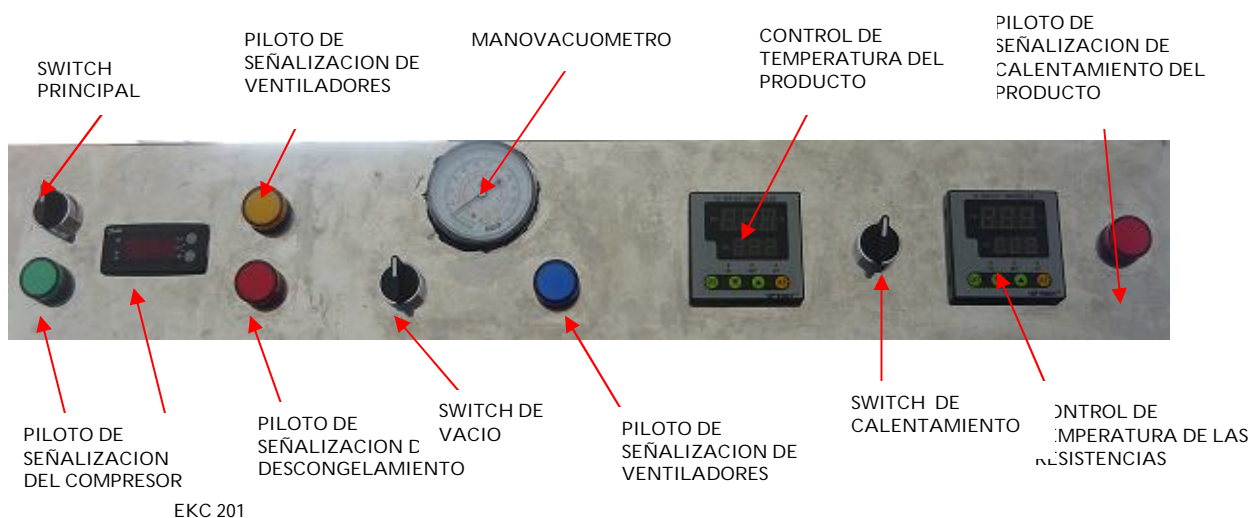
MANUAL DE FUNCIONAMIENTO

El liofilizador piloto construido en este proyecto, trabaja con una tensión de 220V, después de conectado a la fuente de energía, se introduce el producto a liofilizar en las bandejas y se coloca la termocupla del producto (plateada) en la segunda bandeja atravesando el producto para mantener el control del mismo.

Dejando lista la termocupla en el producto proceda a cerrar la cámara de trabajo asegurándose de que las dos manijas de seguridad queden bien ajustadas.

Proceda a encender la maquina por el switch principal del panel de control ubicado en la parte superior izquierda, encima del piloto de señalización verde (ver imagen).

Seguido este paso automáticamente se encienden el controlador ekc201 y el control de temperatura del producto (ver imagen), en donde se debe permanecer haciendo un monitoreo visual de ambas temperaturas, aproximadamente de 4 a 6 horas.



Habiendo llegado a la temperatura del producto de $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ se procede a encender la bomba de vacío por medio de switch de vacío ubicado en la parte central del panel de control, debajo de manovacuometro y al lado del piloto de señalización azul (ver imagen).

Seguido a esto se debe monitorear visualmente el vacío indicado por el manovacuometro, hasta lograr una presión de vacío entre 0 y 0,1 psi, donde se debe apagar manualmente el compresor, y se deben encender las resistencias de calentamiento del producto por medio del switch de resistencias ubicado en la parte superior derecha al lado del controlador de temperatura de las resistencias TOKY y el piloto de señalización rojo (ver imagen), asegurándose que la temperatura de la resistencias no sobrepase los 60 °C.

Después de un tiempo moderado y cuando la temperatura del producto llegue a la temperatura ambiente, se apaga el vacío y las resistencias y se abre la cámara para retirar el producto.

Anexo 6. MANUAL DE MANTENIMIENTO GENERAL

INSTRUCTIVO DE MANTENIMIENTO GENERAL

Es importante para cualquier equipo mecánico desarrollar actividades que prolonguen la vida operativa de sus componentes y a su vez la de todo el sistema. Teniendo en cuenta la necesidad de un programa de mantenimiento se plantean a continuación una serie de actividades de cuidado básico de los elementos que forman parte de la unidad refrigeradora con el fin de detectar pequeños daños o averías que puedan convertirse en problemas más serios.

ACTIVIDADES DE CUIDADO BÁSICO

Para el cumplimiento de las actividades de cuidado básico, recomendamos tener en cuenta lo siguiente:

- ✘ Contar con la base teórica en principios de refrigeración.
- ✘ Dominar el uso de instrumentos tales como el amperímetro, voltímetro, manómetros, probadores de fuga, termómetros y otros similares.
- ✘ Conocer los procedimientos de prueba de continuidad en contactores.
- ✘ Conocer el modo de operación del controlador Danfoss EKC 201

Circuito de refrigeración

- ✘ Verificación del sistema y su carga refrigerante.

Instale un manómetro en la tubería de succión del compresor y verifique si registra algún valor de presión, de no ser así, seguramente el sistema se encuentra sin refrigerante. Si el banco se desenergiza por un largo tiempo las presiones de alta y baja corresponderán presión del R404A a la temperatura ambiente.

- ✘ Inspección de fugas de refrigerante en las líneas de alta y baja revisando válvulas solenoides, accesorios, etc.

Uno de los métodos más prácticos, consiste en aplicar una mezcla de agua jabonosa en la tubería o terminales, en donde se sospecha pueda existir el escape de gas, determinándose la existencia de ella o no percibiendo actividad en la mezcla (burbujeo).

- ✘ Inspección de controles, calibración y regulación si es necesario (EKC 201 , manómetros, sensores)

Cheque las conexiones de los manómetros y verifique que no exista ninguna fuga. Además asegúrese que los sensores de temperatura estén debidamente conectados al controlador EKC 201 y que este último se encuentre alimentado.

Unidad de refrigeración.

- ✘ Limpieza exterior del compresor.

Para evitar la contaminación con humedad en el compresor, los tubos deben ser mantenidos tapados. Los tapones de solo deberán ser removidos en el momento de la soldadura de los tubos al sistema (el tiempo máximo permitido es de 15 minutos).

- ✘ Inspección de ruidos y vibraciones.

Verifique los pernos de anclaje, y realice el ajuste necesario. Si los amortiguadores de caucho están muy apretados, aflójelos, pues de lo contrario la amortiguación de las vibraciones será perjudicada.

- ✘ Verificación de mugre en el panel del condensador.

Realice una inspección visual del panel del condensador, en caso de estar lleno de polvo, haga limpieza con un cepillo suave asegurándose de no torcer las aletas.

Evaporador

- ✘ Verificación del ciclo de descongelamiento (por resistencia eléctrica)

Verifique que en los tiempos de descongelamiento la escarcha acumulada en el evaporador se derrita. De no ser así, revise la instalación eléctrica.

- ✘ Inspección visual del serpentín.
- ✘ Inspección del ventilador.

Observe que el ventilador se encuentre en funcionamiento y libre de ruidos extraños durante los periodos de congelamiento.

Circuito Eléctrico

- ✘ Revisión de circuito Integral, cables, contactos, relés, controladores, válvula solenoide, resistencias eléctricas, transformador auxiliar y sensores.

Verifique el enchufe y cerciórese de conectarlo en una fuente de alimentación de 220V. Con un multímetro, verifique si el cable de potencia del circuito no está interrumpido.

Verifique las conexiones con auxilio del esquema eléctrico del sistema.

Verifique si existe falla en el aislamiento de un componente eléctrico que esté en contacto con partes metálicas. En caso de ser necesario el cambio de cintas aislantes y empalmes desconecte la fuente de alimentación del sistema como primera medida.