

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO  
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL**



**PUNO – PERÚ**

**2012**

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO  
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS  
Escuela Profesional de Ingeniería Agroindustrial

“CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO DE FERMENTACIÓN,  
REFRIGERACIÓN y BATIDO DE YOGURT”

TESIS

PRESENTADO POR:

ANGEL VLADIMIR FLORES QUENAYA; y, DAVID EFRAIN TONCONI  
CRUZ

PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO AGROINDUSTRIAL

APROBADA POR EL JURADO REVISOR, CONFORMADO POR:

PRESIDENTE

:   
Ing. M.Sc. Luis Alberto JIMENEZ MONROY


PRIMER MIEMBRO

:   
Ing. M.Sc. Florentino Victor CHOQUEHUANCA CACERES

SEGUNDO MIEMBRO

:   
Ing. Ubaldo YANCACHAJLLA TITO

DIRECTOR DE TESIS

:   
Ing. M.Sc. Pablo PARI RUARCAYA

ASESOR DE TESIS

---

Área: Ingeniería y tecnología

Tema: Propiedades físicas y estructurales

## DEDICATORIA

Dedico el presente trabajo de investigación a Dios, a la memoria de mis abuelos, a mi padre Angel R. Flores y mi madre Claudina Quenaya, por su tenacidad de vida que Dios les concede.

A todos mis hermanos, tíos y primos por su aliento moral y persuasión en mi formación profesional como Ingeniero Agroindustrial. Finalmente, a todas las personas que directa o indirectamente aportaron con un granito de tecnología para la feliz culminación del presente trabajo de investigación, planteada para el beneficio del Sector Agroindustrial a nivel regional y nacional.

FLORES QUENAYA, Angel Vladimir

Este trabajo lo dedico a Dios por darme las fuerzas para seguir adelante sin desmayar, a mis queridos padres: Nicolás Tonconi, Alejandrina Cruz y a mi hermana que me supieron apoyar.

A mis amigos con quienes compartí mi vida estudiantil y una verdadera amistad.

TONCONI CRUZ, David Efraín

## AGRADECIMIENTOS

A las instituciones y personas que con su colaboración y ayuda, hicieron posible la realización del presente Trabajo de Investigación.

Merecen honrosa mención:

El Ing. M. Sc. Pablo Pari Huarcaya, como Director responsable del presente Trabajo de Tesis; y, en reconocimiento por su valioso trabajo en el procesamiento estadístico, y orientación para la conclusión del presente trabajo.

Los señores: Adam Sucasaca Toledo; y, Yhony Cahuaya Quispe. Los mismos que aportaron con sus ideas y su valiosa experiencia en la construcción del Equipo Multiproceso.

La Universidad Nacional del Altiplano y toda la Plana Docente de la Facultad de Ciencias Agrarias, por haber contribuido en nuestra formación profesional.



## ÍNDICE DEL CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
<b>RESUMEN.</b>	1
<b>I. INTRODUCCIÓN.</b>	2
<b>II. REVISIÓN DE LITERATURA.</b>	4
2.1. EL YOGURT.	4
2.1.1. Definición de yogurt.	4
2.1.2. Defectos más comunes presentados en la elaboración de yogurt.	4
2.1.3. Proceso de elaboración de yogurt.	4
2.2. SISTEMA DE REFRIGERACIÓN POR COMPRESIÓN DE VAPOR.	13
2.2.1. Proceso (4 - 1) a través del compresor.	15
2.2.2. Proceso (1 - 2) a través del condensador.	15
2.2.3. Proceso (2 - 3) a través del dispositivo de expansión.	16
2.2.4. Proceso (3 - 4) a través del evaporador.	16
2.3. SISTEMA DE REFRIGERACIÓN CON INVERSIÓN DE DIRECCIÓN DEL FLUIDO REFRIGERANTE.	17
2.3.1. Bomba de calor.	17
2.3.2. Tránsferencia de calor en la refrigeración.	20
2.4. MARCO CONCEPTUAL.	22
2.4.1. Presión absoluta y manométrica.	22
2.4.2. Temperatura de saturación.	22
2.4.3. Sobrecalentamiento - calor sensible del vapor.	23
2.4.4. Entalpia.	23
2.4.5. Efecto de refrigeración.	23
2.4.6. Flujo másico de refrigerante.	24
2.4.7. Calor de compresión y trabajo de compresión.	24
2.4.8. Potencia teórica requerida por el compresor.	25
2.4.9. Calor de rechazo ( <i>C.R.</i> ).	25

2.5. MARCO REFERENCIAL.	26
2.5.1. Funcionamiento del sistema de refrigeración como máquina de enfriamiento.	26
2.5.2. Funcionamiento del sistema de refrigeración como máquina de calefacción.	31
2.6. AGITACIÓN y MEZCLADO DE FLUIDO y NECESIDADES DE POTENCIA.	37
2.6.1. Equipo para agitación.	37
2.6.2. Selección de agitador e intervalos de viscosidad.	41
2.6.3. Trayectoria del flujo en la agitación.	41
2.6.4. Diseño normal típico de una turbina.	42
2.6.5. Potencia consumida en los recipientes de agitación.	42
2.7. VISCOSIDAD.	43
<b>III. MATERIALES y MÉTODOS.</b>	46
3.1. ÁMBITO DE ESTUDIO.	46
3.2. MATERIALES y EQUIPOS.	46
3.2.1. Materia prima e insumos	46
3.2.2. Materiales empleados en la construcción del equipo multiproceso.	46
3.2.3. Equipos y herramientas empleados para la construcción y control del equipo multiproceso.	47
3.2.4. Equipo empleado para la determinación de la viscosidad del yogurt.	48
3.3. CÁLCULO, SELECCIÓN y DISEÑO DEL EQUIPO.	48
3.3.1. Cálculo de dimensiones del tanque contenedor.	48
3.3.2. Cálculo del espesor del aislante para las paredes del tanque.	49
3.3.3. Cálculo de la carga térmica del tanque contenedor.	52
3.3.4. Selección del sistema de refrigeración.	60
3.3.5. Cálculo y diseño del evaporador.	63
3.3.6. Selección de la unidad condensadora.	67
3.3.7. Cálculo y selección del agitador.	67

3.3.8. Cálculo de la potencia de motor requerida para el agitador.	69
3.4. MÉTODO EXPERIMENTAL.	71
3.4.1. Descripción de las operaciones efectuadas.	75
3.4.2. Análisis estadístico.	77
<b>IV. RESULTADOS y DISCUSIÓN.</b>	<b>79</b>
4.1. CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPO MULTIPROCESO PARA SISTEMATIZAR LAS ETAPAS DE FERMENTACIÓN, ENFRIAMIENTO y BATIDO DE YOGURT.	79
4.1.1. Dimensiones del tanque contenedor.	79
4.1.2. Espesor del aislante para las paredes del tanque.	80
4.1.3. Carga térmica del tanque contenedor.	80
4.1.4. Sistema de refrigeración.	81
4.1.5. Diseño del evaporador.	82
4.1.6. Unidad condensadora.	82
4.1.7. Selección del agitador.	83
4.1.8. Potencia de motor requerida para el agitador.	84
4.2. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LA PRESIÓN DEL COMPRESOR y TIEMPO EN LA OBTENCIÓN DE TEMPERATURAS PARA LA FERMENTACIÓN DEL YOGURT.	85
4.3. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LA PRESIÓN DEL COMPRESOR y TIEMPO EN LA OBTENCIÓN DE TEMPERATURAS PARA EL ENFRIAMIENTO DEL YOGURT.	89
4.4. BATIDO DE YOGURT.	95
<b>V. CONCLUSIONES.</b>	<b>97</b>
<b>VI. RECOMENDACIONES.</b>	<b>98</b>
<b>VII. BIBLIOGRAFÍA CITADA.</b>	<b>99</b>
<b>VIII. ANEXOS.</b>	<b>102</b>

## ÍNDICE DE CUADROS

	Pág.
<b>Cuadro 1.</b> Defectos en la elaboración de yogurt y sus posibles causas.	5
<b>Cuadro 2.</b> Coeficientes de transferencia de calor.	50
<b>Cuadro 3.</b> Espesor y conductividad térmica de los materiales empleados.	51
<b>Cuadro 4.</b> Propiedades del producto.	57
<b>Cuadro 5.</b> Resumen de temperatura, presión y entalpia del refrigerante 22.	63
<b>Cuadro 6.</b> Valores de “ <i>n</i> ” y “ <i>k</i> ” para las bebidas fermentadas.	68
<b>Cuadro 7.</b> Intervalos de viscosidad para la selección del tipo de agitador.	69
<b>Cuadro 8.</b> Intervalos del $N'_{re}$ para determinar el tipo de flujo.	70
<b>Cuadro 9.</b> Constantes $K_L$ y $K_T$ por tipo de rodete.	71
<b>Cuadro 10.</b> Cuadro operacional.	78
<b>Cuadro 11.</b> Dimensiones y capacidad del tanque.	79
<b>Cuadro 12.</b> Espesor de aislante para las paredes del tanque.	80
<b>Cuadro 13.</b> Carga térmica del tanque contenedor en el proceso de fermentación.	81
<b>Cuadro 14.</b> Carga térmica del tanque contenedor en el proceso de enfriamiento.	81
<b>Cuadro 15.</b> Resumen de características calculadas para el evaporador.	82
<b>Cuadro 16.</b> Características calculadas para seleccionar la unidad condensadora.	83
<b>Cuadro 17.</b> Resultados obtenidos del proceso de fermentación.	85
<b>Cuadro 18.</b> ANVA asociado a los resultados experimentales obtenidos en el proceso de fermentación.	87
<b>Cuadro 19.</b> Comparación de medias (DUNCAN) de los resultados obtenidos en el proceso de fermentación.	88
<b>Cuadro 20.</b> Resultados obtenidos del proceso de enfriamiento.	90
<b>Cuadro 21.</b> ANVA asociado a los resultados experimentales obtenidos en el proceso de enfriamiento.	92
<b>Cuadro 22.</b> Comparación de medias (DUNCAN) de los resultados obtenidos en el proceso de enfriamiento.	93



## ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
<b>Figura 1.</b> Sistema básico de refrigeración por compresión de vapor - refrigerante freón 12.	13
<b>Figura 2.</b> Diagrama $P - h$ del ciclo termodinámico ideal de refrigeración por compresión de vapor con refrigerante freón 12.	14
<b>Figura 3.</b> Diagrama $T - S$ del ciclo termodinámico ideal de refrigeración por compresión de vapor con refrigerante freón 12.	14
<b>Figura 4.</b> Ciclo de enfriamiento.	18
<b>Figura 5.</b> Ciclo de calefacción.	19
<b>Figura 6.</b> Disposición de equipos y accesorios del sistema de refrigeración y aire acondicionado operando como máquina de enfriamiento.	28
<b>Figura 7.</b> Ciclo termodinámico real de refrigeración por compresión de vapor en el diagrama $P - h$ , cuando el sistema opera como máquina de enfriamiento.	27
<b>Figura 8.</b> Disposición de equipos y accesorios del sistema de refrigeración y aire acondicionado operando como máquina de calefacción.	33
<b>Figura 9.</b> Ciclo termodinámico real de refrigeración por compresión de vapor en el diagrama $P - h$ , cuando el sistema opera como máquina de calefacción.	32
<b>Figura 10.</b> Tanque con deflectores y agitador de turbina de paletas planas con patrón de flujo axial.	38
<b>Figura 11.</b> Varios tipos de agitadores: a) Paleta de cuatro aspás; b) Paleta de compuerta o ancla; c) Turbina abierta de seis aspás; y, d) Turbina de aspa inclinada ( $45^\circ$ ).	39
<b>Figura 12.</b> Tanque con deflectores con un agitador de turbina de seis aspás con disco, que muestran patrones de flujo: a) Vista lateral; b) Vista superior; y, c) Dimensiones de turbina y tanque.	40
<b>Figura 13.</b> Diagrama de presión y entalpia.	62

<b>Figura 14.</b> Diagrama de flujo para la elaboración de yogurt.	72
<b>Figura 15.</b> Diagrama de flujo para la elaboración de yogurt (normal y simplificado).	73
<b>Figura 16.</b> Diagrama simplificado del proceso de elaboración de yogurt y diseño experimental para la evaluación del equipo.	74
<b>Figura 17.</b> Tanque contenedor del equipo.	79
<b>Figura 18.</b> Aislante térmico colocado en las paredes del tanque contenedor.	80
<b>Figura 19.</b> Refrigerante 22 utilizado para el sistema.	81
<b>Figura 20.</b> Evaporador acondicionado en el tanque.	82
<b>Figura 21.</b> Unidad condensadora.	83
<b>Figura 22.</b> Agitador tipo turbina de 04 palas.	84
<b>Figura 23.</b> Motor reductor para el agitador.	84
<b>Figura 24.</b> Promedio de temperaturas obtenidas del funcionamiento del equipo como máquina de fermentación.	85
<b>Figura 25.</b> Promedio de temperaturas obtenidas del funcionamiento del equipo como máquina de enfriamiento.	90

## ÍNDICE DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
<b>Anexo 1.</b> Propiedades de los metales y no metales.	102
<b>Anexo 2.</b> Propiedades físicas y químicas de los alimentos.	103
<b>Anexo 3.</b> Gráfica de conducción en estado no estacionario y temperaturas promedio para resistencias superficiales despreciables.	104
<b>Anexo 4.</b> Características y propiedades del refrigerante 22.	105
<b>Anexo 5.</b> Diagrama $P - h$ del refrigerante 22.	106
<b>Anexo 6.</b> Tabla de saturación R22.	107
<b>Anexo 7.</b> Diferencia de temperatura entre temperatura de evaporación del refrigerante y del medio ambiente interior.	108
<b>Anexo 8.</b> Coeficientes de paso de calor para varios tipos de evaporadores.	108
<b>Anexo 9.</b> Tubos de cobre para refrigeración.	109
<b>Anexo 10.</b> Catalogo para la selección de la unidad condensadora.	110
<b>Anexo 11.</b> Certificado de análisis reológico del yogurt.	111
<b>Anexo 12.</b> Manual de uso y mantenimiento del equipo.	112

## ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

	<b>Pág.</b>
<b>Foto 1.</b> Construcción del tanque contenedor del equipo multiproceso (Agosto, 2010).	118
<b>Foto 2.</b> Acondicionamiento de tubería de cobre (evaporador) en la pared externa del tanque contenedor (Agosto, 2010).	118
<b>Foto 3.</b> Construcción de la cobertura externa del tanque contenedor (Agosto, 2010).	119
<b>Foto 4.</b> Acondicionamiento de aislante térmico (poliuretano) en las paredes laterales del tanque contenedor (Agosto, 2010).	119
<b>Foto 5.</b> Construcción y acondicionamiento de la tapa del tanque contenedor (Septiembre, 2010).	120
<b>Foto 6.</b> Acondicionamiento del motor reductor en la tapa del tanque contenedor (Octubre, 2012).	120
<b>Foto 7.</b> Trabajos en el sistema eléctrico del equipo multiproceso (Octubre, 2010).	121
<b>Foto 8.</b> Pruebas de funcionamiento del equipo multiproceso (Noviembre, 2010).	121
<b>Foto 9.</b> Pruebas de funcionamiento del equipo multiproceso (Noviembre, 2010).	122
<b>Foto 10.</b> Pruebas de funcionamiento del equipo multiproceso (Diciembre, 2010).	122
<b>Foto 11.</b> Vista general del equipo multiproceso (Julio, 2012).	123

## ÍNDICE DE PLANOS

	Pág.
<b>Plano 1.</b> Vista frontal del equipo multiproceso.	124
<b>Plano 2.</b> Vista lateral izquierda del equipo multiproceso.	125



## RESUMEN

El trabajo de investigación, desarrolló la “Construcción de un Equipo de Fermentación, Refrigeración y Batido de Yogurt”, el cual fué realizado en la Escuela Profesional de Ingeniería Agroindustrial, Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional del Altiplano, Puno. El objetivo, fué construir un equipo para sistematizar las etapas de fermentación, enfriamiento y batido en el proceso de elaboración de yogurt; en este sentido, se construyó un equipo capaz de producir frío y calor, basado en el uso de un sistema de refrigeración con inversión de dirección del fluido refrigerante. Para evaluar su funcionamiento, se ensayaron varios experimentos que permitieron obtener temperaturas, tanto para el proceso de fermentación y enfriamiento del yogurt. En el proceso de batido, se evaluó el tiempo de agitación que permitió obtener una textura y/o consistencia adecuada del producto. En este contexto, se realizaron los cálculos correspondientes que permitieron determinar las características del equipo multiproceso. De la evaluación realizada, se determinó que para obtener temperaturas para la fermentación de yogurt, el equipo debe mantenerse encendido por un lapso de tiempo de cinco (05) minutos, tiempo en el cual la presión del compresor alcanzó 22.25 *bar* y una temperatura promedio de 44.67 °C; asimismo, se determinó que para obtener temperaturas para el enfriamiento de yogurt, el equipo debe mantenerse encendido por un lapso de tiempo de quince (15) minutos, tiempo en el cual la presión del compresor alcanzó 9.10 *bar* y una temperatura promedio de 4.67 °C. También, se determinó que el tiempo de batido de yogurt para obtener una consistencia adecuada del producto, fue de 30 minutos a una velocidad constante de 20 *rpm*, con un agitador tipo Turbina de cuatro (04) palas planas.

## I. INTRODUCCIÓN.

La necesidad de realizar el presente Proyecto de Investigación, nace a raíz de que en la industria láctea, existe una gran variedad de productos que en alguna parte de su proceso de elaboración, necesitan ser fermentados y enfriados. En este contexto, en el presente Proyecto planteamos un sistema poco convencional para producir temperaturas de fermentación y enfriamiento, específicamente para el proceso de elaboración del yogurt.

El campo de la refrigeración encuentra cada vez mayores aplicaciones, cuyo uso se extiende día a día. Sin lugar a dudas, la mayor aplicación que tiene la refrigeración está orientada al campo de la conservación de productos alimenticios a bajas temperaturas; sin embargo, en el presente Proyecto se pretende aprovechar el calor que es extraído por medio del evaporador y que es cedido al medio ambiente por medio del condensador.

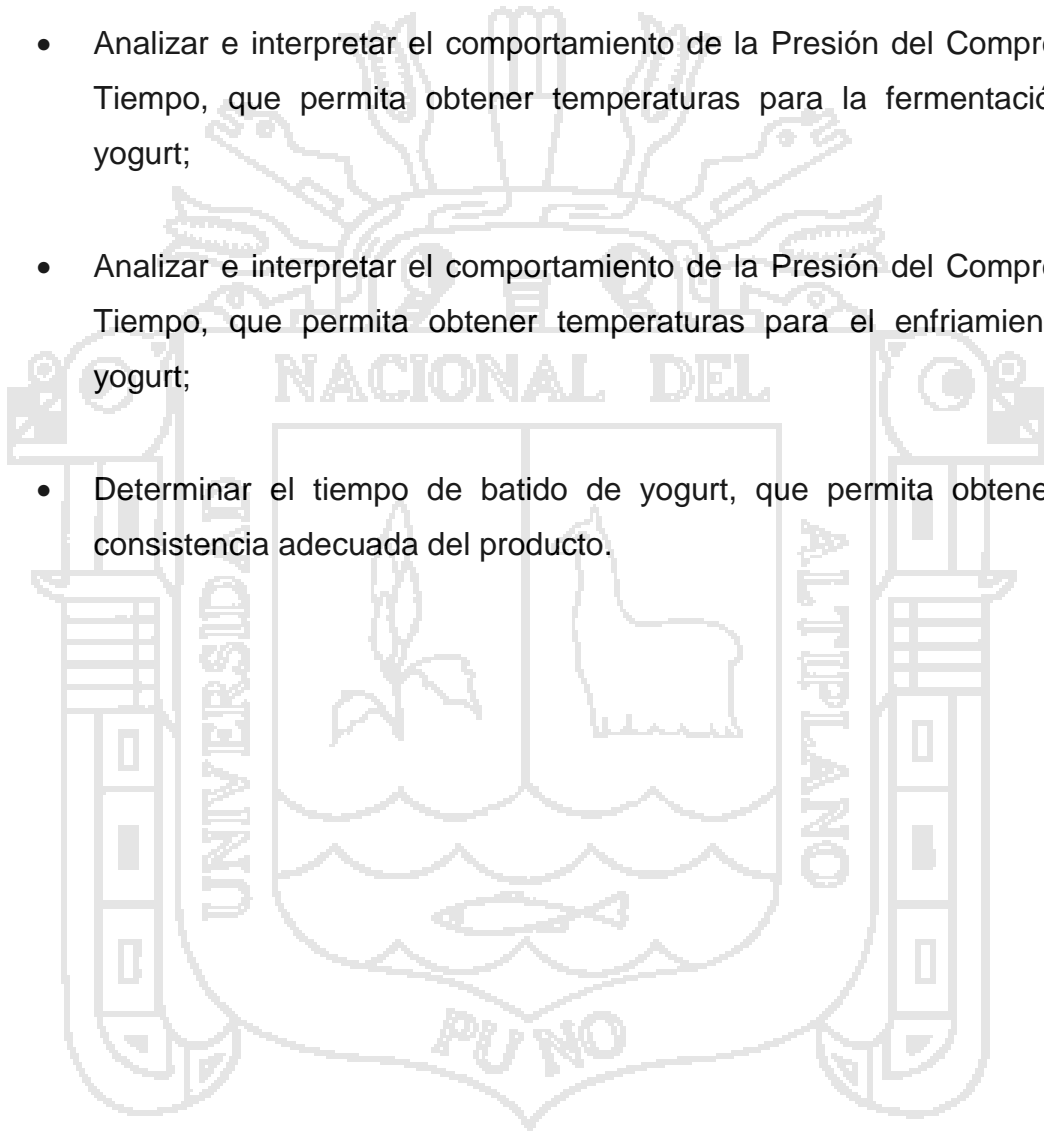
El sistema de generación de energía planteado en el presente Proyecto para producir frío y calor, está basado en el uso de un sistema de refrigeración con inversión de dirección del fluido refrigerante (bomba de calor). El cual, es un sistema práctico y económico en comparación con los sistemas empleados actualmente para tal fin.

Si consideramos que para la producción de yogurt, es necesario contar con una variedad de equipos de funciones específicas; los cuales, organizados adecuadamente, dan como resultado un producto final con niveles aceptables de calidad. Debemos considerar que su adquisición, demanda de una inversión monetaria inicial elevada, constituyéndose en una muy seria limitante para los potenciales productores.

Es así, que con la ejecución del presente Proyecto, se pretende construir un equipo que pueda sistematizar los procesos de fermentación, enfriamiento y batido de yogurt; vale decir, que en lugar de tener tres (03) equipos de función específica, se obtendrá un equipo de función múltiple.

En este contexto, nos planteamos construir un equipo para sistematizar las etapas de fermentación, enfriamiento y batido en el proceso de elaboración de yogurt, siendo nuestros objetivos perseguidos, los siguientes:

- Determinar las características del equipo multiproceso para sistematizar las etapas de fermentación, enfriamiento y batido de yogurt;
- Analizar e interpretar el comportamiento de la Presión del Compresor y Tiempo, que permita obtener temperaturas para la fermentación del yogurt;
- Analizar e interpretar el comportamiento de la Presión del Compresor y Tiempo, que permita obtener temperaturas para el enfriamiento del yogurt;
- Determinar el tiempo de batido de yogurt, que permita obtener una consistencia adecuada del producto.





## II. REVISIÓN DE LITERATURA.

### 2.1. EL YOGURT.

#### 2.1.1. DEFINICIÓN DE YOGURT.

El yogurt, es el resultado de la fermentación de la leche, a partir de las bacterias ácido lácticas (*S. thermophilus* y *L. bulgaricus*); ambas, bacterias termófilas y homofermentativas. Actualmente, la elaboración de yogurt se encuentra muy diversificada en distintas clases, sin embargo, estas no difieren en lo esencial (en el proceso), Codex Alimentarius (2003).

#### 2.1.2. DEFECTOS MÁS COMUNES PRESENTADOS EN LA ELABORACIÓN DE YOGURT.

Los defectos más comunes que se presentan en la elaboración de yogurt, se pueden clasificar en tres (03) categorías (defectos de sabor, de aspecto y de textura).

En el Cuadro 1, se detallan los defectos más comunes (de sabor, de aspecto y de textura) presentes en la elaboración de yogurt; asimismo, se describen las posibles causas de los mismos.

#### 2.1.3. PROCESO DE ELABORACIÓN DE YOGURT.

Para la fabricación de yogurt, se parte del inóculo de bacterias lácticas en la leche, las cuales determinan la acidificación y la fermentación del producto final; por lo que la calidad del producto, depende en gran medida de la composición y la preparación del cultivo, Spreer (1991).

De los productos lácteos fermentados, el yogurt tiene una gran demanda en su consumo. Actualmente, las típicas características de consistencia, se determinan como:

- **Yogurt consistente o sólido:** El gel debe ser consistente y solidificado en el envase final. Se consume preferentemente con la ayuda de una cuchara;

**CUADRO 1. DEFECTOS EN LA ELABORACIÓN DE YOGURT y SUS POSIBLES CAUSAS.**

<b>DEFECTO</b>	<b>CAUSA</b>
<b>DEFECTOS DE SABOR:</b>	
SABOR AMARGO.	- Demasiado tiempo de almacenamiento.
SABOR A LEVADURA, ALCOHOL.	- Contaminación por levadura.
SABOR MOHOSO.	- Contaminación por mohos.
INSIPIDEZ, SIN AROMA.	- Frutas de mala calidad (en yogurt con fruta). - Bajo tiempo de fermentación.
BAJA DE ACIDEZ.	- Baja temperatura de incubación.
ALTA ACIDEZ.	- Actividad débil de los microorganismos. - Fallos en la fermentación.
SABOR A RANCIO.	- Bacteriófagos en el cultivo de yogurt. - Alta temperatura de almacenamiento.
SABOR HA COCIDO O QUEMADO.	- Contaminación de gérmenes lipolíticos. - Tratamiento térmico insuficiente.
SABOR GRASO.	- Tratamiento térmico excesivo. - Elevado contenido en materia grasa.
<b>DEFECTOS DE ASPECTO:</b>	
DESUERADO, SINÉRESIS.	- Sobreacidificación o posacidificación. - Enfriamiento insuficiente. - Agitación excesivamente fuerte e incorporación excesiva de aire (en yogurt tipo batido). - Poco contenido de extracto seco.
PRODUCCIÓN DE GAS.	- Contaminación por levadura o coliformes.
COLONIAS EN SUPERFICIE.	- Contaminación por levadura o mohos.
CAPAS DE NATA.	- Mala o nula homogenización.
<b>DEFECTOS DE TEXTURA:</b>	
FALTA DE FIRMEZA.	- Siembra escasa. - Mala incubación. - Agitación antes de coagular completamente. - Bajo contenido en extracto seco.
EXCESO DE FLUIDEZ.	- Microorganismos inadecuados. - Temperatura de incubación baja. - Fuerte agitación de gel.
TEXTURA ARENOSA.	- Calentamiento excesivo de la leche. - Un mal mezclado de la leche en polvo. - Homogenización a temperatura muy elevada. - Acidificación irregular y demasiado baja.
TEXTURA GRANULOSA.	- Precipitación de fosfato cálcico / desnaturalización de partículas de albumina. - Alto contenido de materia grasa. - Elección incorrecta de microorganismos.

FUENTE: BRIEF COMMUNICATIONS (1978).

- **Yogurt batido:** Gel que después de cuajado se realiza un troceo, enfriado y envasado. En el envase se da un incremento de su viscosidad, logrando presentar nuevamente una consistencia casi firme; y,
- **Yogurt líquido o para beber:** Es el mismo proceso que el yogurt batido, a diferencia que antes del envasado, se debe transformar por homogeneización en un líquido. De tal forma, que se puede consumir en forma de bebida.

**a. Recepción de la leche.**

Se debe seleccionar la leche más adecuada, que posea un contenido elevado de proteína. No debe contener bacterias nocivas y sustancias como antibióticos, bacteriófagos o agentes estabilizantes, Spreer (1991).

**b. Tratamiento preliminar de la leche.**

En éste caso, se verifica la calidad de la leche, la cual debe estandarizarse con un contenido de grasa y sólidos totales de la leche. El Contenido de grasa en el yogurt, se clasifica en el grupo siguiente, García (1994).

- Yogurt alto en grasa, 3.0%;
- Yogurt bajo en grasa, 1.5%; y,
- Yogurt libre en grasa, 1.0%.

**c. Desodorización.**

Al adicionar los sólidos no grasos (SNG), se produce una gran incorporación de aire; en este caso, es necesario desodorizar la leche en un tanque al vacío. La finalidad de esta etapa, es:

- Eliminar sustancias aromáticas y sápidas indeseables;
- Mejorar los efectos de la homogeneización; y,
- Mejorar la estabilidad del gel, incrementando la viscosidad.

La temperatura de desodorización, es de 70 - 75 °C; y, a una presión de 70 - 80 *KPa.*, García (1994).

#### **d. Homogenización.**

La finalidad de la homogeneización, es reducir el tamaño de los glóbulos grasos, evitar la separación de la grasa durante la incubación y obtener una mezcla uniforme; además, permite mejorar el sabor e incrementar la consistencia, viscosidad y estabilidad del yogurt. Previniendo la separación del suero, Ruiz (1990) citado por Sánchez (1992).

La homogeneización, permite:

- Reducir el diámetro promedio de los glóbulos de grasa, menor de dos (02) micras ( $\mu m$ );
- Mejorar la viscosidad del yogurt por el incremento de la adsorción de las micelas de caseína sobre los glóbulos de grasa;
- Reducir la sinéresis; y,
- Asegurar en el proceso una mezcla uniforme de cualquier ingrediente seco agregado a la leche.

#### **e. Tratamiento térmico.**

La leche utilizada en el proceso de elaboración del yogurt, debe pasar por un tratamiento térmico, con el propósito de eliminar la flora asociada a la leche, permitiendo un medio adecuado para el crecimiento de las bacterias del yogurt.

Los objetivos que tiene la pasteurización, son:

- Asegurar un coágulo firme, reduciendo la separación del suero en el producto, Sánchez (1992);
- Permitir la destrucción de cualquier microorganismo presente en estado vegetativo, evitando el riesgo de competencia con las bacterias lácticas del yogurt;

- Lograr expulsión de oxígeno de la mezcla, proporcionando las condiciones microaerófilas necesarias para el crecimiento de las bacterias lácticas;
- Redistribuir los minerales, especialmente el Calcio;
- Permitir la desnaturalización de las proteínas del suero (en especial, la *P-lactoglobulina* y la *a-lactoalbúmina*), que interactúan con la caseína; y,
- Obtener la desnaturalización de las proteínas del suero, para limitar la sinéresis del coágulo; por tanto, reducir la exudación del suero.

#### **f. Enfriamiento.**

Posteriormente, la leche debe enfriarse hasta la temperatura de incubación (de 42 a 45 °C). La actividad de las bacterias, está determinado principalmente por la temperatura de incubación y el porcentaje de inóculo agregado. Estos factores influirán en la acidez final del producto. En sí, mientras mayor sea la diferencia de la temperatura óptima de incubación, y menor la cantidad de inóculo adicionado, mayor será el tiempo de fermentación. En este sentido, la temperatura y tiempo de incubación, así como la cantidad de inóculo adicionado, estarán influyendo en la acidez final del producto (yogurt).

#### **g. Inoculación e incubación.**

El proceso de incubación, se inicia a partir del inóculo (2 a 3% de los fermentos lácticos a la leche); y, se caracteriza porque en el proceso de fermentación láctica, se produce la coagulación de la caseína de la leche.

La temperatura de incubación, se debe mantener de 40 - 45 °C, en un periodo corto de fermentación (que va de 3 a 4 horas), hasta alcanzar una acidez de 0.80% a 1.20% de ácido láctico; ó, un pH de entre 4.41-4.50, lo que marca el final de la incubación. A esa temperatura se logra la acidez, la consistencia y el sabor deseado, Spreer (1991).

Este proceso tiene por objeto proporcionar las condiciones de temperatura y tiempo para que se desarrolle óptimamente el cultivo

inoculado, responsable de la fermentación láctica y formación de compuestos responsables del sabor y aroma del yogurt. Tamine y Robinson (1991), indica que la incubación se efectúa óptimamente a una temperatura de 40 a 45 °C, durante 2.5 a 3 horas, hasta que coagule.

Durante la fermentación, la leche debe permanecer en reposo total, para que el gel del yogurt se desarrolle en forma óptima. El gel debe presentar un aspecto del coágulo homogéneo, no debiendo haber una exudación de suero (sinéresis).

De acuerdo al tipo de yogurt a elaborar; y, en función de las instalaciones que se tengan. La incubación y/o fermentación, se puede realizar en:

- Los envases de venta (para yogurt consistente);
- Los tanques de fermentación (para yogurt batido y yogurt para beber);
- Pre fermentación continua en tanques y fermentación principal en los envases (para yogurt consistente); y,
- Fermentación continua (en yogurt consistente, yogurt batido y yogurt para beber).

#### **h. Enfriamiento rápido.**

Una vez obtenido el proceso de fermentación, se debe controlar la actividad metabólica de los cultivos y las enzimas. El enfriamiento del coágulo (de manera rápida), llega a controlar la acidez del producto, reduciendo la actividad metabólica del cultivo; de lo contrario, se tendrá una acidez excesiva. Se aconseja enfriar a valores de acidez de 0.8 a 1.0% de ácido láctico, con la finalidad de obtener el yogurt final a concentraciones de 1.2 a 1.4% de ácido láctico, Tamine y Robinson (1991).

El enfriamiento se debe realizar con la mayor rapidez posible para evitar que el yogurt siga acidificándose en más de 0.3 unidades de pH, cuando mucho se debe alcanzar una temperatura de 15 °C en 1.5 - 2.0 horas, Gómez (1999).

Debido a la escasa actividad de los microorganismos del yogurt, a temperaturas de 10 °C aproximadamente, el objetivo del enfriamiento es disminuir la temperatura del coágulo de 30 - 45 °C a menos de 10 °C; y, preferentemente a 5 °C tan rápido como sea posible, para así controlar la acidez final del producto. La finalidad es reducir la actividad metabólica de *S. thermophilus* y *L. bulgaricus*, porque que si la refrigeración se retrasa, el yogurt puede ser inaceptable debido a una acidez excesiva, Gómez (1999).

El proceso de enfriamiento deberá llevarse a cabo de las siguientes formas:

- **Enfriamiento en una sola fase.**

En éste proceso el coágulo se enfría directamente desde la temperatura de incubación, hasta temperaturas inferiores de 10 °C, antes de proceder a la adición de los agentes aromatizantes y al envasado del producto. El fundamento de éste método, es que el coágulo es más estable a bajas temperaturas que a temperaturas superiores a 20 °C; por lo que, tienen lugar menos alteraciones durante las etapas posteriores, es decir, durante las manipulaciones necesarias para la adición de frutas y aromas, o durante el envasado para la posterior comercialización, Gómez (1999).

- **Enfriamiento de dos fases.**

Durante la primera fase del proceso se reduce la temperatura del coágulo, de 30 - 45 °C a 15 - 20 °C, antes de la adición de los aromatizantes y del envasado. La segunda fase de enfriamiento, se realiza en recipientes de refrigeración en las que el yogurt se enfría

hasta temperaturas inferiores a 10 °C. El enfriamiento final debe ser por tanto en el envase de comercialización, Gómez (1999).

La temperatura se disminuye rápidamente a 20 °C, para detener la fermentación y evitar la sobre acidificación; en esta etapa se realiza el batido, la adicción de los aromatizantes y el envasado. Si se envasa a temperaturas más bajas, se destruyen las estructuras de las proteínas, y no es posible conformarla otra vez a las temperaturas de almacenamiento, Reyes (2008).

La temperatura de enfriamiento, debe mantenerse en 5 °C, hasta alcanzar una temperatura de 20 °C en el producto, lo que marca el final del enfriamiento. A esa temperatura, se recomienda iniciar el proceso de batido del yogurt, Reyes (2008).

Estos dos tipos de refrigeración son muy utilizados en la industria para la elaboración de yogurt, con la finalidad de obtener características y viscosidad apropiadas.

El enfriamiento final del yogurt, puede hacerse en túneles de enfriamiento o en los envases de venta.

**i. Adición de complementos.**

El yogurt con frutas o suplementado, se elabora añadiendo al yogurt determinados ingredientes complementarios, que deben ser compatibles (de manera agradable) con el aroma característico del yogurt. Las sustancias añadidas, pueden ser: Jarabes de frutas; Conservas de frutas (esterilizadas); Jaleas de frutas; Pulpas de frutas (edulcorada o no); Extractos de frutas; Frutas conservadas por congelación; Mermeladas; y, Azúcar. Tamine y Robinson (1991).

**j. Envasado del yogurt.**

En la producción de yogurt, su envasado tiene una gran importancia y su propósito, es:



- Proteger el producto contra la suciedad, microorganismos y el ambiente, gases (oxígeno) y luz;
- Proporciona información relevante al consumidor (nombre y origen del producto, ingredientes, instrucciones de uso, fecha de caducidad, entre otros datos); y,
- El material del envase no debe ser tóxico, asimismo, no debe presentar reacciones químicas entre el material y el yogurt.

#### **k. Almacenamiento.**

La refrigeración del yogurt a temperaturas inferiores de 10 °C. Permite hasta el momento de su venta, el retraso de las reacciones bioquímicas y biológicas en el producto.

La refrigeración del yogurt, permite conservar la calidad del producto hasta varias semanas después de su fabricación.

Durante las primeras 24 - 48 horas de almacenamiento (en refrigeración), se observa una mejora de las características físicas del coagulo; por lo que, resulta aconsejable retrasar el reparto y distribución del producto durante éste tiempo, Tamine y Robinson (1991).

En condiciones normales de producción, el yogurt se debe conservar a temperaturas de almacenamiento refrigerado (5 °C), por un tiempo aproximado de una semana.

Para alargar el tiempo de conservación (de 3 a 4 semanas), pueden utilizarse dos (02) métodos:

- Producción y envasado en condiciones asépticas; y,
- Realizar un segundo tratamiento térmico del yogurt, justo antes de envasar el producto, o ya envasado.

La conservación del yogurt a partir de una doble pasteurización, puede darse a temperaturas más bajas, debido a la acidez (pH bajo) del yogurt.

## 2.2. SISTEMA DE REFRIGERACIÓN POR COMPRESIÓN DE VAPOR.

El método más utilizado para producir refrigeración mecánica, se conoce como el sistema de refrigeración por compresión de vapor. En el presente Acápite, se explica cómo se obtiene la refrigeración por este método; y, cuál es el equipo necesario para llevarlo a cabo, Pita (1991).

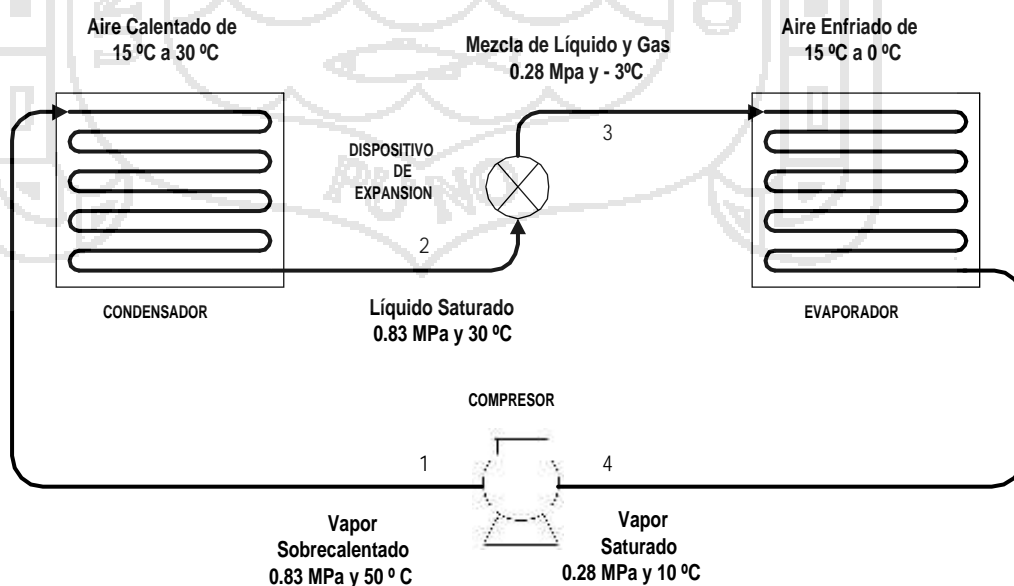
A continuación, se efectúa un análisis detallado del funcionamiento de un sistema de refrigeración básico, utilizando un ejemplo específico, a fin de hacer más práctico el análisis, Pita (1991).

En la Figura 1, se muestra la disposición de los equipos y las tuberías de interconexión del sistema básico de refrigeración por compresión de vapor, para el refrigerante Freón 12.

Los componentes básicos del sistema de refrigeración, son:

- Motor compresor;
- Condensador;
- Evaporador; y,
- Dispositivo de expansión o dispositivo de control de flujo.

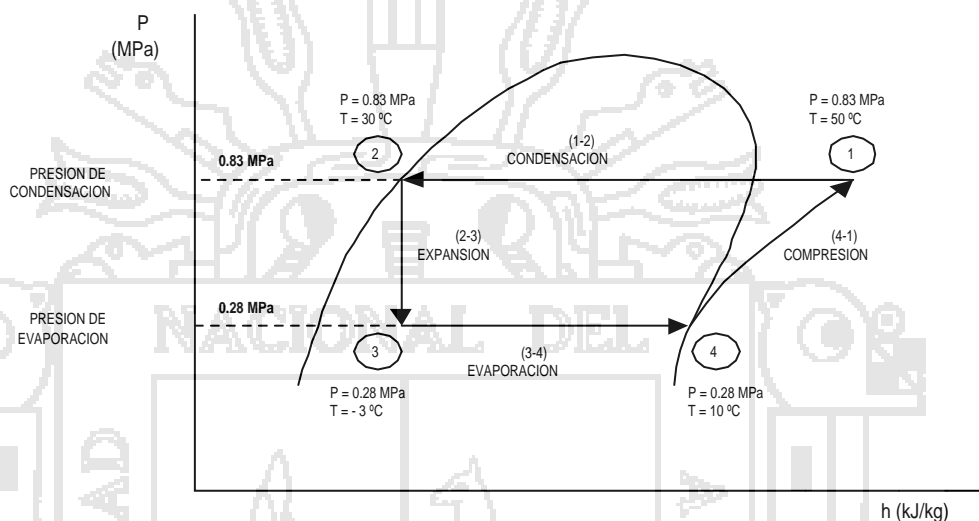
**FIGURA 1. SISTEMA BÁSICO DE REFRIGERACIÓN POR COMPRESIÓN DE VAPOR - REFRIGERANTE FREÓN 12.**



FUENTE: PITA (1991).

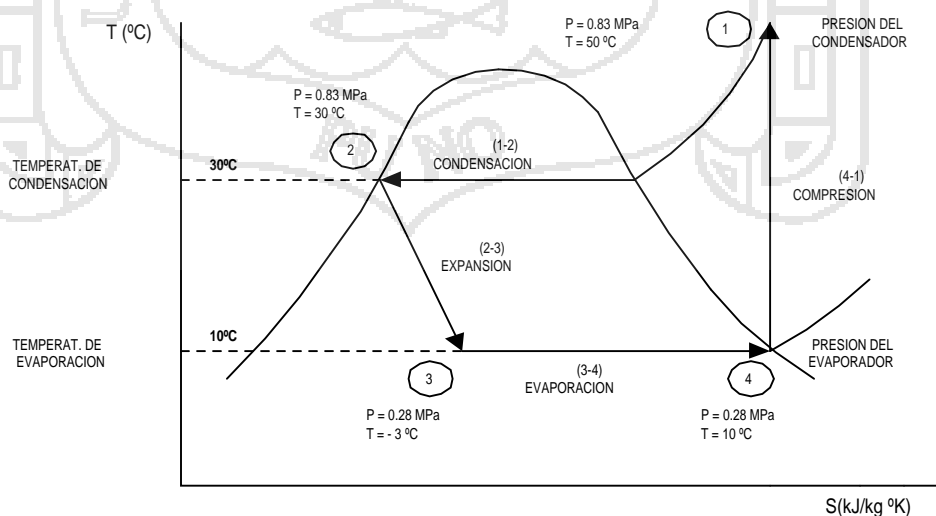
El funcionamiento del sistema, se determina examinando su ciclo termodinámico (Figuras 2 y 3). Este ciclo está representado por la serie compleja de procesos y cambios físicos que experimenta el refrigerante (Freón 12) en el sistema.

**FIGURA 2. DIAGRAMA  $P - h$  DEL CICLO TERMODINÁMICO IDEAL DE REFRIGERACIÓN POR COMPRESIÓN DE VAPOR CON REFRIGERANTE FREÓN 12.**



FUENTE: PITA (1991).

**FIGURA 3. DIAGRAMA  $T - S$  DEL CICLO TERMODINÁMICO IDEAL DE REFRIGERACIÓN POR COMPRESIÓN DE VAPOR CON REFRIGERANTE FREÓN 12.**



FUENTE: PITA (1991).

A continuación, se describen los procesos y cambios físicos que el refrigerante Freón 12 experimenta en un sistema básico de refrigeración. Cabe recalcar, que se utiliza un ejemplo específico, a fin de hacer más práctico el análisis.

### **2.2.1. PROCESO (4 - 1) A TRAVÉS DEL COMPRESOR.**

El compresor hace ingresar el vapor saturado por el lado de la succión (Punto 4), para luego comprimirlo a una presión elevada (adecuada para efectuar la condensación). Esta presión, es aproximadamente igual a la que ingresará al dispositivo de expansión (0.83 MPa manométrica).

Se requiere trabajo para comprimir el gas, el cual procede de un motor que mueve el compresor. Este trabajo contribuye a aumentar la energía almacenada del vapor comprimido, resultando en un aumento de su temperatura; en este caso, el refrigerante sale del compresor a 50 °C (en el Punto 1), y en una condición de vapor sobrecalentado.

### **2.2.2. PROCESO (1 - 2) A TRAVÉS DEL CONDENSADOR.**

El gas a alta presión que descarga el compresor, fluye a través de la tubería del condensador (del Punto 1 al Punto 2).

Un fluido tal como el aire o agua, fluye por el exterior de la tubería del condensador. Para este caso, se utiliza aire, el cual se encuentra disponible a la temperatura ambiente, 15 °C.

El calor fluye a través de las paredes del tubo del condensador, desde el refrigerante (a mayor temperatura), hacia el aire de enfriamiento.

Como el refrigerante está sobrecalentado cuando entra al condensador, primero se enfría hasta que alcanza su temperatura de saturación, la cual, es de 30 °C a 0.83 MPa.

La remoción adicional de calor, resulta en la condensación gradual del refrigerante, hasta que se licua en su totalidad. El refrigerante sale del condensador como un líquido saturado.

### **2.2.3. PROCESO (2 - 3) A TRAVÉS DEL DISPOSITIVO DE EXPANSIÓN.**

El refrigerante líquido, ingresa al dispositivo de expansión en el Punto 2 (a  $0.83 \text{ MPa}$  y  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Existen diversos tipos de dispositivos de expansión, siendo los más comunes, la válvula de expansión y el tubo capilar. El dispositivo de expansión, tiene una abertura estrecha, lo que da como resultado, una gran pérdida de presión al fluir el refrigerante a través del mismo.

El refrigerante sale por el Punto 3 (a  $0.28 \text{ MPa}$ ). Debido a que esta presión es inferior a la presión de saturación correspondiente a  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ , una parte del refrigerante líquido, se vaporiza.

La porción del líquido que se evapora, toma el calor latente necesario para su evaporación de la mezcla de refrigerante que fluye, enfriándola de esta manera.

El refrigerante sale de la válvula como una mezcla de líquido y vapor en estado saturado. La temperatura de saturación correspondiente al refrigerante a  $0.28 \text{ MPa}$ , es  $-3 \text{ }^\circ\text{C}$ ; y, por consiguiente, es la temperatura del refrigerante en el Punto 3.

### **2.2.4. PROCESO (3 - 4) A TRAVÉS DEL EVAPORADOR.**

El refrigerante fluye a través de la tubería del evaporador (del Punto 3 al Punto 4). La sustancia que se debe enfriar (generalmente aire o un líquido), circula por el exterior de los tubos del evaporador, la cual se halla a una temperatura más elevada que la del refrigerante dentro del evaporador.

Por consiguiente, el calor fluye de la sustancia al refrigerante, a través de la pared del tubo y las aletas del evaporador.

En este caso, el aire se enfría, de 15 °C a 0 °C; debido a que el refrigerante líquido dentro del evaporador, ya se encuentra a su temperatura de saturación (su punto de ebullición). El calor que gane, hace que se evapore al pasar por el evaporador; por lo general, el refrigerante sale del evaporador como un vapor saturado.

### **2.3. SISTEMA DE REFRIGERACIÓN CON INVERSIÓN DE DIRECCIÓN DEL FLUIDO REFRIGERANTE.**

#### **2.3.1. BOMBA DE CALOR.**

El término Bomba de Calor, se utiliza para describir el sistema de refrigeración que se emplea, tanto para el ENFRIAMIENTO como para la CALEFACCIÓN, Pita (1991). Dicha característica, es la que se adopta para el presente Proyecto de Investigación, puesto que la bomba de calor, posee la capacidad de efectuar tanto la calefacción como el enfriamiento, tiene la ventaja obvia de requerir un solo conjunto de equipos para ambas funciones, en lugar de dos (02) unidades separadas, tales como una caldera y una unidad de refrigeración. Esto reduce las necesidades de espacio y disminuye a menudo los costos iniciales totales.

La Bomba de calor, tiene la ventaja de que la cantidad de energía disponible para calentar, es mucho mayor que la cantidad de energía que se requiere para accionar el compresor.

Las Figuras 4 y 5, muestran la disposición del sistema, cuando se realiza el cambio de dirección de la circulación del flujo refrigerante.

Los serpentines se conocen como el serpentín interior y el serpentín exterior, refiriéndose a su posición.

Se utiliza una válvula de inversión de cuatro (04) vías, para cambiar la dirección del flujo del refrigerante a los serpentines. Esta válvula deriva su nombre, del hecho de tener cuatro (04) bocas. La válvula de inversión, estará constituida por un cilindro hueco con una corredera flotante interna, con aberturas.

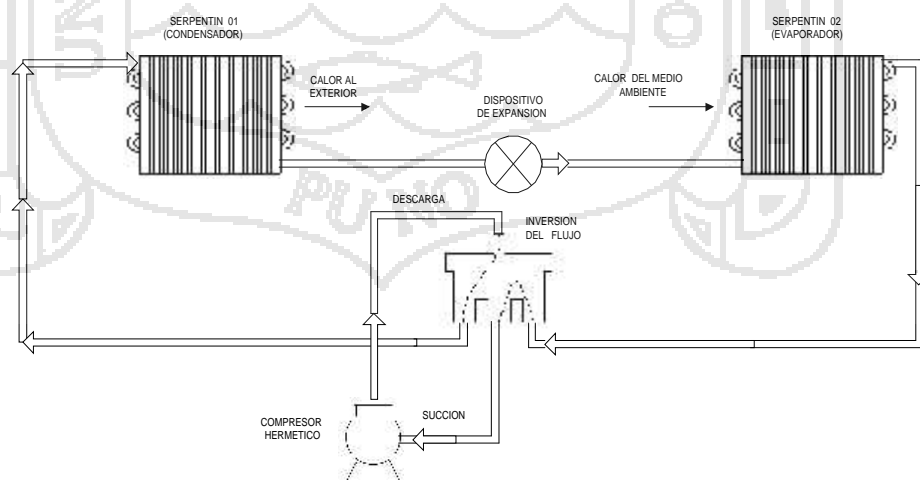
La unidad opera según el CICLO DE ENFRIAMIENTO, cuando la corredera de la válvula de inversión se encuentre en la posición mostrada en la Figura 4. La boca de descarga, está conectada al serpentín exterior; y, la boca de succión, está conectada al serpentín interior.

El gas de descarga fluye al serpentín exterior, el cual hace las veces de un condensador enfriado por aire.

El refrigerante líquido, fluye a través del dispositivo de expansión, hasta el serpentín interior (que sirve de evaporador). Enfriando al producto (yogurt fermentado).

El gas fluye luego, a través de la válvula de inversión, hasta la succión del compresor.

**FIGURA 4. CICLO DE ENFRIAMIENTO.**



FUENTE: PITA (1991).

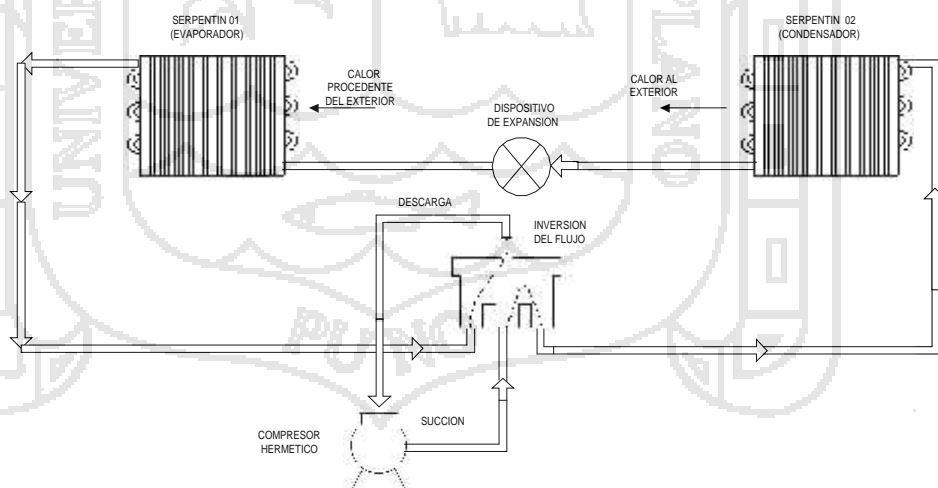
Por otro lado, la unidad opera según el CICLO DE CALEFACCIÓN, cuando la corredera de la válvula de inversión, se encuentre en la posición mostrada en la Figura 5.

El gas de descarga, fluye ahora al serpentín interior. El producto (leche + inoculo) que circula sobre el serpentín (interior), se calienta a medida que se condensa el gas caliente de descarga.

El refrigerante líquido, fluye desde el serpentín interior (que hace ahora de condensador), a través del dispositivo de expansión, hasta el serpentín exterior (en donde se evapora el refrigerante), absorbiendo calor del aire exterior. Esto tiene lugar, debido a que la temperatura del aire exterior, es más elevada que la temperatura del refrigerante.

El gas refrigerante, fluye luego a través de la válvula de inversión, hasta la succión del compresor. Observándose que el serpentín exterior, ahora hace las veces de evaporador.

**FIGURA 5. CICLO DE CALEFACCIÓN.**



FUENTE: PITA (1991).



### 2.3.2. TRANSFERENCIA DE CALOR EN LA REFRIGERACIÓN.

La transferencia de calor, constituye un proceso esencial en la refrigeración. El objetivo del evaporador, es transferir calor desde el medio que se desea enfriar. El objetivo del condensador, es transferir (remover) el calor adquirido en el sistema, a algún medio conveniente de enfriamiento, Pita (1991).

#### a. Formas de transferencia de calor.

El calor es definido como la forma de energía que fluye o se transfiere de un cuerpo a otro, como resultado de una diferencia de temperatura entre los mismos. La transferencia de calor, puede tener lugar en tres (03) formas distintas: Conducción; Convección; y, Radiación.

**La conducción**, es la forma de transferencia de calor a través de un cuerpo y que tiene lugar sin movimiento alguno de dicho cuerpo; es el resultado de una acción molecular. La conducción es muy común en la transferencia de calor a través de los sólidos. La transferencia de calor por conducción, puede también tener lugar a través de los líquidos y los gases; sin embargo, en los fluidos puede ocurrir una forma adicional de transferencia de calor, la cual se llama convección.

**La convección**, es la forma de transferencia de calor que resulta del movimiento total de los líquidos o los gases. Un ejemplo común de convección, es el del calentador de agua, que calienta el aire encerrado en una habitación.

El calor se transfiere de la superficie metálica al aire adyacente, aumentando su temperatura. Luego, este aire se mueve verticalmente hacia arriba, puesto que ahora es menos denso (más ligero) que el aire circundante más frío; de este modo, el aire se mueve continuamente por el espacio. Esta forma de convección, se llama convección natural.

El movimiento del fluido y por tanto la transferencia de calor, puede aumentarse utilizando un ventilador (en el caso de los gases), o una

bomba (en el caso de los líquidos). A este tipo de convección, se llama convección forzada.

**La radiación térmica**, es la forma de transferencia de calor que se efectúa entre dos (02) cuerpos separados, como resultado de un medio llamado radiación electromagnética. Como sucede con todas las formas de transferencia de calor, un cuerpo debe hallarse a una temperatura más alta que el otro. El calor se transfiere entre los dos (02) cuerpos, aún en el caso de existir un vacío entre ellos. Cuando un gas se encuentra presente entre los cuerpos, aún hay transferencia de calor; pero, por lo general, en una proporción menor. Como ejemplos comunes de radiación, se tienen el calor que recibe nuestro cuerpo cuando permanece en frente de un fuego, y el calor que se recibe del sol.

**b. Resistencia térmica.**

La resistencia térmica, es la propiedad de una sustancia que afecta la cantidad de calor transferida a través de la misma. Los materiales que tienen una elevada resistencia térmica, transmiten el calor en una proporción baja; estos materiales, son buenos aisladores. Por otro lado, los materiales cuyo valor de resistencia térmica es baja, son buenos conductores del calor.

**c. Conductancia y conductividad.**

La conductancia de un cuerpo, se define como el inverso de la resistencia térmica. La conductancia térmica de un material, puede considerarse como la capacidad de conducir el calor y tiene el significado opuesto de la resistencia térmica.

Es conveniente definir otro término más relacionado con los anteriores. La conductividad térmica ( $k$ ) de un cuerpo, es su conductancia por unidad de espesor. Las tablas, indican a menudo la conductividad de los materiales.

**d. Conductancia de una película de líquido o de gas.**

Cuando la transferencia de calor tiene lugar entre la superficie de un sólido y un fluido (líquido o gas), una delgada película del fluido adyacente a la superficie, tiene una resistencia y una conductancia como en el caso de un sólido. A la conductancia de los fluidos, se llama a menudo Coeficiente de Película; para designarlo, se utilizan los coeficientes  $h$  o  $f$ .

La transferencia de calor que tiene lugar entre el sólido y el fluido circundante, es generalmente una combinación de conducción y convección que ocurren al mismo tiempo. Un hecho que reviste en lo que respecta a las películas de los fluidos, es que la resistencia térmica de los líquidos, es mucho menor que la de los gases. Esto explica, porque un evaporador inundado, es superior a un evaporador de expansión del tipo expansión directa.

**2.4. MARCO CONCEPTUAL.****2.4.1. PRESIÓN ABSOLUTA y MANOMÉTRICA.**

Se entiende por presión absoluta, a la fuerza total ejercida por unidad de área que tiene un fluido; mientras que la presión manométrica, es la presión que se lee en el manómetro (instrumento de medición de presión). Es importante comprender que los manómetros están calibrados para leer cero (0), cuando la presión es igual a la atmosférica; y, que solamente miden la diferencia de presiones (entre la presión total que el fluido tiene dentro del depósito y la presión atmosférica), Dossat (1998).

**2.4.2. TEMPERATURA DE SATURACIÓN.**

La temperatura a la cual un fluido cambia de la fase líquida a la fase de vapor; o, a la inversa, cuando un fluido cambia de la fase de vapor a la fase líquida, se llama temperatura de saturación. Un líquido a la temperatura de saturación, se llama Líquido Saturado; y, un vapor a la temperatura de saturación, se llama Vapor Saturado.

Para una determinada presión, la temperatura de saturación, es la temperatura máxima que el líquido puede tener, y la temperatura mínima que el vapor puede tener, Dossat (1998).

#### **2.4.3. SOBRECALENTAMIENTO - CALOR SENSIBLE DEL VAPOR.**

Una vez que un líquido haya sido vaporizado, la temperatura del vapor resultante podrá aumentarse agregando más calor. El calor agregado al vapor después de la vaporización, es el calor sensible del vapor, más comúnmente conocido como sobrecalentamiento.

Cuando la temperatura de un vapor, es mayor que la temperatura de saturación, se dice que el vapor está sobrecalentado, y se le llama Vapor Sobrecalentado, Dossat (1998).

#### **2.4.4. ENTALPIA.**

Los cuerpos poseen además de energía química, energía adicional debido a su temperatura y presión. Se sabe que un gas que está a una presión elevada, tiene energía; y, que el agua que está a una alta temperatura, puede ceder energía calorífica. A esta energía almacenada por la temperatura y la presión, se le llama Entalpía. Es importante distinguir entre temperatura y entalpía. La temperatura es una medida del nivel térmico de un cuerpo, cuando se agrega calor a un cuerpo, se eleva su temperatura; pero, la entalpía total o contenido de calor de un cuerpo, depende de la masa del mismo, así como de su temperatura, Pita (1991).

#### **2.4.5. EFECTO DE REFRIGERACIÓN.**

Se conoce como efecto de refrigeración, al aumento de la entalpía del refrigerante en el evaporador.

Se le denomina efecto de refrigeración, debido a que representa asimismo, la cantidad de calor removido del medio que se debe enfriar, por cada libra o kilogramo de refrigerante que fluye, Pita (1991).

$$E.R. = h_4 - h_3$$

Ecuación (01)

**Donde:***E.R.* : Efecto refrigerante (*KJ/Kg*).*h*<sub>4</sub> : Entalpía del refrigerante a la salida del evaporador (*KJ/Kg*).*h*<sub>3</sub> : Entalpía del refrigerante a la entrada del evaporador (*KJ/Kg*).**2.4.6. FLUJO MÁSSICO DE REFRIGERANTE.**

El flujo másico que circula a través de un sistema, con el fin de producir una capacidad dada de refrigeración. Se puede hallar, como se indica a continuación, Pita (1991).

$$m = \frac{Q}{E.R.}$$

Ecuación (02)

**Donde:***m* : Flujo másico de refrigerante (*Kg/s*).*Q* : Capacidad de refrigeración del sistema (*KJ/s*).*E.R.* : Efecto refrigerante (*KJ/Kg*).**2.4.7. CALOR DE COMPRESIÓN y TRABAJO DE COMPRESIÓN.**

Cuando se comprime el refrigerante, aumenta su presión, temperatura y entalpía, Pita (1991).

El calor de compresión (*C.C.*), se define como el aumento de la entalpía del refrigerante, como resultado de la compresión.

El trabajo de compresión, es igual al calor de compresión.

$$W = C.C. = h_1 - h_4$$

Ecuación (03)

**Donde:**

$W$  : Trabajo de compresión ( $KJ/Kg$ ).

$h_1$  : Entalpía del refrigerante a la salida del compresor ( $KJ/Kg$ ).

$h_4$  : Entalpía del refrigerante a la entrada del compresor ( $KJ/Kg$ ).

**2.4.8. POTENCIA TEÓRICA REQUERIDA POR EL COMPRESOR.**

Generalmente, conviene más determinar la cantidad de potencia necesaria para accionar el compresor, Pita (1991).

Esta potencia, se puede hallar a partir del trabajo de compresión y del flujo másico, utilizando la siguiente Ecuación:

$$P = (W)(m) \quad \text{Ecuación (04)}$$

**Donde:**

$P$  : Potencia teórica requerida por el compresor ( $KW$ ).

$m$  : Flujo másico de refrigerante ( $Kg/s$ ).

**2.4.9. CALOR DE RECHAZO (C.R.).**

El calor de rechazo, se define como la cantidad de calor removido por libra de refrigerante en el condensador, Pita (1991).

El calor de rechazo, puede determinarse utilizando la siguiente Ecuación:

$$C.R. = h_1 - h_2 \quad \text{Ecuación (05)}$$

**Donde:**

$C.R.$  : Calor de rechazo ( $KJ/Kg$ ).

$h_1$  : Entalpía del refrigerante a la entrada del condensador ( $KJ/Kg$ ).

$h_2$  : Entalpía del refrigerante a la salida del condensador ( $KJ/Kg$ ).

## 2.5. MARCO REFERENCIAL.

En el presente Acápite, se describe el funcionamiento del sistema de refrigeración del presente Proyecto, cuando este es empleado para enfriamiento y luego para calefacción. Analizando el comportamiento del gas refrigerante, durante los diferentes cambios que este sufre. Además, aprovecharemos de la condición del refrigerante, de que en cualquier estado termodinámico, puede quedar representado por un punto en los diferentes diagramas que se utilizarán, Pita (1991) y Dossat (1998).

Cabe recalcar que solo se describirá el funcionamiento del sistema, mas no así, los límites de operación (presiones y temperaturas) a las que trabajará el sistema de refrigeración; puesto que, previamente se deberá de diseñar el ciclo termodinámico.

El sistema de refrigeración adoptado para el presente trabajo de Tesis, tiene la ventaja obvia de requerir un solo conjunto de equipos para ambas funciones (calefacción y enfriamiento); puesto que, los serpentines (intercambiadores de calor) que se utilizan como condensador y evaporador, invierten sus funciones. Para cambiar del ciclo de enfriamiento al de calefacción, se utiliza el método de cambio en la dirección del flujo refrigerante; para tal fin, se utiliza cuatro (04) válvulas mecánicas de paso (S10, S11, S12 y S13). Las cuales, adoptan posiciones de apertura y cierre, según el ciclo que se desee trabajar (Figuras 6 y 9).

### 2.5.1. FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN COMO MAQUINA DE ENFRIAMIENTO.

Para que el sistema opere como una máquina de enfriamiento, primeramente se deberá de conocer el circuito por donde circulará el refrigerante; para luego, establecer dicho circuito mediante el accionamiento manual de las válvulas de paso, Pita (1991) y Dossat (1998).

En la Figura 6, se establece el recorrido que deberá de realizar el refrigerante; asimismo, se indica el estado de las válvulas (abiertas o cerradas), para que el sistema opere como una máquina de enfriamiento. Se deberá de tener en cuenta la disposición de los componentes y equipos principales del sistema. Puesto que, en esta oportunidad el Serpentín N° 1, trabajará como condensador; y, el Serpentín N° 2, como evaporador.

En la Figura 7, Se muestra el diagrama Presión - Entalpía, del sistema de refrigeración (operando como máquina de enfriamiento); el cual, nos servirá para explicar los procesos y cambios físicos que ocurren en el sistema de refrigeración.

- **PROCESO (4' - 1').**

**TRABAJO: MOTOR COMPRESOR.**

En el Punto 4', el compresor admite el ingreso del vapor sobrecalentado por el lado de succión del sistema, a través de la Válvula S13; para luego, comprimirlo hasta el Punto 1', y expulsarlo a través de la Válvula S10, en donde la presión será la adecuada para efectuar la condensación.

En el Punto 1', el vapor está considerablemente sobrecalentado, puesto que hubo ganancia de calor; y, la entalpía del refrigerante, pasó de una inferior a otra superior.

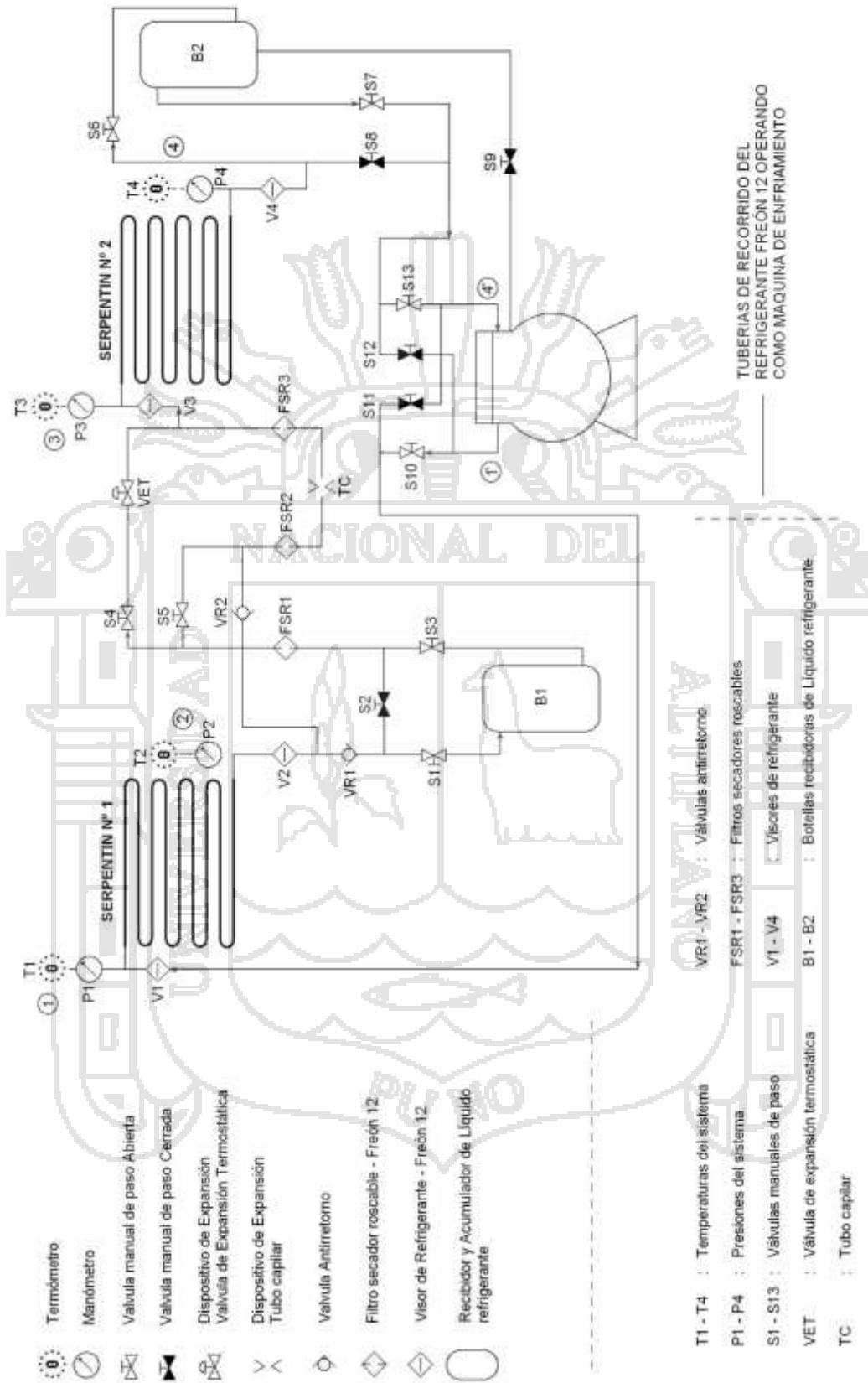
- **PROCESO (1' - 1).**

**CONDUCCIÓN: LÍNEA DE DESCARGA.**

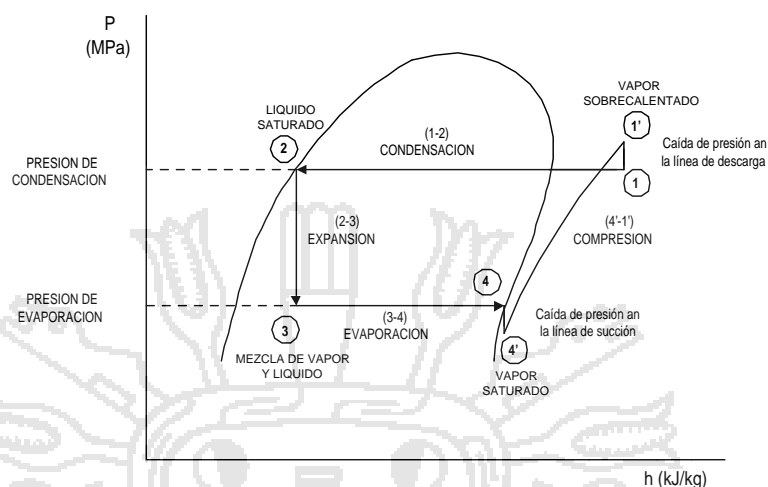
En el Punto 1', el compresor descarga vapor a alta presión y temperatura (sobrecalentado); el cual, será conducido desde la expulsión del compresor, a través de la Válvula S10, hasta la entrada al Serpentín N° 1 (condensador).



**FIGURA 6. DISPOSICIÓN DE EQUIPOS y ACCESORIOS DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN y AIRE ACONDICIONADO OPERANDO COMO MAQUINA DE ENFRIAMIENTO.**



**FIGURA 7. CICLO TERMODINÁMICO REAL DE REFRIGERACIÓN POR COMPRESIÓN DE VAPOR EN EL DIAGRAMA  $P - h$ , CUANDO EL SISTEMA OPERA COMO MAQUINA DE ENFRIAMIENTO.**



FUENTE: PITA (1991).

En el Punto 1, el fluido refrigerante se encontrará en estado de vapor a una presión y temperatura inferior a la del Punto 1'; este efecto, es consecuencia de la caída de presión en la tubería de expulsión y transferencia de calor al exterior por la tubería, respectivamente.

El estado de vapor sobrecalentado del refrigerante en el Punto 1, podrá ser observado en el Visor V1 del sistema.

- **PROCESO (1 - 2).**

**CONDENSACIÓN: SERPENTÍN Nº 1.**

El fluido refrigerante que se encuentra como vapor sobrecalentado en el Punto 1, fluye a través de la tubería del Serpentín Nº 1 (condensador), hasta el Punto 2; donde, el refrigerante se encontrará como líquido saturado, producto del enfriamiento ocasionado por la circulación del aire (por los tubos y aletas del Serpentín Nº 1), proveniente del Ventilador Nº 1.

El estado de líquido saturado del refrigerante en el Punto 2, podrá ser observado en el Visor V2 del sistema.

- **PROCESO (2 - 3).**

### **EXPANSIÓN: DISPOSITIVO DE EXPANSIÓN.**

Este proceso, está relacionado con el funcionamiento del dispositivo de expansión (válvula de expansión termostática o tubo capilar).

El fluido refrigerante que se encuentra como líquido saturado en el Punto 2, ingresa al recipiente de líquido B1, a través de la Válvula S1. Con la finalidad de almacenar el refrigerante líquido y evitar que el evaporador se prive del refrigerante líquido por fluctuaciones en la carga de refrigeración; para luego, ser conducido a la entrada del dispositivo de expansión, a través de la Válvula S3, pudiendo elegirse el dispositivo de expansión (válvula de expansión termostática o tubo capilar) con el que se desea trabajar, a través de las válvulas S4 y S5. Dándose a través del dispositivo de expansión, una gran caída de presión.

En el Punto 3, el fluido refrigerante se encontrará a una presión y temperatura inferior a la del Punto 2. Estará conformado por una mezcla de vapor y líquido; una parte de gas refrigerante líquido, se evapora para enfriar el porcentaje de líquido restante, hasta la temperatura de evaporación.

No hay intercambio de calor significativo en este proceso; por lo tanto, consideramos que la entalpía permanece constante.

El estado de mezcla vapor y líquido del refrigerante en el Punto 3, podrá ser observado en el Visor V3 del sistema.

- **PROCESO (3 - 4).**

**EVAPORACIÓN: SERPENTÍN Nº 2.**

El fluido refrigerante que se encuentra como mezcla de vapor y líquido en el Punto 3, fluye a través de la tubería del Serpentin Nº 2 (evaporador), hasta el Punto 4; donde, el refrigerante se encontrará como vapor sobrecalentado, producto del calentamiento ocasionado por la circulación del aire (por los tubos y aletas del Serpentin Nº 2), proveniente del Ventilador Nº 2.

El estado de vapor saturado del refrigerante en el Punto 4, podrá ser observado en el Visor V4 del sistema.

- **PROCESO (4 - 4').**

**CONDUCCIÓN: LÍNEA DE SUCCIÓN.**

En el Punto 4, el fluido refrigerante se encontrará en estado de vapor sobrecalentado, el cual será conducido hacia el acumulador de líquido B2, a través de la válvula S6. Con la finalidad de evitar el escurrimiento de líquido al compresor; para luego, ser conducido hasta la entrada de succión del compresor, a través de las válvulas S7 y S13.

En el Punto 4', el fluido refrigerante se encontrará en estado de vapor a una presión y temperatura inferior al Punto 4. Este efecto, es consecuencia de la caída de presión en la tubería de succión y transferencia de calor al exterior por la tubería, respectivamente.

**2.5.2. FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN COMO MAQUINA DE CALEFACCIÓN.**

Para que el sistema opere como una máquina de calefacción, primeramente se deberá de conocer el circuito por donde circulará el refrigerante; para luego, establecer dicho circuito mediante el accionamiento manual de las válvulas de paso.

En la Figura 8, se establece el recorrido que deberá de realizar el refrigerante; asimismo, se indica el estado de las válvulas (abiertas o cerradas) para que el sistema opere como una máquina de calefacción.

Se deberá de tener en cuenta, la disposición de los componentes y equipos principales del sistema. Puesto que, en esta oportunidad el Serpentín N° 2, trabajará como condensador; y, el Serpentín N° 1, como evaporador.

En la Figura 9, se muestra el diagrama Presión - Entalpía, del sistema de refrigeración (operando como máquina de calefacción); el cual, nos servirá para explicar los procesos y cambios físicos que ocurren en el sistema de refrigeración.

Cabe mencionar, que para este caso, las botellas (recibidor y acumulador de líquido) no serán conectadas al sistema.

La Botella B2, no podrá ser conectada a la línea de succión; puesto que, en la línea de descarga, las pérdidas de calor deberán ser mínimas para asegurar que el funcionamiento del sistema sea eficiente.

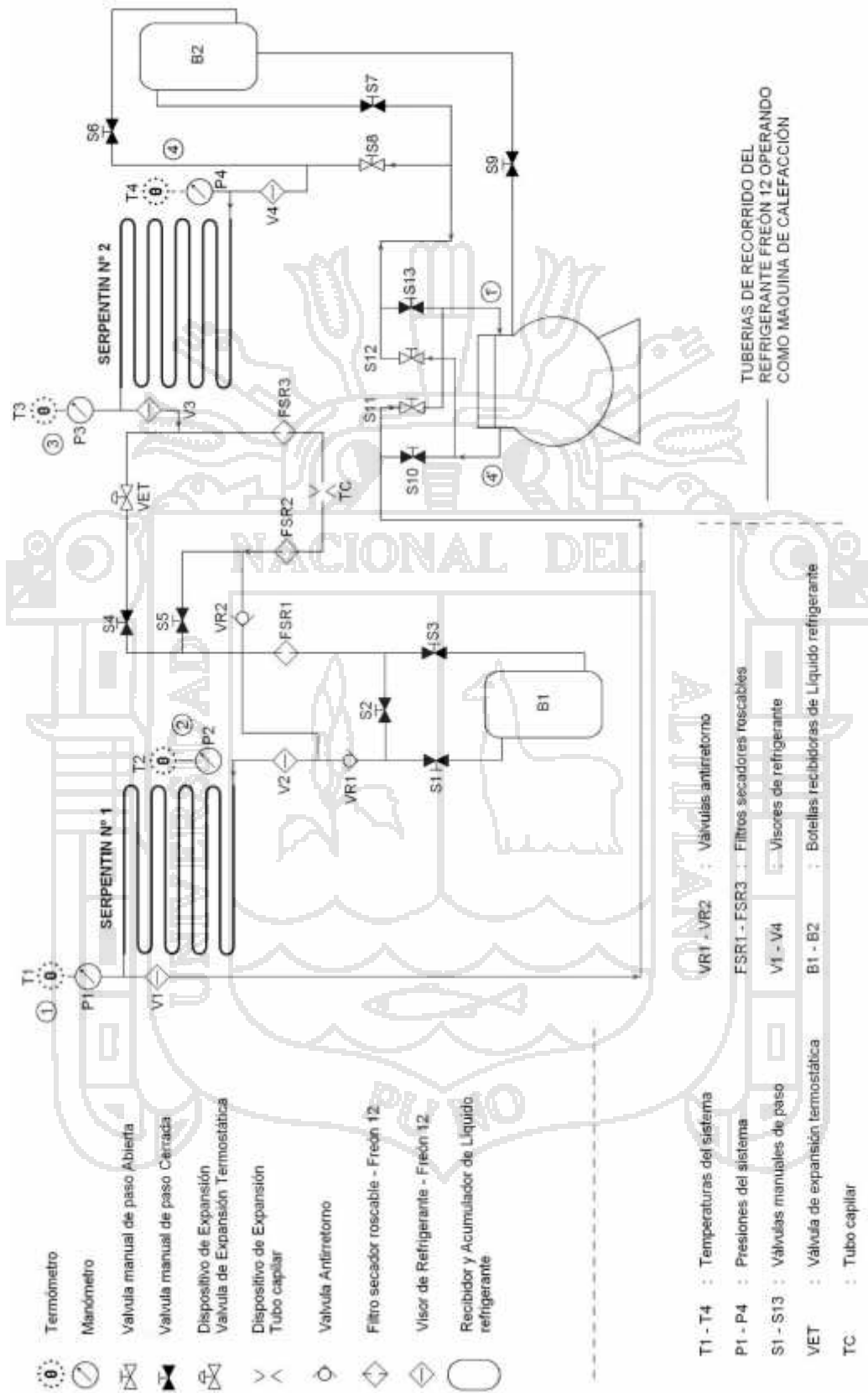
La Botella B1, no será conectada; por el simple hecho, de que en este punto, el refrigerante se encontrará en el estado de mezcla de vapor y líquido; por lo que, conectarla sería un error grave. Ya que, se estaría privando de refrigerante al evaporador; por tanto, se produciría una evaporación anticipada en la botella.

- **PROCESO (1' - 4').**

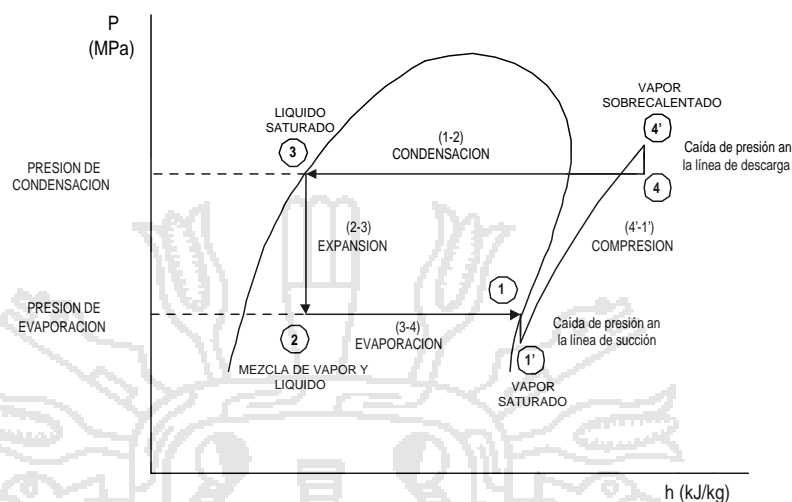
#### **TRABAJO: MOTOR COMPRESOR.**

En el Punto 1', el compresor admite el ingreso del vapor sobrecalentado por el lado de succión del sistema, a través de la Válvula S11; para luego, comprimirlo hasta el punto 4', y expulsarlo a través de la Válvula S12, en donde la presión será la adecuada para efectuar la condensación.

**FIGURA 8. DISPOSICIÓN DE EQUIPOS y ACCESORIOS DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN y AIRE ACONDICIONADO OPERANDO COMO MAQUINA DE CALEFACCIÓN.**



**FIGURA 9. CICLO TERMODINÁMICO REAL DE REFRIGERACIÓN POR COMPRESIÓN DE VAPOR EN EL DIAGRAMA  $P-h$ , CUANDO EL SISTEMA OPERA COMO MAQUINA DE CALEFACCIÓN.**



FUENTE: PITA (1991).

En el Punto 4', el vapor está considerablemente sobrecalentado, puesto que hubo ganancia de calor; y, la entalpía del refrigerante pasó de una inferior a otra superior.

- **PROCESO (4' - 4).**

**CONDUCCIÓN: LÍNEA DE DESCARGA.**

En el Punto 4', el compresor descarga vapor a alta presión y temperatura (sobrecalentado); el cual, será conducido desde la expulsión del compresor, a través de la Válvula S8, hasta la entrada al Serpentín N° 2 (condensador).

En el Punto 4, el fluido refrigerante se encontrará en estado de vapor a una presión y temperatura inferior a la del Punto 4'. Este efecto, es consecuencia de la caída de presión en la tubería de expulsión y transferencia de calor al exterior por la tubería, respectivamente.

El estado de vapor sobrecalentado del refrigerante en el Punto 4, podrá ser observado en el Visor V4 del sistema.

- **PROCESO (4 - 3).**

**CONDENSACIÓN: SERPENTÍN Nº 2.**

El fluido refrigerante que se encuentra como vapor sobrecalentado en el Punto 4, fluye a través de la tubería del Serpentín Nº 2 (condensador), hasta el Punto 3; donde, el refrigerante se encontrará como líquido saturado, producto del enfriamiento ocasionado por la circulación del aire (por los tubos y aletas del Serpentín Nº 2), proveniente del Ventilador Nº 2.

El estado de líquido saturado del refrigerante en el Punto 3, podrá ser observado en el Visor V3 del sistema.

- **PROCESO (3 - 2).**

**EXPANSIÓN: DISPOSITIVO DE EXPANSIÓN.**

Este proceso está relacionado con el funcionamiento del dispositivo de expansión (tubo capilar).

El fluido refrigerante que se encuentra como líquido saturado en el Punto 3, ingresa al tubo capilar a través del Filtro FSR3, para que posteriormente sea conducido al Serpentín Nº 1, por intermedio de la Válvula Antiretorno VR2. Cabe mencionar, que para este caso, solo se podrá trabajar con el tubo capilar; puesto que, la válvula de expansión termostática, trabaja en un solo sentido; produciéndose de esta manera, una gran caída de presión. Y, el trabajar sólo con tubo capilar, no necesitará del recibidor de líquido.

En el Punto 2, el fluido refrigerante se encontrará a una presión y temperatura inferior a la del Punto 3. Estará conformado por una mezcla de vapor y líquido; una parte de gas refrigerante líquido, se evapora para enfriar el porcentaje de líquido restante, hasta la temperatura de evaporación.



No hay intercambio de calor significativo en este proceso; por lo tanto, consideramos que la entalpía permanece constante.

El estado de mezcla vapor y líquido del refrigerante en el Punto 2, podrá ser observado en el Visor V2 del sistema.

- **PROCESO (2 - 1).**

**EVAPORACIÓN: SERPENTÍN N° 1.**

El fluido refrigerante que se encuentra como mezcla de vapor y líquido en el Punto 2, fluye a través de la tubería del Serpentín N° 1 (evaporador), hasta el Punto 1; donde, el refrigerante se encontrará como vapor sobrecalentado, producto del calentamiento ocasionado por la circulación del aire (por los tubos y aletas del Serpentín N° 1), proveniente del ventilador N° 1.

El estado de vapor sobrecalentado del refrigerante en el Punto 1, podrá ser observado en el Visor V1 del sistema.

- **PROCESO (1 -1').**

**CONDUCCIÓN: LÍNEA DE SUCCIÓN.**

En el Punto 1, el fluido refrigerante se encontrará en estado de vapor saturado, el cual será conducido hasta la entrada de succión del compresor.

En el Punto 1', el fluido refrigerante se encontrará en estado de vapor a una presión y temperatura inferior al Punto 1. Este efecto, es consecuencia de la caída de presión en la tubería de succión y transferencia de calor al exterior por la tubería, respectivamente.

## 2.6. AGITACIÓN y MEZCLADO DE FLUIDO y NECESIDADES DE POTENCIA.

En las industrias químicas de procesos y en otras semejantes, muchas operaciones dependen en alto grado de la agitación y mezclado eficaz de los fluidos. Por lo general, la agitación se refiere a forzar un fluido por medios mecánicos para que adquiera un movimiento circulatorio en el interior de un recipiente. El mezclado, implica partir de dos (02) fases individuales, tales como: Un fluido y un sólido pulverizado; o, Dos fluidos. Y, lograr que ambas fases se distribuyan al azar entre sí, Geankoplis (1998).

Lo más conveniente en un tanque multiuso para la producción de yogurt a mediana escala, es tener un solo agitador. Cuya forma permita que se pueda utilizar en las diferentes fases de la producción, acoplando un motor de dos (02) velocidades directamente en la tapa del tanque. Ya que, debido a la naturaleza del proceso, en las etapas en las que se necesita agitación, no debe existir ninguna fuente de contaminación; no se puede dejar la mezcla expuesta al ambiente mientras se agita, ni abrir el tanque para cambiar de agitador, Robinson (1991).

La velocidad más rápida (35 - 40 *rpm*), es para emplearse en la preparación de la mezcla base, durante el tratamiento térmico y en el primer enfriamiento. La velocidad lenta (17 - 20 *rpm*), se utiliza para la suave agitación que necesitan la inoculación del cultivo bacteriano, el batido del coágulo, así como el segundo enfriamiento y la incorporación de los aromas y sabores, Robinson (1991).

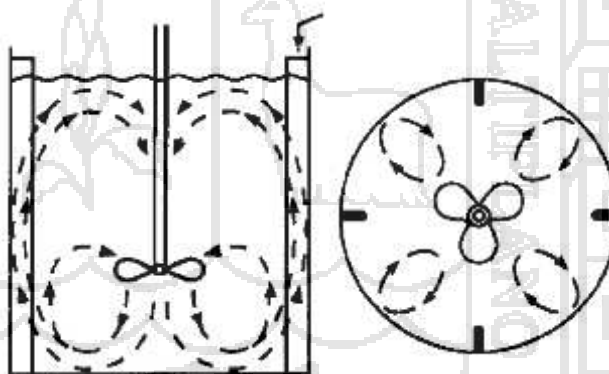
### 2.6.1. EQUIPO PARA AGITACIÓN.

Generalmente, los líquidos se agitan en un recipiente cilíndrico, que puede estar cerrado o abierto. La altura del líquido, debe equivaler en forma aproximada al diámetro del tanque. Un motor eléctrico, impulsa al propulsor agitador que está montado en un eje. En la Figura 10, se muestra un sistema de agitación típico.

**a. Agitador propulsor de tres aspas.**

Existen varios tipos de agitadores de uso común. Uno de los más conocidos, es el agitador de tres (03) aspas de tipo marino, similar a la hélice de un motor fuera de borda para lanchas. El agitador puede ser móvil, para introducirlo lateralmente en el tanque; o, estar montado en la pared de un tanque abierto, en posición desplazada del centro. Estos agitadores giran a velocidades de 400 a 1,750 *rpm* (revoluciones por minuto); y, son propios para líquidos de baja viscosidad. En la Figura 10, se muestra el patrón de flujo en un tanque con deflectores, con un propulsor colocado en el centro del tanque. Este tipo de patrón de flujo, se llama flujo axial; ya que, el fluido fluye axialmente hacia abajo en el eje central o eje de la hélice y hacia arriba a los lados del tanque. Como se muestra en la citada Figura, Geankoplis (1998).

**FIGURA 10. TANQUE CON DEFLECTORES y AGITADOR DE TURBINA DE PALETAS PLANAS CON PATRÓN DE FLUJO AXIAL.**



FUENTE: GEANKOPLIS (1998).

**b. Agitadores de paletas.**

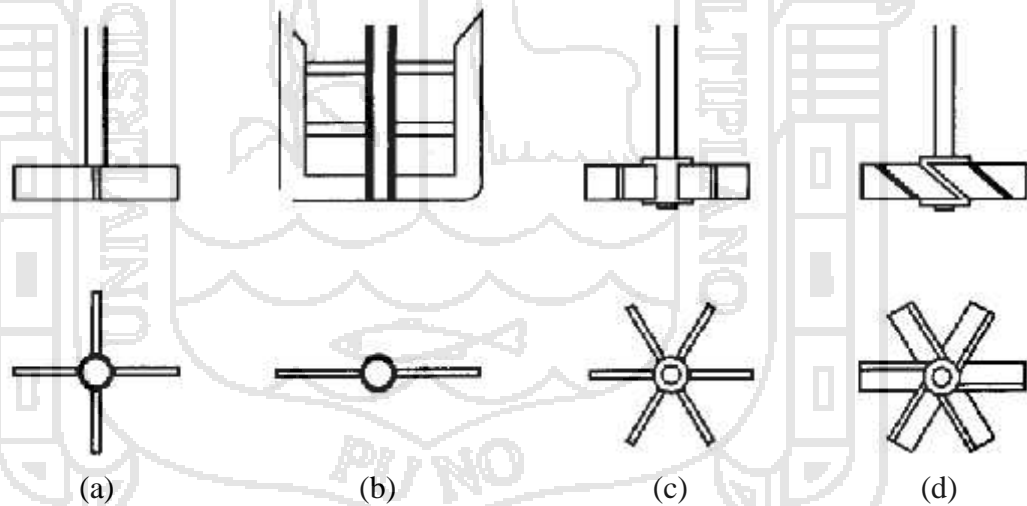
Para velocidades de 20 a 200 *rpm*, se emplean diversos tipos de agitadores de paletas. Tal como lo muestra la Figura 11a, donde se aprecian sistemas de dos (02) a cuatro (04) paletas planas.

La longitud total del propulsor de paletas, mide del 60 al 80% del diámetro del tanque; y, la anchura de la paleta, es de 1/6 a 1/10 de su

longitud. A bajas velocidades, se consigue una agitación suave en un recipiente sin deflectores. A velocidades más altas, se usan deflectores; porque, sin ellos, el líquido simplemente hace remolinos y en realidad casi no se mezcla. El agitador de paletas, no es efectivo para sólidos en suspensión; porque, aunque hay un buen flujo radial, hay poco flujo axial o vertical.

Se suele usar una paleta de ancla o compuerta (Figura 11b), la cual barre o raspa las paredes del tanque y a veces su fondo. Se emplea con líquidos viscosos que pueden generar depósitos en las paredes y para mejorar la transferencia de calor hacia las mismas, pero, no es buen mezclador. Se suele usar para procesar pastas de almidón, pinturas, adhesivos y cosméticos, Geankoplis (1998).

**FIGURA 11. VARIOS TIPOS DE AGITADORES: a) PALETA DE CUATRO ASPAS; b) PALETA DE COMPUERTA O ANCLA; c) TURBINA ABIERTA DE SEIS ASPAS; y, d) TURBINA DE ASPA INCLINADA (45°).**



FUENTE: GEANKOPLIS (1998).

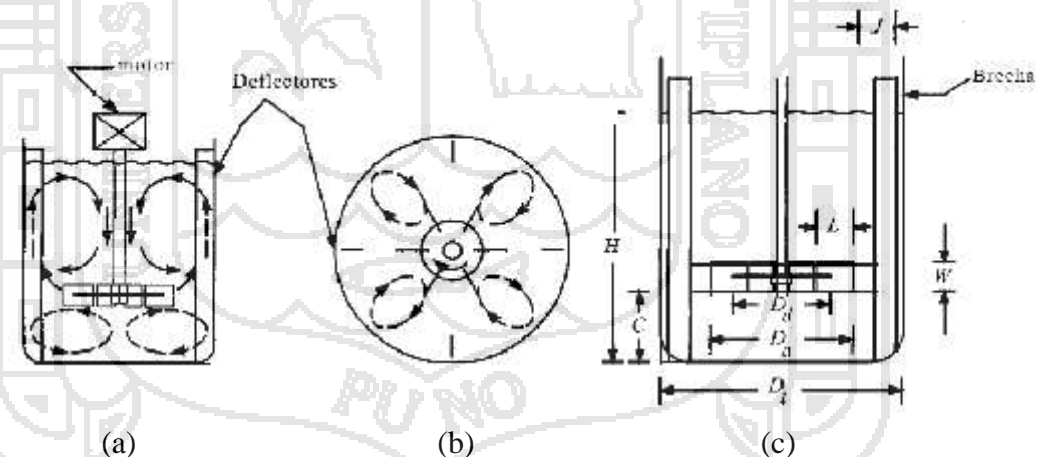
### c. Agitadores de turbina.

Cuando se procesan líquidos con amplia diversidad de viscosidades, se usan turbinas semejantes a un agitador de paletas múltiples con aspas más cortas. El diámetro de una turbina, suele medir del 30 al

50% del diámetro del tanque. Normalmente, las turbinas tienen cuatro (04) o seis (06) aspas. En la figura 12, se muestra un agitador de turbina de seis (06) aspas, con disco; asimismo, en la Figura 11c, se ilustra una turbina plana abierta de seis (06) aspas.

Las turbinas con aspas planas, producen un flujo radial (como se muestra en la Figura 12). Para dispersar un gas en un líquido, el gas puede hacerse penetrar justo por debajo del propulsor de la turbina en su eje; de esa manera, las paletas dispersan el gas en muchas burbujas finas. Con la turbina de hojas inclinadas (Figura 11d), con las aspas a  $45^\circ$  de inclinación, se imparte cierto flujo axial; de modo que, hay una combinación de flujos radial y axial. Este tipo de turbina, es útil para sólidos en suspensión; ya que, las corrientes fluyen hacia abajo y luego levantan los sólidos depositados, Geankoplis (1998).

**FIGURA 12. TANQUE CON DEFLECTORES CON UN AGITADOR DE TURBINA DE SEIS ASPAS CON DISCO, QUE MUESTRAN PATRONES DE FLUJO: a) VISTA LATERAL; b) VISTA SUPERIOR; y, c) DIMENSIONES DE TURBINA y TANQUE.**



FUENTE: GEANKOPLIS (1998).

#### d. Agitadores de banda helicoidal.

Este tipo de agitadores, se usa para soluciones sumamente viscosas y opera a pocas *rpm*, en la región laminar. La banda se forma en una trayectoria helicoidal y está unida a un eje central. El líquido se mueve

en una trayectoria de flujo tortuosa (hacia abajo en el centro; y, hacia arriba a los lados), con movimiento de giro, Otros tipos semejantes, son el de banda helicoidal doble y el de banda helicoidal con tornillo, Geankoplis (1998).

### **2.6.2. SELECCIÓN DE AGITADOR E INTERVALOS DE VISCOSIDAD.**

La viscosidad del fluido, es uno de los diferentes factores que influyen en la selección del tipo de agitador. En seguida, se dan algunas indicaciones de los intervalos de viscosidad de esos agitadores. Los propulsores, se usan para viscosidades del fluido inferiores a 3 *Pa.s* (3000 *cp*); las turbinas, pueden usarse por debajo de unos 100 *Pa.s* (100,000 *cp*); las paletas modificadas, como los agitadores tipo ancla, se pueden usar desde más de 50 *Pa.s*, hasta unos 500 *Pa.s* (500,000 *cp*); los agitadores helicoidales y de tipo banda, se suelen usar desde arriba de este intervalo, hasta cerca de 1,000 *Pa.s*. Y, se han utilizado, hasta para más de 25,000 *Pa.s*.

Para viscosidades mayores de unos 2.5 a 5 *Pa.s* (5,000 *cp*) o más, los deflectores no se necesitan, porque hay poca turbulencia, Geankoplis (1998).

### **2.6.3. TRAYECTORIA DEL FLUJO EN LA AGITACIÓN.**

La trayectoria del flujo en un tanque de agitación, depende de las propiedades del fluido, de la geometría del tanque, del tipo de deflectores y del propio agitador. Si el propulsor u otro agitador, va montado verticalmente en el centro del tanque sin deflectores, casi siempre se desarrolla una trayectoria de flujo tipo remolino. Esto suele ser indeseable, debido a que se atrapa aire, se desarrolla un vórtice considerable y ocurren oleadas y otros efectos perjudiciales, en especial cuando se opera a velocidades altas. Para evitar esto, puede usarse una posición angular desplazada del centro, cuando se trata de propulsores de baja potencia. Sin embargo, para agitación vigorosa a potencias altas, las fuerzas no equilibradas pueden ser severas y limitar el uso de esas potencias, Geankoplis (1998).

En un sistema de agitación, el gasto volumétrico del fluido que mueve el impulsor (esto es, la velocidad de circulación), es un factor muy importante para asegurarse de agitar la totalidad del volumen del mezclador en tiempo razonable. Además, la turbulencia en la corriente de agitación, es decisiva para el mezclado; puesto que, arrastra al material hacia la corriente. Algunos sistemas de agitación, requieren una alta turbulencia con velocidades de circulación bajas; otros, se basan en turbulencias bajas con altas velocidades de circulación. Esto casi siempre depende de los tipos de fluidos que se mezclan y del grado de mezclado que se solicite, Geankoplis (1998).

#### **2.6.4. DISEÑO NORMAL TÍPICO DE UNA TURBINA.**

El agitador de turbina que se muestra en la Figura 12, es el agitador más usado en las industrias de proceso. Para diseñar un sistema de agitación ordinario, generalmente se usa este tipo de agitador en el diseño inicial. En algunos casos, para las correlaciones del agitador,  $W/D = 1/8$ . El número de deflectores en la mayoría de los usos, es cuatro (04). El claro o brecha entre los deflectores y la pared, suele ser de 0.10 a 0.15 J, para asegurar que el líquido no forme bolsas estancadas cerca de esa zona. En pocas correlaciones, la relación entre el deflector y el diámetro del tanque, es  $J/D = 1/10$ , en lugar de  $1/12$ , Geankoplis (1998).

#### **2.6.5. POTENCIA CONSUMIDA EN LOS RECIPIENTES DE AGITACIÓN.**

Un factor trascendental en el diseño de un recipiente de agitación, es la potencia necesaria para mover el impulsor; puesto que, la potencia requerida para un sistema dado, no puede predecirse teóricamente. Se tienen correlaciones empíricas para estimar los requerimientos de potencia. La presencia o ausencia de turbulencia, puede correlacionarse con el número de Reynolds del impulsor  $N'_{Re}$ , que se define como:

$$N'_{Re} = \frac{D_a^2 N \dots}{\mu}$$

Ecuación (06)

Donde:  $D_a$ , es el diámetro del impulsor (agitador) en  $m$ ;  $N$ , es la velocidad de rotación en  $rev/s$ ;  $\rho$ , la densidad del fluido en  $kg/m^3$ ;  $\mu$ , es la viscosidad en  $kg/m.s$ . El flujo es laminar en el tanque, cuando  $N'_{Re} < 10$ ; turbulento, cuando  $N'_{Re} > 10,000$ ; y, para un intervalo de 10 a 10,000, el flujo es de transición, mostrándose turbulento en el impulsor y laminar en la partes más recónditas del recipiente, Geankoplis (1998).

El consumo de potencia, se relaciona con la densidad del fluido ( $\rho$ ), su viscosidad ( $\mu$ ), la velocidad de rotación ( $N$ ), el diámetro del impulsor ( $D_a$ ), por medio de gráficas del número de potencia ( $N_p$ ) en función de  $N'_{Re}$ . El número de potencia es:

$$N_p = \frac{P}{\rho N^3 D_a^5} \quad (\text{Unidades del sistema internacional}) \quad \text{Ecuación (07)}$$

$$N_p = \frac{P g_c}{\rho N^3 D_a^5} \quad (\text{Unidades del sistema ingles}) \quad \text{Ecuación (08)}$$

Donde,  $P$  = potencia en  $J/s$  o  $W$ . En unidades del sistema inglés,  $P = pie.lbf/s$ .

## 2.7. VISCOSIDAD.

Las propiedades reológicas de los alimentos, son importantes para diseñar el proceso del fluido, control de calidad, almacenamiento, procesamiento y predecir la textura del alimento. La textura que se da durante la coagulación del yogurt, es una característica importante que determina la aceptabilidad del producto, Shaker *et al.* (2000).

Los fluidos de alta viscosidad, presentan mayor resistencia para fluir; mientras, que los fluidos de baja viscosidad, fluyen con mayor facilidad. La fuerza con la que una capa de fluido en movimiento arrastra consigo



a las capas adyacentes de fluido, determina su viscosidad. La determinación de la viscosidad de un fluido, se lleva a cabo mediante un equipo llamado viscosímetro, Toledo (1994).

La viscosidad de un fluido, es afectada por su temperatura. Es por eso, que a mayor temperatura, disminuye la viscosidad de los líquidos. Los líquidos, típicamente se consideran como fluidos incompresibles, lo que significa que tienen un volumen constante, aún al ser sometidos a compresión, Toledo (1994).

En términos generales, el comportamiento de la viscosidad, se clasifica en dos (02) grandes grupos: “Newtoniano” y “No-Newtoniano”. La clasificación de un producto en estas categorías, depende del valor del “Índice de Flujo” ( $n$ ), en el modelo conocido como “Power Law”.

$$\tau = K\dot{\gamma}^n$$

Ecuación (09)

En este modelo, cuando  $n = 1$ , el fluido se conoce como Newtoniano; de lo contrario, el fluido es No-Newtoniano. Dentro de esta última categoría, se pueden diferenciar dos (02) casos. Si  $n < 1$ , se conoce como un Fluido Pseudoplástico. Si, por el contrario,  $n > 1$ , se conoce como un Fluido Dilatante. El índice de flujo, da una idea de cómo se comporta el fluido al ser sometido a movimiento; es decir, si se va a mostrar más espeso o menos espeso con el aumento en la velocidad de flujo.

El modelo “Power Law”, también requiere la determinación del llamado “Índice de Consistencia” ( $K$ ), para establecer la relación de viscosidad para un fluido en particular. Este índice, ofrece una idea de cuán espeso es el producto cuando está en reposo.

En los fluidos Pseudoplásticos ( $n < 1$ ), la viscosidad aparente no es constante, y varía con las velocidades de corte o con los gradientes de velocidad en el recipiente, Geankoplis (1998).

En este caso, para determinar la viscosidad aparente, se plantea el uso la siguiente Ecuación:

$$\mu_a = (11N)^{n-1} \times K \quad \text{Ecuación (10)}$$

Donde:  $\mu_a$ , es la viscosidad aparente en *cp*;  $N$ , es la velocidad de corte en *rps*;  $n$ , es el índice de flujo; y,  $K$ , es el índice de consistencia.

Los materiales pueden ser clasificados reológicamente, de acuerdo con su comportamiento ante el esfuerzo y la deformación, en sólidos, líquidos y viscoelásticos. Comportamientos de fluido sólido y viscoelástico, se observan en los productos lácteos. La leche y leche evaporada, se comportan como fluidos newtonianos; pero, la leche condensada se comporta como un fluido no-newtoniano, al igual que la crema y el yogurt. Esta clasificación se realiza dependiendo de la relación entre el esfuerzo cortante y la rapidez de deformación cortante, Vélez (2003).

Geles de suero y algunos tipos de queso, han sido caracterizados como sólidos de comportamiento elástico. Algunos otros productos como la crema batida, el yogurt, helado y queso; han sido considerados con una naturaleza viscoelástica, Vélez y Barbosa (1997).

### III. MATERIALES y MÉTODOS.

#### 3.1. ÁMBITO DE ESTUDIO.

El presente trabajo de investigación, se realizó en dos (02) etapas. La primera etapa, consistió en construir y ensamblar el equipo. Esta operación, se llevó a cabo en el taller de manufactura industrial denominado “Frio industrial andino”, ubicado en la Avenida Manuel Núñez Butrón 382, en la Ciudad de Juliaca.

La segunda etapa, consistió en realizar las pruebas de funcionamiento, y ajuste del equipo. Dichas pruebas, se llevaron a cabo en uno de los ambientes debidamente acondicionado del taller de manufactura industrial donde se construyó y ensamblo el equipo.

#### 3.2. MATERIALES y EQUIPOS.

##### 3.2.1. MATERIA PRIMA E INSUMOS.

Se empleó leche, la cual fue adquirida del fundo “Kori Huata”, ubicado en la Comunidad de Escuri, Distrito de Juliaca, Provincia de San Román y Departamento/Región de Puno. Por otro lado, los insumos (cultivo láctico Lyofast Y456B, saborizante y colorante) fueron adquiridos del local comercial denominado “Especerías Puno”.

##### 3.2.2. MATERIALES EMPLEADOS EN LA CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO MULTIPROCESO.

- Unidad condensadora (Bomba de calor: DAISEIKAIV; Unidad exterior: RAS-7PKVP-E);
- Gas refrigerante R22;
- Motor reductor de 1.84 W;
- Tubería de cobre flexible tipo L de 3/8" de diámetro;
- Tubería de acero inoxidable Mate AISI 304 de 1" de diámetro;
- Tubería de acero inoxidable Mate AISI 304 de 1/2" de diámetro;
- Válvula de descarga de acero inoxidable Mate AISI 304 de 1";
- Plancha de acero inoxidable Mate AISI 304 de 5 mm de espesor;

- Plancha negra de 6 *mm* de espesor;
- Tapa de acero inoxidable de 10 *cm* de diámetro;
- Fierro angular de 1" x 1" x 1/8";
- Aislante térmico "Poliuretano";
- Pintura hepoxica color blanco;
- Termocupla MK-10;
- Termostato;
- Temporizador HALLIUN; y,
- Otros materiales (Cables, lámparas de neón, interruptores, etc.).

### 3.2.3. EQUIPOS y HERRAMIENTAS EMPLEADOS PARA LA CONSTRUCCIÓN y CONTROL DEL EQUIPO MULTIPROCESO.

#### a. Equipos:

- Soldadura Eléctrica FERR-1800 TURBO;
- Soldadura Autógena;
- Soldadura Tig INVERTIG VRD 130;
- Esmeril eléctrico BOSCH GSM175;
- Taladro INDURA T13 1050;
- Bomba de vacío YAMAHA 1/2HP;
- Amperímetro BONTEK DT8308; y,
- Multitester SANWA YX-360TR.

#### b. Herramientas:

- Expandidor de prensa;
- Expandidor de golpe;
- Manómetros y mangueras;
- Llave Ratchet;
- Cortador de tubos de cobre;
- Doblador de tubos de cobre;
- Electrodo de soldadura AWS E6010;
- Llave francesa de 10";

- Alicates varios;
- Desarmadores varios;
- Tijeras de hojalatería;
- Martillo de bola;
- Yunque;
- Tornillo de banco;
- Arco de sierra;
- Juego de limas;
- Pulidor de acero; y,
- Otras herramientas utilizadas.

#### 3.2.4. EQUIPO EMPLEADO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA VISCOSIDAD DEL YOGURT.

Para determinar la viscosidad del yogurt, se empleó el viscosímetro BROOKFIELD DV-III ULTRA.

### 3.3. CÁLCULO, SELECCIÓN y DISEÑO DEL EQUIPO.

#### 3.3.1. CÁLCULO DE DIMENSIONES DEL TANQUE CONTENEDOR.

Para calcular la altura ( $H$ ) y el diámetro ( $D$ ) del tanque contenedor, asumimos que tanto la altura y diámetro del tanque, son iguales ( $H=D$ ). Además, si consideramos que la capacidad del tanque será de 15 litros ( $15,000 \text{ cm}^3$ ), para realizar el cálculo correspondiente, nos regimos en la Ecuación siguiente:

$$H = \sqrt[3]{\frac{V \times 4}{f}}$$

Ecuación (11)

**Donde:**

$H$  : Altura ( $cm$ ).

$V$  : Volumen ( $cm^3$ ).

Reemplazando los datos existentes en la Ecuación 11, obtenemos:

$$H = \sqrt[3]{\frac{15,000 \times 4}{f}}$$

$$H = D = 26.70 \Rightarrow 27\text{cm}$$

### 3.3.2. CALCULO DEL ESPESOR DEL AISLANTE PARA LAS PAREDES DEL TANQUE.

Para calcular el espesor del aislante (para las paredes del tanque), asumimos que las temperaturas de fermentación, enfriamiento y temperatura exterior del medio, son de 45 °C, 5 °C y 15 °C, respectivamente. En este sentido, para realizar el cálculo correspondiente, nos regimos en la Ecuación siguiente:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_e} + \sum \frac{e_n}{Kn} + \frac{1}{h_i}}$$

Ecuación (12)

**Donde:**

$h_e$  y  $h_i$  : Coeficientes globales de transmisión de calor por convección (Kcal/h.m<sup>2</sup>.°C).

$e_n$  : Espesor de cada uno de los materiales que componen el cerramiento (m).

$Kn$  : Conductividad térmica de cada uno de los materiales (Kcal/h.m.°C.)

Para obtener el valor de  $U$ , es preciso utilizar el Cuadro Adjunto, siguiente:

**CUADRO 2. COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA DE CALOR.**

$\Delta T$ ( $^{\circ}C$ )	$U \left( \frac{Kcal}{h.m^2.^{\circ}C} \right)$
>60	0.15
50	0.20
40	0.25
30	0.30
20	0.35
10	0.40
0	0.45
-10	0.50
-20	0.55
-30	0.60
-40	0.65
-50	0.70
< -60	0.75

FUENTE: PILLIGUA (2006).

Para utilizar el Cuadro precedente, necesitamos conocer el valor de  $\Delta T$ , el cual lo determinamos aplicando la siguiente Ecuación:

$$\Delta T = T_{med} - T_{int} \quad \text{Ecuación (13)}$$

**Donde:**

$T_{med}$  : Temperatura exterior del medio ( $^{\circ}C$ ).

$T_{int}$  : Temperatura interior del tanque ( $^{\circ}C$ ).

Los valores de  $h$  (coeficiente de convección), están dados de acuerdo a la disposición de la cámara y/o tanque, como veremos a continuación, Pilligua (2006):

$$h_i = 10 \frac{Kcal}{h.m^2.^{\circ}C}; \text{ Pared en contacto con la cámara y/o tanque.}$$

$$h_e = 20 \frac{Kcal}{h.m^2.^{\circ}C}; \text{ Pared en contacto con el aire exterior.}$$

Para determinar el espesor de aislante a colocar en las paredes del tanque contenedor, se consideraron las propiedades térmicas del “Poliuretano”; así como, de las planchas metálicas por las que estarían conformadas las paredes del tanque contenedor: Una plancha interior de acero inoxidable (AISI 304); y, Una plancha negra en el exterior, cuyos espesores se presentan en el Cuadro 3.

La conductividad térmica de los materiales mencionados en el párrafo precedente para la conformación de las paredes del tanque contenedor, se presentan en el Cuadro 3 y en el Anexo 1.

**CUADRO 3. ESPESOR y CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE LOS MATERIALES EMPLEADOS.**

MATERIALES EMPLEADOS EN LAS PAREDES DEL TANQUE	ESPESOR (m)	CONDUCTIVIDAD $\left(\frac{Kcal}{h.m.^{\circ}C}\right)$
Plancha de acero	0.005	17
Poliuretano	$e_n$	0.0232
Plancha negra	0.006	39

**a. Cálculo de espesor del aislante para las paredes del tanque.**

• **Para el proceso de fermentación.**

Como ya se explicó, el cálculo de la  $\Delta T$ , utilizando la  $T_{med}$  con la  $T_{int}$  (Ecuación 13), es:

$$\Delta T = 15 - 45 = -30^{\circ}C$$

Con el valor de  $\Delta T$  determinado ( $-30^{\circ}C$ ), obtenemos del Cuadro 2, el valor del coeficiente de transferencia de calor; siendo este, el siguiente:

$$U = 0.60 \frac{Kcal}{h.m^2.^{\circ}C}$$

Entonces, reemplazando los datos existentes en la Ecuación 12, tenemos:



$$0.60 = \frac{1}{\frac{1}{10} + \frac{e_n}{0.0232} + \frac{0.005}{17} + \frac{0.006}{39} + \frac{1}{20}}$$

$$e_n = 3.50 \text{ cm}$$

- **Para el proceso de enfriamiento.**

Al igual que para el proceso de fermentación, calculamos la  $\Delta T$ , utilizando la  $T_{med}$  con la  $T_{int}$  (Ecuación 13); siendo este, el siguiente:

$$\Delta T = 15 - 5 = 10^\circ \text{C}$$

Con el valor de  $\Delta T$  determinado ( $10^\circ \text{C}$ ), obtenemos del Cuadro 2, el valor del coeficiente de transferencia de calor; siendo este, el siguiente:

$$U = 0.40 \frac{\text{Kcal}}{\text{h.m}^2.\text{°C}}$$

Entonces, reemplazando los datos existentes en la Ecuación 12, tenemos:

$$0.40 = \frac{1}{\frac{1}{10} + \frac{e_n}{0.0232} + \frac{0.005}{17} + \frac{0.006}{39} + \frac{1}{20}}$$

$$e_n = 5.45 \text{ cm}$$

### 3.3.3. CÁLCULO DE LA CARGA TÉRMICA DEL TANQUE CONTENEDOR.

Los cálculos que se realizarán a continuación, sirven para determinar la cantidad de calor que el sistema necesita conservar y/o remover. En otras palabras, esto sería la capacidad que tiene el evaporador de conservar y/o disipar el calor; razón por la cual, se tienen que calcular los aportes externos e internos al sistema.

**a. Dimensiones del tanque:**

Altura : 30 *cm*. (Altura real, 27 *cm* + 11% de área de trabajo, 3 *cm*).

Radio : 13.50 *cm*.

- **Calculo del área de la pared lateral del tanque.**

$$A_l = 2f \times r \times H$$

Ecuación (14)

**Donde:**

$A_l$  : Área lateral ( $cm^2$ ).

$r$  : Radio del tanque (*cm*).

$H$  : Altura del tanque (*cm*).

Reemplazando los datos existentes en la Ecuación 14, obtenemos:

$$A_l = 2f \times 13.50 \times 30 = 2,544.69 cm^2 = 2.54 m^2$$

- **Calculo del área del techo y base del tanque.**

$$A_{t,b} = f r^2$$

Ecuación (15)

**Donde:**

$A_{t,b}$  : Área del techo o base ( $cm^2$ ).

$r$  : Radio del tanque (*cm*).

Reemplazando los datos existentes en la Ecuación 15, obtenemos:

$$A_{t,b} = f \times (13.50)^2 = 572.56 cm^2 = 0.57 m^2$$

**b. Cálculo de aportes externos.**

- **Para el proceso de fermentación.**

Los aportes de calor, son dados por las paredes del tanque. Para calcular el calor generado, empleamos la Ecuación siguiente:

$$Q_1 = U \times A \times \Delta T \quad \text{Ecuación (16)}$$

**Donde:**

$Q_1$  : Cantidad de calor transferido (Kcal/h).

$U$  : Coeficiente global de transferencia de calor, en función de los materiales utilizados (Kcal/h.m<sup>2</sup>.°C).

$A$  : Área de transferencia (m<sup>2</sup>).

$\Delta T$  : Diferencia de temperatura entre el exterior y el interior (°C).

**Carga térmica en la pared lateral del tanque.**

$$U = \frac{1}{\frac{1}{10} + \frac{0.05}{0.0232} + \frac{0.005}{17} + \frac{0.006}{39} + \frac{1}{20}}$$

$$U = 0.43 \frac{\text{Kcal}}{\text{h.m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$$

Reemplazando los datos existentes en la Ecuación 16, obtenemos:

$$Q_{lf} = 0.43 \times 2.54 \times (15 - 45) = -32.77 \text{Kcal/h}$$

**Carga térmica en el techo del tanque.**

$$U = \frac{1}{\frac{1}{10} + \frac{0.005}{17} + \frac{1}{20}}$$

$$U = 6.65 \frac{Kcal}{h.m^2.^{\circ}C}$$

Reemplazando los datos existentes en la Ecuación 16, obtenemos.

$$Q_{tf} = 6.65 \times 0.57 \times (15 - 45) = -113.72 Kcal / h$$

**Carga térmica en la base del tanque.**

$$U = \frac{1}{\frac{1}{10} + \frac{0.05}{0.0232} + \frac{0.005}{17} + \frac{0.006}{39} + \frac{1}{20}}$$

$$U = 0.43 \frac{Kcal}{h.m^2.^{\circ}C}$$

Reemplazando los datos existentes en la Ecuación 16, obtenemos.

$$Q_{bf} = 0.43 \times 0.57 \times (15 - 45) = -7.35 Kcal / h$$

- **Para el proceso de enfriamiento.**

**Carga térmica en la pared lateral del tanque.**

$$U = \frac{1}{\frac{1}{10} + \frac{0.05}{0.0232} + \frac{0.005}{17} + \frac{0.006}{39} + \frac{1}{20}}$$

$$U = 0.43 \frac{Kcal}{h.m^2.^{\circ}C}$$

Reemplazando los datos existentes en la Ecuación 16, obtenemos:

$$Q_{le} = 0.43 \times 2.54 \times (15 - 5) = 10.92 Kcal / h$$

**Carga térmica en el techo del tanque.**

$$U = \frac{1}{\frac{1}{10} + \frac{0.005}{17} + \frac{1}{20}}$$

$$U = 6.65 \frac{\text{Kcal}}{\text{h.m}^2.\text{°C}}$$

Reemplazando los datos existentes en la Ecuación 16, obtenemos:

$$Q_{te} = 6.65 \times 0.57 \times (15 - 5) = 37.91 \text{Kcal/h}$$

**Carga térmica en la base del tanque.**

$$U = \frac{1}{\frac{1}{10} + \frac{0.05}{0.0232} + \frac{0.005}{17} + \frac{0.006}{39} + \frac{1}{20}}$$

$$U = 0.43 \frac{\text{Kcal}}{\text{h.m}^2.\text{°C}}$$

Reemplazando los datos existentes en la Ecuación 16, obtenemos:

$$Q_{be} = 0.43 \times 0.57 \times (15 - 5) = 2.45 \text{Kcal/h}$$

**c. Cálculo de aportes internos.**

El principal aporte interno de calor, está dado por el producto (leche).

- **Calor aportado por el producto.**

Para poder realizar los cálculos correspondientes, se deben conocer los datos presentados en el Cuadro 4, los cuales deberán ser reemplazados en la Ecuación 17.

**CUADRO 4. PROPIEDADES DEL PRODUCTO (YOGURT).**

Temperatura exterior	15°C
Temperatura de enfriamiento	5°C
Temperatura inicial del producto	45 °C
Calor especifico	0.93 Kcal/Kg.°C
Masa del producto	15.48 Kg
Tiempo de enfriamiento	0.40 (h)

$$Q_p = \frac{m \times C_{p2} \times (T_i - T_c)}{t} \quad \text{Ecuación (17)}$$

**Donde:**

- $m$  : Masa del producto a enfriar (Kg).  
 $C_{p2}$  : Calor específico del producto (Kcal/Kg.°C).  
 $T_i$  : Temperatura inicial del producto (°C).  
 $T_c$  : Temperatura de enfriamiento del producto (°C).  
 $t$  : Tiempo de enfriamiento (h).

**Determinación del tiempo de enfriamiento:**

El método más sencillo para determinar el tiempo de enfriamiento del producto, es haciendo uso de la “Gráfica de conducción en estado no estacionario y temperaturas promedio para resistencias superficiales despreciables” (Anexo 3).

Para utilizar la gráfica anteriormente mencionada, debemos conocer el valor de  $E$ , el cual lo determinamos de la manera siguiente:

$$E = \frac{T_1 - T_{PROM}}{T_1 - T_0} \quad \text{Ecuación (18)}$$

**Donde:**

$T_0$  : Temperatura uniforme original del producto ( $^{\circ}\text{C}$ ).

$T_1$  : Temperatura a la cual se somete repentinamente el producto ( $^{\circ}\text{C}$ ).

$T_{PROM}$  : Temperatura promedio del producto después de  $t$  horas ( $^{\circ}\text{C}$ ).

Con el valor de  $E$  conocido, entramos en la “Gráfica de conducción en estado no estacionario y temperaturas promedio para resistencias superficiales despreciables” (adjunta en el Capítulo de Anexos) y verificamos el valor de:

$$\frac{r \times t}{c^2}$$

**Donde:**

$\alpha$  : Difusividad térmica del producto ( $\text{m}^2/\text{s}$ ).

$t$  : Tiempo de enfriamiento del producto ( $\text{s}$ ).

$c$  : Equivalente a la mitad del largo de una placa o la mitad de la altura de un cilindro ( $\text{m}$ ).

La difusividad térmica del producto, lo determinamos con la Ecuación siguiente:

$$r = \frac{K}{\rho \times c_p}$$

Ecuación (19)

**Donde:**

$\alpha$  : Difusividad térmica del producto ( $\text{m}^2/\text{s}$ ).

$K$  : Conductividad térmica del producto ( $\text{W}/\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C}$ ).

$\rho$  : Densidad del producto ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ ).

$c_p$  : Calor específico del producto ( $\text{J}/\text{Kg} \cdot ^{\circ}\text{C}$ ).

Entonces, conociendo los datos correspondientes ( $T_0=45^{\circ}\text{C}$ ;  $T_1=5^{\circ}\text{C}$ ;  $T_{\text{PROM}}=28^{\circ}\text{C}$ ;  $c=0.10\text{m}$ ;  $K=0.53\text{W/m}\cdot^{\circ}\text{C}$ ;  $\rho=1,034.80\text{Kg/m}^3$ ; y,  $c_p=3,900.00\text{J/Kg}\cdot^{\circ}\text{C}$ ); y, aplicando la metodología anteriormente citada, determinamos el tiempo de enfriamiento del producto, de la manera siguiente:

Primero, determinamos el valor de la difusividad ( $\alpha$ ), aplicando la Ecuación 19:

$$\alpha = \frac{0.53}{1,034.80 \times 3,900.00} = 1.313 \times 10^{-7} \text{ m}^2 / \text{s}$$

Luego, determinamos el valor de  $E$ , aplicando la Ecuación 18:

$$E = \frac{5-28}{5-45} = 0.7$$

Con el valor de  $E$  determinado, entramos en la gráfica correspondiente y verificamos el valor de  $(\alpha \times t)/c^2$ , siendo este el siguiente:

$$\frac{\alpha \times t}{c^2} = 0.02$$

De la Ecuación precedente, despejando  $t$ , obtenemos la Ecuación siguiente:

$$t = \frac{0.02 \times c^2}{\alpha}$$

Reemplazando los datos existentes en la Ecuación anterior, obtenemos:

$$t = \frac{0.02 \times 0.10^2}{1.313 \times 10^{-7}} = 1,523.23\text{s} = 0.40\text{h}$$



Entonces, reemplazando los datos existentes en la Ecuación 17, tenemos:

$$Q_p = \frac{15.48 \times 0.93 \times (45 - 5)}{0.40} = 1,439.64 \text{ Kcal/h}$$

**d. Cálculo de la carga térmica total.**

- **Proceso de fermentación.**

$$Q_{TF} = Q_{lf} + Q_{if} + Q_{bf}$$

$$Q_{TF} = -32.77 - 113.72 - 7.35 = -153.84 \text{ Kcal/h}$$

- **Proceso de enfriamiento.**

$$Q_{TE} = Q_{le} + Q_{te} + Q_{be} + Q_p$$

$$Q_{TE} = 10.92 + 37.91 + 2.45 + 1,439.64 = 1,490.92 \text{ Kcal/h}$$

### 3.3.4. SELECCIÓN DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN.

**a. Selección del refrigerante.**

En el presente Proyecto, trabajaremos con el refrigerante 22, por sus características y propiedades (Anexo 4); por lo que, todos nuestros cálculos estarán basados en las tablas del diagrama de Mollier, para dicho refrigerante (R22).

- **Trazado del ciclo de refrigeración.**

Una vez seleccionado el refrigerante, procedemos a trazar el ciclo de refrigeración en el Diagrama Presión-Entalpía (Figura 13).

Para lo cual, primero calculamos la Temperatura de Condensación ( $T_{cond}$ ), haciendo uso de la Ecuación siguiente:

$$T_{cond} = T_{ext} + \Delta T \quad \text{Ecuación (20)}$$

**Donde:**

$$10 < \Delta T < 15$$

De la expresión anterior, para nuestro cálculo escogemos  $\Delta T = 10 \text{ }^\circ\text{C}$ ; además, si consideramos que  $T_{ext} = 15^\circ\text{C}$ . Entonces, reemplazando los datos existentes en la Ecuación 20, tenemos:

$$T_{cond} = 15 + 10 = 25^\circ\text{C}$$

Por otro lado, para calcular la Temperatura de Evaporación ( $T_{evapor}$ ), hacemos uso de la Ecuación siguiente:

$$T_{evapor} = T_{in} - \Delta T \quad \text{Ecuación (21)}$$

**Donde:**

$$8 < \Delta T < 10$$

De la expresión anterior, para nuestro cálculo escogemos  $\Delta T = 10 \text{ }^\circ\text{C}$ ; además, si consideramos que la temperatura de enfriamiento que asumiremos para nuestro trabajo, es de  $5 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $T_{int} = 5^\circ\text{C}$ ). Entonces, reemplazando los datos existentes en la Ecuación 21, tenemos:

$$T_{evapor} = 5 - 10 = -5^\circ\text{C}$$

Asimismo, para calcular la Temperatura de Vapor Sobrecalentado ( $T_{vs}$ ), empleamos la Ecuación siguiente:

$$T_{vs} = T_c + \Delta T_c \tag{Ecuación (22)}$$

Reemplazando los datos existentes en la Ecuación 22, obtenemos:

$$T_{vs} = 25 + 10 = 35^\circ C$$

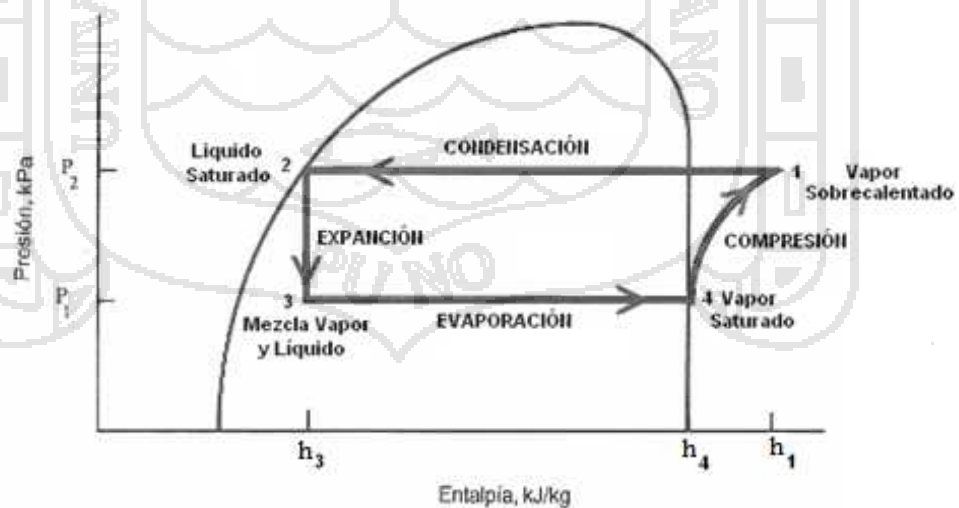
De igual forma, para calcular la Temperatura de Vapor y Líquido ( $T_{vl}$ ), empleamos la Ecuación siguiente:

$$T_{vl} = T_e - \Delta T_e \tag{Ecuación (23)}$$

Reemplazando los datos existentes en la Ecuación 23, obtenemos:

$$T_{vl} = -5 - 10 = -15^\circ C$$

**FIGURA 13. DIAGRAMA DE PRESIÓN y ENTALPIA.**



Las entalpias para el refrigerante 22, se obtienen del diagrama de Presión - Entalpia (Anexo 5).

El Cuadro 5, nos muestra el resumen de temperatura, presión y entalpia del refrigerante 22.

**CUADRO 5. RESUMEN DE TEMPERATURA, PRESIÓN y ENTALPIA DEL REFRIGERANTE 22.**

Pto	ESTADO	TEMPERATURA (°C)	PRESIÓN (bar)	ENTALPIA (KJ/Kg)
1	Vapor sobrecalentado	35	10.347	415.80
2	Liquido saturado	25	10.347	230.40
3	Mezcla de vapor y liquido	-15	4.212	230.40
4	Vapor saturado	-5	4.212	403.50

### 3.3.5. CÁLCULO y DISEÑO DEL EVAPORADOR.

Con este propósito, primeramente calculamos el “Flujo Másico” del refrigerante que tendrá el sistema. Este flujo másico, lo determinamos con la siguiente Ecuación:

$$Q = m(h_4 - h_3) \quad \text{Ecuación (24)}$$

Donde:

$Q$  : Calor absorbido por el sistema (KJ/h).

$m$  : Flujo másico (Kg/h).

De la Ecuación 24, obtenemos:

$$m = \frac{Q}{h_4 - h_3} = \frac{1,490.92 \times 4.1868}{403.50 - 230.40} = 36.06 \text{ Kg/h}$$

Para diseñar el evaporador, se debe calcular el área del evaporador y el calor que este absorbe del producto (yogurt), dentro del tanque contenedor; para lo cual, hacemos uso de la siguiente Ecuación:

$$S = \frac{Q_{\text{absorbido}}}{K \times \Delta T}$$

Ecuación (25)

**Donde:** $S$  : Superficie de transferencia de calor ( $m^2$ ). $Q_{\text{absorbido}}$  : Calor absorbido por el evaporador ( $Kcal/h$ ). $K$  : Coeficiente de transmisión de calor en el evaporador ( $Kcal/m^2 \cdot h \cdot ^\circ C$ ). $\Delta T$  : Diferencia de temperatura entre la temperatura del medio a enfriar y la temperatura de vaporización del refrigerante ( $^\circ C$ ).En la Ecuación 25, el  $Q_{\text{absorbido}}$ , es equivalente al  $Q_{\text{total}}$  del sistema.Asimismo, los valores de  $\Delta T$  y  $K$ , los obtenemos de los Anexos 7 y 8, donde: $\Delta T$  :  $8^\circ C$  $K$  :  $50 Kcal/m^2 \cdot h \cdot ^\circ C$ 

Entonces, reemplazando los datos existentes en la Ecuación 25, obtenemos:

$$S = \frac{1,490.92}{50 \times 8} = 3.73 m^2$$

Tomando en consideración que la superficie ( $S$ ), considera tanto el área de "Aletas" y "Tubería", podemos asumir que:

$$S = S_A + S_T$$

Ecuación (26)

**Donde:**

$S$  : Superficie total del evaporador ( $m^2$ ).

$S_A$  : Superficie de aletas ( $m^2$ ).

$S_T$  : Superficie de tubería ( $m^2$ ).

Considerando que la  $S_A$ , es la sumatoria de las superficies (lateral y de la base) del tanque contenedor; podemos determinar el valor de la  $S_T$ , utilizando la Ecuación 26.

$$3.73 = (2.54 + 0.57) + S_T$$

$$S_T = 0.62m^2$$

### Calculo de la longitud de tubería para el evaporador.

La tubería de evaporación o lado de baja presión y baja temperatura; comprende en el sistema, desde la entrada al evaporador, hasta la salida del mismo. Para determinar el diámetro de la tubería a utilizar, utilizamos las siguientes Ecuaciones:

$$A = \frac{m}{\dots \times v}$$

Ecuación (27)

$$A = \frac{f \times d^2}{4}$$

Ecuación (28)

Reemplazando la Ecuación (27) en la Ecuación (28), obtenemos:

$$d = 2 \sqrt{\frac{m}{f \times \dots \times v}}$$

Ecuación (29)

**Donde:**

$d$  : Diámetro de la tubería ( $mm$ ).

$m$  : Flujo másico del refrigerante ( $Kg/h$ ).

: Densidad del refrigerante ( $Kg/m^3$ ).

: Velocidad del refrigerante ( $m/s$ ).

Para determinar el diámetro de la tubería, se requieren conocer los siguientes datos:

$$\begin{aligned} m &= 36.06 \text{ Kg/h} \\ &= 18.064 \text{ Kg/m}^3 \text{ (a la temperatura de evaporación, } -5 \text{ }^\circ\text{C)} \\ &= 8 \text{ a } 15 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Reemplazando los datos existentes en la Ecuación 29, obtenemos:

$$d = 2 \times \sqrt{\frac{36.06 \frac{\text{Kg}}{\text{h}} \times \frac{1\text{h}}{3,600\text{seg}}}{f \times 18.064 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 10 \frac{\text{m}}{\text{seg}}}} = 0.0084\text{m} = 8.40\text{mm}$$

Con el diámetro de la tubería ( $d$ ) determinado, ingresamos en la Tabla adjunta en el Anexo 9, y verificamos el diámetro interior ( $\emptyset$ ) de la tubería a utilizar, siendo este el siguiente:

$$\emptyset = 3/8 \text{ Interior}$$

Por otro lado, para calcular la longitud de la tubería ( $L_T$ ) del evaporador, aplicamos la Ecuación siguiente:

$$L_T = \frac{S_T}{S_{TE}} \quad \text{Ecuación (30)}$$

**Donde:**

$L_T$  : Longitud de la tubería ( $ML$ ).

$S_T$  : Superficie de la tubería ( $m^2$ ).

$S_{TE}$  : Superficie exterior de la tubería ( $m^2$ ).

La  $S_{TE}$ , lo obtenemos de la Tabla adjunta en el Anexo 9; donde, para una tubería de 3/8 de diámetro, la superficie exterior (por metro lineal), es:

$$S_{TE} = 0.0300m^2$$

Entonces, reemplazando los datos existentes en la Ecuación 30, obtenemos:

$$L_T = \frac{0.62}{0.0300} = 21.00ML$$

### 3.3.6. SELECCIÓN DE LA UNIDAD CONDENSADORA.

El sistema utilizará una unidad condensadora, cuya selección estará en función de su capacidad de calefacción ( $Q_{TC}$ ) y refrigeración ( $Q_{TR}$ ). En este sentido, considerando que para el presente Proyecto, la  $Q_{TC}$  y  $Q_{TR}$  calculados, son los siguientes:

$$Q_{TC} : 153.84 \text{ Kcal/h} \quad 0.18 \text{ KW}; \text{ y,}$$

$$Q_{TR} : 1,490.92 \text{ Kcal/h} \quad 1.73 \text{ KW.}$$

Por tanto, la unidad condensadora que corresponde elegir del Catálogo de Especificaciones Técnicas, adjunto en el Anexo 10 del presente Proyecto de Investigación, es:

- Bomba de calor : DAISEIKAIV.
- Unidad exterior : RAS-7PKVP-E.
- Refrigerante : R22.

### 3.3.7. CÁLCULO y SELECCIÓN DEL AGITADOR.

Para seleccionar el agitador, primero se debe calcular la viscosidad aparente del yogurt. Para tal fin, se tienen que conocer los siguientes índices del fluido: El índice de flujo ( $n$ ); y, El índice de consistencia ( $K$ ).



Estos índices (“ $n$ ” y “ $K$ ”), se presentan en el Cuadro 6:

**CUADRO 6. VALORES DE “ $n$ ” y “ $K$ ” PARA LAS BEBIDAS FERMENTADAS.**

FERMENTACIÓN	$n$	$K$ ( $Pa.s^n$ )
100% Leche	0.2804	36.27
75% Leche/25% Suero	0.2776	51.65
50% Leche/50% Suero	0.3653	11.21
25% Leche/75% Suero	0.7261	4.75
100% Suero	1.5750	0.0009

FUENTE: ITARA (2007).

La viscosidad aparente, se calcula empleando la Ecuación siguiente:

$$\tilde{\mu}_a = (11N)^{n-1} \times K \quad \text{Ecuación (31)}$$

**Donde:**

$\mu_a$  : Viscosidad aparente ( $Pa.s$ ).

$N$  : Velocidad de agitación ( $rev/s$ ).

$n$  : Índice de flujo.

$K$  : Índice de consistencia ( $Pa.s$ ).

Considerando que la velocidad de agitación del yogurt, es de 20  $rpm$  o 0.33  $rev/s$ ; y, reemplazando los datos existentes en la Ecuación 31, obtenemos:

$$\tilde{\mu}_a = (11 \times 0.33)^{0.2804-1} \times 36.27 = 14.34 Pa.s$$

El Cuadro 7, nos presenta los intervalos de viscosidad para la selección del tipo de agitador.

**CUADRO 7. INTERVALOS DE VISCOSIDAD PARA LA SELECCIÓN DEL TIPO DE AGITADOR.**

TIPO DE AGITADOR	VISCOSIDAD, $Pa.s$
Propulsor	< 3
Turbina	< 100
Paletas (Ancla)	50 - 500
Helicoidal (Banda)	100 - 25,000
<b>NOTA:</b> Viscosidades mayores a 2.5 - 5 $Pa.s$ , no necesitan deflectores.	

FUENTE: GEANKOPLIS (1998).

Del Cuadro precedente, determinamos que el tipo de agitador que corresponde seleccionar en función a la viscosidad calculada (14.34 $Pa.s$ ), es el agitador tipo "Turbina".

### 3.3.8. CÁLCULO DE LA POTENCIA DE MOTOR REQUERIDA PARA EL AGITADOR.

Para determinar la potencia de motor que se requiere para accionar el agitador, primero se debe determinar el Número de Reynol ( $N'_{re}$ ), aplicando la siguiente Ecuación:

$$N'_{Re} = \frac{D_a^2 \times N \times \dots}{\mu_a} \quad \text{Ecuación (32)}$$

**Donde:**

$D_a$  : Diámetro del propulsor ( $m$ ).

$N$  : Velocidad de agitación ( $rev/s$ ).

: Densidad del fluido ( $Kg/m^3$ ).

$\mu_a$  : Viscosidad aparente ( $Kg/m.s$ ).

El diámetro del propulsor tipo Turbina (según Geankoplis, 1998), es equivalente al 50% del diámetro del tanque; en tal sentido, considerando que el diámetro del tanque contenedor, es de 27  $cm$ , resulta que el diámetro del propulsor, es equivalente a 14  $cm$  (0.14  $m$ ).

Por otro lado, si se sabe que la densidad del yogurt, es de 1,034.80  $Kg/m^3$ ; y, siendo los demás datos conocidos. Reemplazando los datos existentes en la Ecuación 32, obtenemos:

$$N'_{Re} = \frac{0.14^2 \times 0.33 \times 1,034.80}{14.34} = 0.47$$

El Cuadro Adjunto siguiente, presenta los intervalos del  $N'_{Re}$  para determinar el tipo flujo.

**CUADRO 8. INTERVALOS DEL  $N'_{Re}$  PARA DETERMINAR EL TIPO DE FLUJO.**

$N'_{Re}$	TIPO DE FLUJO
< 10	Laminar
> 10,000	Turbulento
10 - 10,000	Transición

FUENTE: GEANKOPLIS (1998).

Del Cuadro precedente, determinamos que el tipo de flujo que corresponde seleccionar en función al Número de Reynol ( $N'_{Re}$ ) calculado para el yogurt (0.47), es el tipo de flujo "Laminar".

Como el  $N'_{Re}$  calculado, resulta ser menor a 10. La densidad deja de ser un factor importante; y, en este caso, la potencia puede determinarse aplicando la Ecuación siguiente:

$$P = K_L \times N^2 \times D_a^2 \times \mu_a \quad \text{Ecuación (33)}$$

**Donde:**

- $P$  : Potencia requerida ( $W$ ).
- $K_L$  : Constante del tipo de rodete.
- $D_a$  : Diámetro del propulsor ( $m$ ).
- $N$  : Velocidad de agitación ( $rev/s$ ).
- $\mu_a$  : Viscosidad aparente ( $N/s.m^2$ ).

La constante  $K_L$  del tipo de rodete, lo obtenemos del Cuadro Adjunto siguiente:

**CUADRO 9. CONSTANTES  $K_L$  y  $K_T$  POR TIPO DE RODETE.**

TIPO DE RODETE	$K_L$	$K_T$
Hélice (Paso cuadrado, 3 palas)	41.00	0.32
Hélice (Paso igual 2 a 3 palas)	43.50	1.00
Turbina (4 palas planas)	60.00	5.31
Turbina (6 palas planas)	65.00	5.75
Turbina (6 palas curvadas)	70.00	4.80
Turbina ventilador (6 palas 45°)	70.00	1.65

FUENTE: GARCÍA (1994).

Entonces, reemplazando los datos existentes en la Ecuación 33, obtenemos:

$$P = 60 \times 0.33^2 \times 0.14^2 \times 14.34 = 1.84W$$

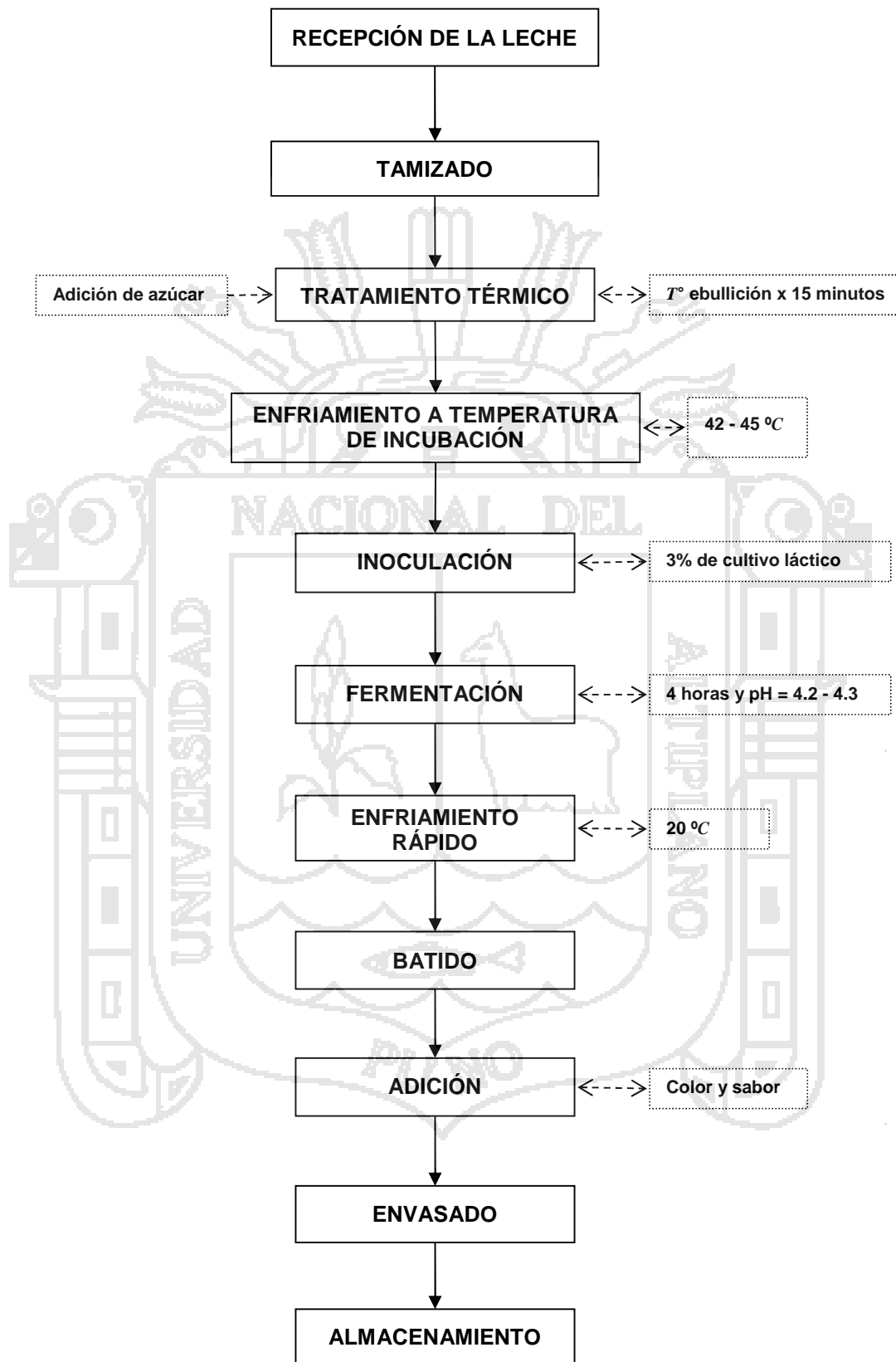
### 3.4. MÉTODO EXPERIMENTAL.

En la Figura 14, se presenta el diagrama de flujo normal para la elaboración de yogurt. Desde la recepción de la materia prima (leche), hasta el proceso de envasado y almacenamiento.

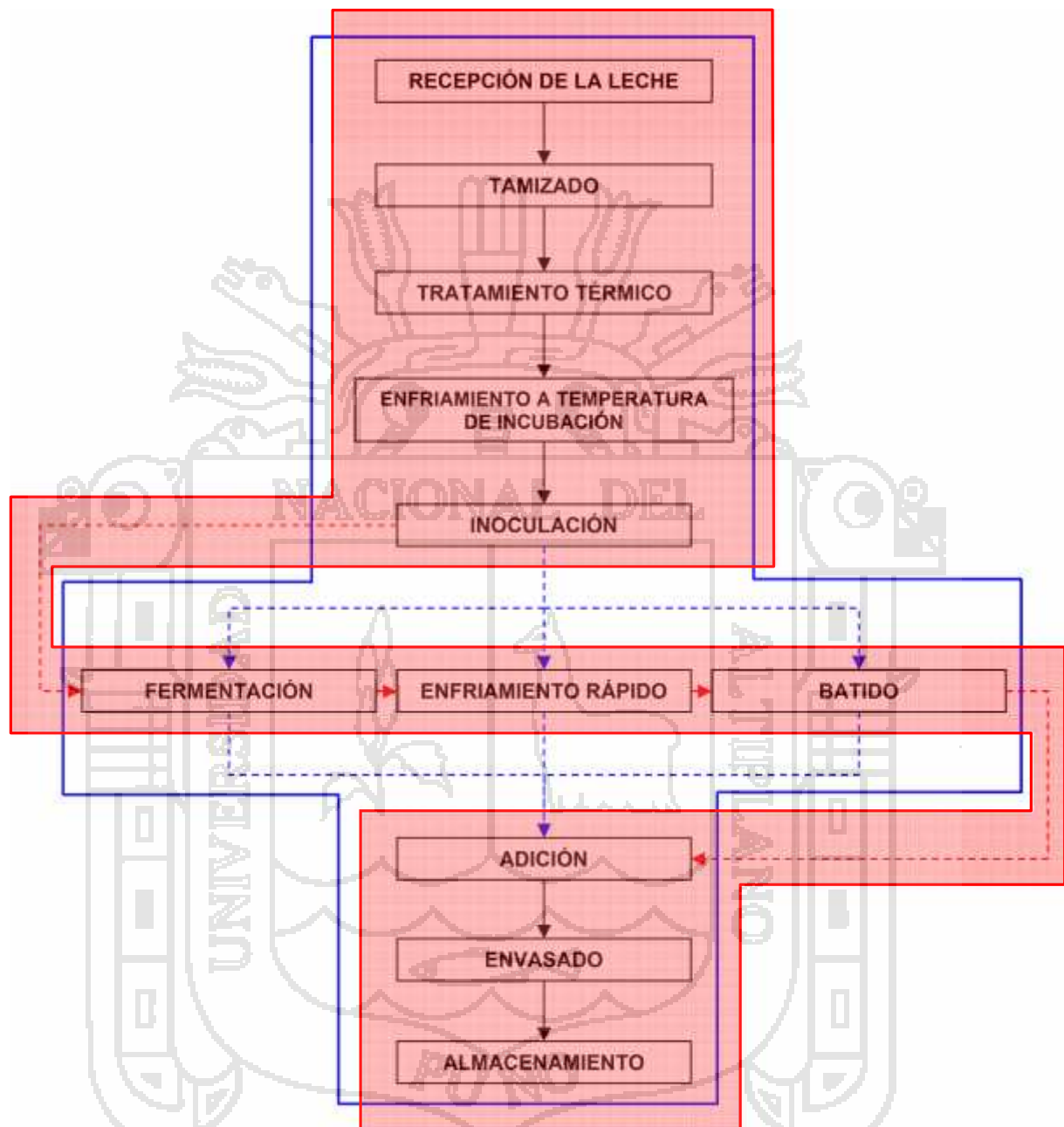
Por su parte, la Figura 15, presenta el diagrama de flujo para la elaboración del yogurt (normal y simplificado) planteado para el presente Trabajo de Investigación.

Por otro lado, en la Figura 16, se presenta el diagrama simplificado del proceso de elaboración de yogurt; además, del diseño experimental para la evaluación del equipo.

**FIGURA 14. DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA ELABORACIÓN DE YOGURT.**



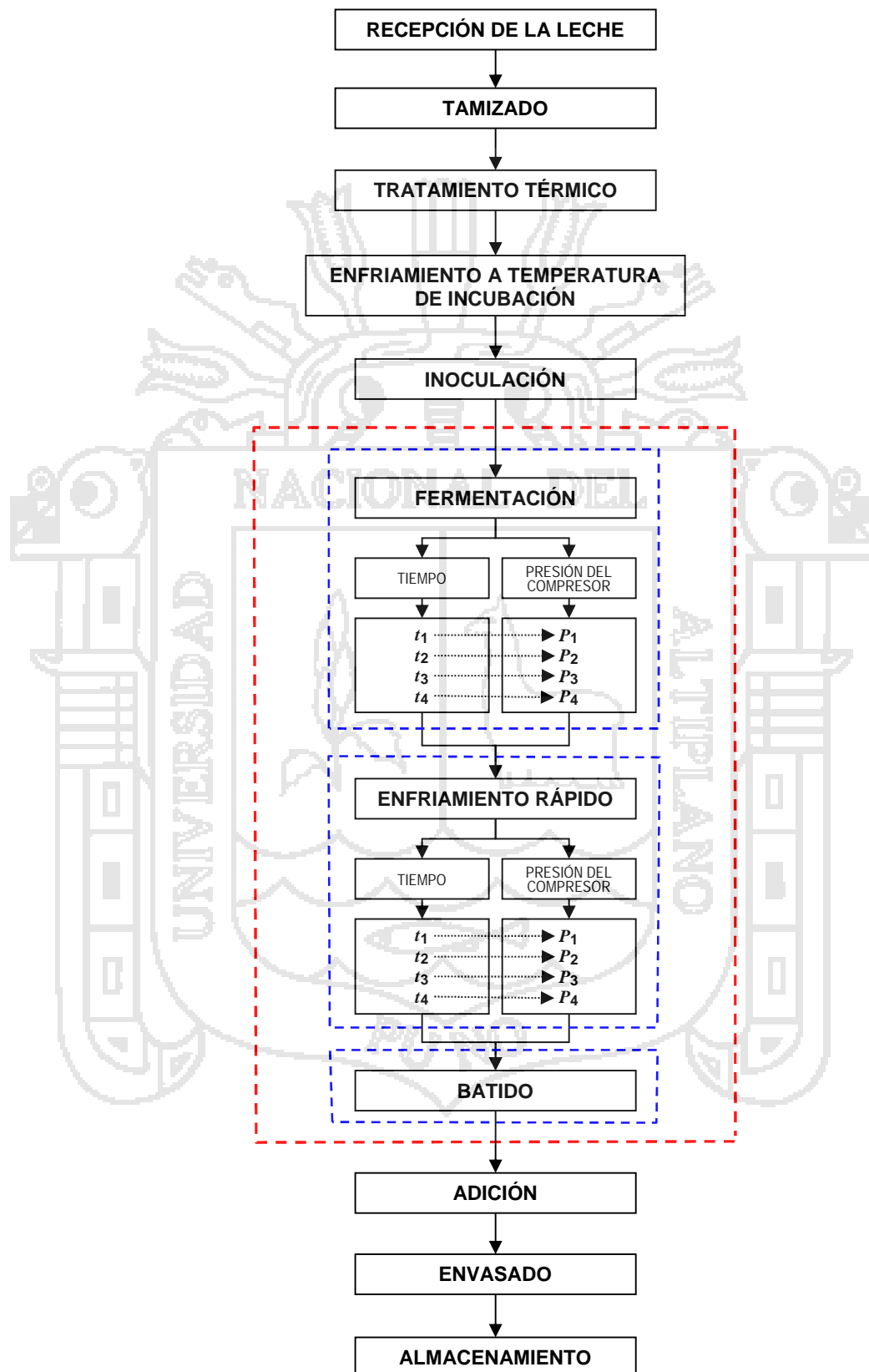
**FIGURA 15. DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA ELABORACIÓN DE YOGURT (NORMAL y SIMPLIFICADO).**



a. FLUJO DE ELABORACIÓN NORMAL: Recepción de la leche; Tamizado; Tratamiento térmico; Enfriamiento a temperatura de incubación; Inoculación; Incubación; Enfriamiento rápido; Batido; Adición; Envasado; y, Almacenamiento.

b. FLUJO DE ELABORACIÓN SIMPLIFICADO: Recepción de la leche; Tamizado; Tratamiento térmico; Enfriamiento a temperatura de incubación; Inoculación; Incubación, enfriamiento rápido y batido; Adición; Envasado; y, Almacenamiento.

**FIGURA 16. DIAGRAMA SIMPLIFICADO DEL PROCESO DE ELABORACIÓN DE YOGURT y DISEÑO EXPERIMENTAL PARA LA EVALUACIÓN DEL EQUIPO.**



### 3.4.1. DESCRIPCIÓN DE LAS OPERACIONES EFECTUADAS.

- a. **Recepción de la leche:** Se recibió la leche (15 litros) en un recipiente plástico de 20 litros de capacidad; la cual, fue proveída por la propietaria del fundo Kori Huata, ubicado en la Comunidad de Escuri, Distrito de Juliaca, Provincia de San Román y Departamento/Región de Puno.
- b. **Tamizado:** Esta operación fue realizada con la finalidad de eliminar elementos físicos externos, ajenos a la leche. Para tal fin, se utilizó un “Tamiz de Doble Malla”.
- c. **Tratamiento térmico:** En esta operación, se sometió los 15 litros de leche contenida en una olla de acero inoxidable de 20 litros de capacidad, a fuego lento producido por una cocina doméstica a gas; donde, además se adicionó 1,500 gramos de azúcar refinada (10%). Esta operación fue realizada por un lapso de tiempo de 15 minutos a la temperatura de ebullición. La finalidad de este procedimiento, fue eliminar bacterias y microbios contaminantes, tanto del azúcar como de la leche.
- d. **Enfriamiento a temperatura de incubación:** El enfriamiento fue realizado a baño maría, en el mismo recipiente donde fue realizado el tratamiento térmico. En esta operación, se disminuyó la temperatura de la leche, hasta 45 °C; momento en el cual, se vertió la leche enfriada en el tanque contenedor del equipo, previamente acondicionado para iniciar el proceso de fermentación.
- e. **Inoculación:** Para esta operación, previamente se acondicionó el cultivo láctico liofilizado marca “Sacco” Lyofast Y456B para 100 litros de leche, en 6 partes iguales; de manera que cada parte del cultivo láctico acondicionado, pudo ser utilizado para fermentar 15 litros de leche. En este sentido, se añadió una parte de cultivo láctico acondicionado en la leche previamente enfriada a



temperatura de incubación. Este proceso, fue realizado en el tanque contenedor del equipo multiproceso, donde resulto necesario accionar el agitador del equipo, con la finalidad de lograr una correcta homogenización de la leche con el cultivo láctico.

- f. **Fermentación:** Esta operación fue realizada en el equipo multiproceso, previamente acondicionado a la temperatura de incubación. Es en este proceso, donde se evaluó la temperatura de incubación producida por el equipo. Temperatura que se mantuvo entre 42 - 45 °C, por un tiempo de 4 horas.
- g. **Enfriamiento rápido:** Esta operación fue realizada en el equipo multiproceso, previamente acondicionado a la temperatura de enfriamiento. En este proceso, se evaluó la temperatura de enfriamiento rápido producida por el equipo; temperatura que se mantuvo en 5 °C, hasta disminuir la temperatura del coagulo de yogurt a 20 °C, antes de iniciar el proceso de batido.
- h. **Batido:** En este proceso, se rompió el coagulo de yogurt, por medio de un batido suave del producto (a 20 rpm). Para tal fin, se acondiciono un agitador tipo Turbina de 4 palas, el cual fue accionado por un motor de 1.84 W, acondicionado estratégicamente en la tapa del tanque contenedor del equipo.
- i. **Adición:** Consistió en añadir al yogurt, determinados ingredientes complementarios, como colorante y saborizante. Esta operación se realizó en el tanque contenedor del equipo, simultáneamente con el proceso de batido del yogurt.
- j. **Envasado:** Esta operación, se realizó directamente del equipo multiproceso, a través de la válvula de descarga acondicionada estratégicamente en la parte inferior del tanque contenedor. Los envases utilizados para esta operación, fueron de una capacidad de un litro, cuya finalidad fué contener y proteger el producto de

agentes externos contaminantes, o que pudieran alterar la composición propia del yogurt.

- k. Almacenamiento:** Se realizó en una refrigeradora domestica programada a temperaturas inferiores a 7 °C, con la finalidad de retrasar las reacciones bioquímicas y biológicas en el producto, hasta el momento de su disposición.

### 3.4.2. ANÁLISIS ESTADÍSTICO.

El presente Trabajo de Investigación, es del tipo descriptivo y de investigación. Descriptivo, porque se refiere a la presentación de todos los resultados del Estudio; e, Investigación, debido al tratamiento matemático planteado que permite un validamiento cuantitativo de los resultados. Este método se aplica con el propósito de establecer las conclusiones y generalizar los resultados de la investigación.

Con relación al aspecto descriptivo, se hace referencia a las características y bondades del equipo (que simplifica el proceso de elaboración del yogurt), ello gracias a que se establecieron propuestas bien definidas para cumplir con los objetivos que nos planteamos.

Para cumplir con nuestros objetivos específicos, se tomaron datos directamente del equipo instalado y en funcionamiento. La toma de datos, nos permitió interpretar dicha información estadística, mediante el modelo matemático planteado en el presente Trabajo.

El modelo matemático utilizado para la evaluación de los resultados obtenidos en los procesos de Fermentación y Enfriamiento del yogurt, es el Diseño Completamente al Azar (DCA); y, para la comparación de medias, se realizaron las pruebas de comparaciones múltiples de DUNCAN.

El modelo Diseño Completamente al Azar, es el siguiente:

$$Y_{ij} = \mu + t_i + e_{ij}$$

**Donde:**

$Y_{ij}$  : Es la variable respuesta.

$\mu$  : Es la media global.

$t_i$  : Efecto del i-ésimo tratamiento.

$e_{ij}$  : Efecto del error experimental.

Los objetivos y variables de estudio y respuesta considerados en el presente trabajo de investigación, se presentan en el Cuadro 10.

**CUADRO 10. CUADRO OPERACIONAL.**

OBJETIVO	VARIABLES		DEFINICIÓN OPERACIONAL	
	ESTUDIO	RESPUESTA	INDICADOR	MÉTODO
Analizar e interpretar el comportamiento de la presión del compresor y tiempo, que permita obtener temperaturas para la fermentación del yogurt.	Tiempo ( <i>min</i> ) Presión del compresor ( <i>bar</i> )	Temperatura de fermentación.	°C	Instrumental.
Analizar e interpretar el comportamiento de la presión del compresor y tiempo, que permita obtener temperaturas para el enfriamiento del yogurt.	Tiempo ( <i>min</i> ) Presión del compresor ( <i>bar</i> )	Temperatura de enfriamiento.	°C	Instrumental.
Determinar el tiempo de batido de yogurt, que permita obtener una consistencia adecuada del producto.	Tiempo ( <i>min</i> )	Viscosidad aparente del yogurt	<i>cp</i>	Instrumental.

**DONDE:** *min* = Minutos; °C = Grados centígrados; y, *cp* = Centipoises.

## IV. RESULTADOS y DISCUSIÓN.

### 4.1. CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPO MULTIPROCESO PARA SISTEMATIZAR LAS ETAPAS DE FERMENTACIÓN, ENFRIAMIENTO y BATIDO DE YOGURT.

#### 4.1.1. DIMENSIONES DEL TANQUE CONTENEDOR.

El Cuadro 11, muestra los resultados obtenidos de los cálculos realizados para determinar las dimensiones del tanque contenedor (capacidad, altura y diámetro).

**CUADRO 11. DIMENSIONES y CAPACIDAD DEL TANQUE.**

VARIABLE	CÁLCULO
CAPACIDAD, $cm^3$	15,000.00
ALTURA, $cm$	27.00
DIÁMETRO, $cm$	27.00

La representación gráfica del tanque contenedor, construido en función de los cálculos presentados en el Cuadro 11, se muestra en la Figura 17; donde, se aprecian las características laterales e interiores del tanque.

**FIGURA 17. TANQUE CONTENEDOR DEL EQUIPO.**



#### 4.1.2. ESPESOR DEL AISLANTE PARA LAS PAREDES DEL TANQUE.

El Cuadro 12, muestra los resultados de los cálculos realizados para determinar el espesor del aislante para las paredes del tanque, tanto para el proceso de Fermentación y Enfriamiento del yogurt.

**CUADRO 12. ESPESOR DE AISLANTE PARA LAS PAREDES DEL TANQUE.**

PROCESO	AISLANTE	ESPESOR, <i>cm</i>
FERMENTACIÓN	Poliuretano	3.50
ENFRIAMIENTO	Poliuretano	5.45
PROMEDIO		4.50

**NOTA:** El valor "Promedio" del espesor del aislante, es el que se consideró para la construcción del equipo multiproceso.

La representación gráfica del espesor de aislante colocado en las paredes del tanque contenedor, se presenta en la Figura 18.

**FIGURA 18. AISLANTE TÉRMICO COLOCADO EN LAS PAREDES DEL TANQUE CONTENEDOR.**



#### 4.1.3. CARGA TÉRMICA DEL TANQUE CONTENEDOR.

Los resultados de los cálculos realizados para determinar la carga térmica del tanque contenedor, tanto para el proceso de Fermentación y Enfriamiento, se presentan en los Cuadros 13 y 14:

**CUADRO 13. CARGA TÉRMICA DEL TANQUE CONTENEDOR EN EL PROCESO DE FERMENTACIÓN.**

TIPO APORTE	SUPERFICIE	ÁREA, m <sup>2</sup>	U (Kcal/h.m <sup>2</sup> .°C)	Q (Kcal/h)
EXTERNO	Pared Lateral	2.54	0.43	-32.77
EXTERNO	Techo	0.57	6.65	-113.72
EXTERNO	Base	0.57	0.43	-7.35
<b>TOTAL:</b>				<b>-153.84</b>

DONDE: U = Coeficiente global de transferencia de calor; y, Q = Cantidad de calor transferido (carga térmica).

**CUADRO 14. CARGA TÉRMICA DEL TANQUE CONTENEDOR EN EL PROCESO DE ENFRIAMIENTO.**

TIPO APORTE	SUPERFICIE	ÁREA, m <sup>2</sup>	U (Kcal/h.m <sup>2</sup> .°C)	Q (Kcal/h)
EXTERNO	Pared Lateral	2.54	0.43	10.92
EXTERNO	Techo	0.57	6.65	37.91
EXTERNO	Base	0.57	0.43	2.45
INTERNO	Producto			1,439.64
<b>TOTAL:</b>				<b>1,490.92</b>

DONDE: U = Coeficiente global de transferencia de calor; y, Q = Cantidad de calor transferido (carga térmica).

#### 4.1.4. SISTEMA DE REFRIGERACIÓN.

En función a las características y propiedades de los refrigerantes (Anexo 4); para el presente Proyecto, se optó por el Refrigerante 22 (Figura 19). Cuyo resumen de temperatura, presión y entalpia, se presenta en el Cuadro 5 y en Diagrama P, h del Refrigerante 22, adjunto en el Anexo 5 del presente Trabajo de Investigación.

**FIGURA 19. REFRIGERANTE 22 UTILIZADO PARA EL SISTEMA.**



#### 4.1.5. DISEÑO DEL EVAPORADOR.

El Cuadro 15, muestra en forma resumida los resultados de los cálculos realizados para determinar las características del evaporador.

**CUADRO 15. RESUMEN DE CARACTERÍSTICAS CALCULADAS PARA EL EVAPORADOR.**

VARIABLE	CÁLCULO
SUPERFICIE DE TRANSFERENCIA, $m^2$	3.73
SUPERFICIE DE ALETAS, $m^2$	3.11
SUPERFICIE DE TUBERÍA, $m^2$	0.62
DIÁMETRO DE TUBERÍA, $mm$ .	8.40
LONGITUD DE TUBERÍA, $ML$ .	21.00

La Figura 20, muestra la representación gráfica del evaporador, construido en función de los cálculos presentados en el Cuadro 15.

**FIGURA 20. EVAPORADOR ACONDICIONADO EN EL TANQUE.**



#### 4.1.6. UNIDAD CONDENSADORA.

La selección de la unidad condensadora para accionar el sistema de refrigeración, estuvo basada en la estimación de la capacidad de calefacción ( $Q_{TC}$ ) y refrigeración ( $Q_{TR}$ ), así como del refrigerante seleccionado para el sistema; siendo estos los que se presentan en el Cuadro 16:

**CUADRO 16. CARACTERÍSTICAS CALCULADAS PARA SELECCIONAR LA UNIDAD CONDENSADORA.**

VARIABLE	CÁLCULO
CAPACIDAD CALEFACCIÓN ( $Q_{TC}$ )	153.84 Kcal/h 0.18 KW
CAPACIDAD REFRIGERACIÓN ( $Q_{TR}$ )	1,490.92 Kcal/h 1.73 KW
REFRIGERANTE	R22

En función a las características técnicas descritas en el Cuadro precedente, la unidad condensadora (Figura 21) elegida del Catálogo de Especificaciones Técnicas, adjunto en el Anexo 10 del presente Proyecto, es:

- Bomba de calor : DAISEIKAIV.
- Unidad exterior : RAS-7PKVP-E.
- Refrigerante : R22.

**FIGURA 21. UNIDAD CONDENSADORA.**



**4.1.7. SELECCIÓN DEL AGITADOR.**

La selección del tipo de agitador, fué dado en función de la viscosidad teórica del producto (yogurt). En este sentido, para una viscosidad calculada de 14.34 Pa.s, correspondió elegir un agitador tipo "Turbina" de cuatro (04) palas planas (Figura 22).



**FIGURA 22. AGITADOR TIPO TURBINA DE 04 PALAS.****4.1.8. POTENCIA DE MOTOR REQUERIDA PARA EL AGITADOR.**

Considerando que el  $N'_{Re}$  calculado para el fluido (yogurt), fué de 1.24; se determinó que el tipo de flujo es Laminar. Asimismo, tomando en consideración que el tipo de rodete elegido para la agitación del producto (yogurt), fué una Turbina de cuatro (04) palas planas; se determinó, que la potencia del motor requerida para accionar dicha Turbina, es de 1.84 W (Figura 23).

**FIGURA 23. MOTOR REDUCTOR PARA EL AGITADOR.**

#### 4.2. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LA PRESIÓN DEL COMPRESOR y TIEMPO EN LA OBTENCIÓN DE TEMPERATURAS PARA LA FERMENTACIÓN DEL YOGURT.

El Cuadro 17, muestra los resultados experimentales correspondientes a los grupos de series de experimentos en los que se evaluó el efecto del Tiempo ( $t$ ) y la Presión del compresor ( $P$ ) para generar temperaturas para la fermentación del yogurt.

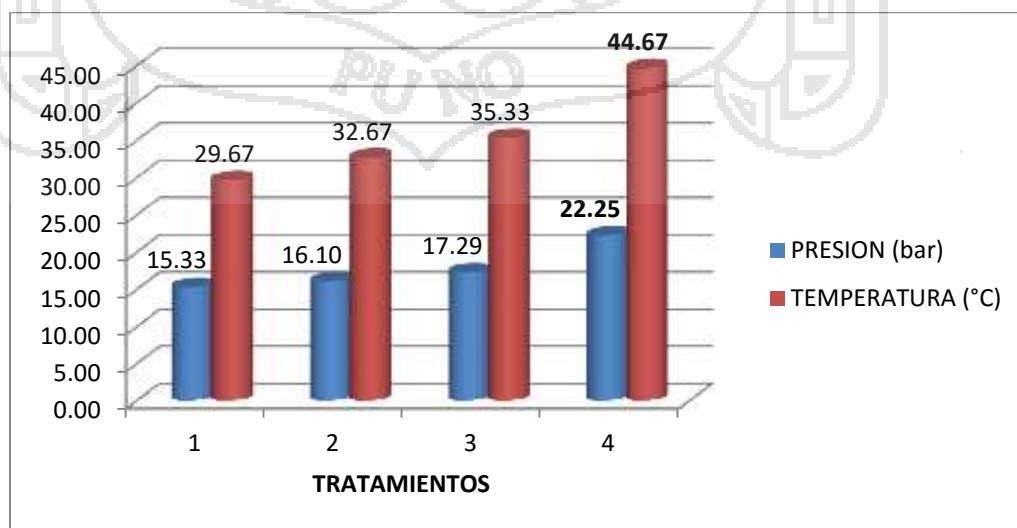
**CUADRO 17. RESULTADOS OBTENIDOS DEL PROCESO DE FERMENTACIÓN.**

$t_1 = 2$ MINUTOS	$t_2 = 2.5$ MINUTOS	$t_3 = 3$ MINUTOS	$t_4 = 5$ MINUTOS
$P_1 = 15.33$ bar	$P_2 = 16.10$ bar	$P_3 = 17.29$ bar	$P_4 = 22.25$ bar
30	33	36	45
30	32	35	44
29	33	35	45
$\bar{x} = 29.67$	$\bar{x} = 32.67$	$\bar{x} = 35.33$	$\bar{x} = 44.67$

**NOTA:** En el Cuadro 17, los resultados experimentales son expresados, en °C.

La representación gráfica de los resultados experimentales mostrados en el Cuadro 17, correspondientes a los grupos de experimentos para generar temperaturas para la fermentación del yogurt, se presenta en la Figura 24.

**FIGURA 24. PROMEDIO DE TEMPERATURAS OBTENIDAS DEL FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO COMO MAQUINA DE FERMENTACIÓN.**



En la Figura 24, los tratamientos 1, 2, 3 y 4, representan los resultados experimentales obtenidos a diferentes tiempos de funcionamiento del equipo, como máquina de fermentación; es así, que para cada tratamiento se representaron los siguientes valores de presión y temperatura: 15.33 *bar* y 29.67 °C, en el primer tratamiento; 16.10 *bar* y 32.67 °C, en el segundo tratamiento; 17.29 *bar* y 35.33 °C, en el tercer tratamiento; y, 22.25 *bar* y 44.67 °C, en el cuarto y último tratamiento.

El incremento paulatino de la presión y temperatura, observado entre cada tratamiento del experimento; revela que el sistema de refrigeración instalado en el equipo multiproceso, tiene la propiedad de incrementar la presión, por ende, la temperatura en el interior del sistema, a medida que transcurre el tiempo de funcionamiento del equipo, como máquina de fermentación.

Según Pita (1991), cuando un sistema de refrigeración opera en el ciclo de calefacción, el refrigerante líquido fluye desde un serpentín interior, que hace de condensador del sistema, a través de un dispositivo de expansión; hasta un serpentín exterior en donde se evapora el refrigerante, absorbiendo calor del aire exterior. Pita (1991), refiere que esto tiene lugar, debido a que la temperatura del aire exterior, es más elevada que la temperatura del refrigerante.

En este contexto, podemos justificar el incremento de la presión y temperatura observado en el interior del sistema, de la manera siguiente: Cuando el equipo opera como máquina de fermentación, el Serpentín instalado en el interior de la unidad condensadora, cumple la función de Evaporador, razón por la cual capta el calor del medio ambiente, a través del fluido refrigerante que circula en su interior; por su parte, el Serpentín acondicionado en las paredes laterales del tanque contenedor, cumple el rol de Condensador del sistema, de manera que disipa el calor excedente captado por el fluido refrigerante en el Evaporador del sistema, produciéndose de esta manera un aumento paulatino de la temperatura en el interior del tanque contenedor.

El calor que paulatinamente se concentra en el interior del tanque contenedor, hace que el fluido refrigerante, no logre eliminar totalmente el exceso de calor captado en el Evaporador del sistema, iniciándose de esta manera, nuevamente el ciclo de calefacción, con el fluido refrigerante ligeramente más caliente, conllevando al incremento paulatino de la presión y temperatura en el interior del sistema, conforme va transcurriendo el tiempo de funcionamiento del equipo, como máquina de fermentación.

Los resultados experimentales reportados en el Cuadro 17, permitieron efectuar el Análisis de Varianza (ANVA); así como, interpretar dicha información estadística, mediante el modelo matemático Diseño Completamente al Azar (DCA).

En el Cuadro 18, se presenta el análisis de varianza de los resultados asociados a los experimentos del proceso estudiado (fermentación), con un nivel de confianza del 99%.

**CUADRO 18. ANVA ASOCIADO A LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS EN EL PROCESO DE FERMENTACIÓN.**

FV	GL	SC	CM	Fc	Ft ( =0.01)	
Tratamiento	3	378.25	126.08	378.25	7.59	**
Error	8	2.67	0.33			
Total	11	380.92				

Del Cuadro 18, se interpreta que para los efectos principales de los factores en estudio: Tiempo ( $t$ ); y, Presión del compresor ( $P$ ), resultaron ser altamente significativos ( =0.01). Lo que indica que los factores involucrados influyen de manera directa en la obtención de temperaturas, para el proceso de fermentación del yogurt.

Si bien, el análisis de varianza presentado en el Cuadro 18, nos muestra que existen diferencias altamente significativas entre las

medias de los tratamientos; este análisis, no nos revela cuales diferencias se pueden considerar estadísticamente significantes. En este sentido, para aclarar dicha ambigüedad, se aplicó la prueba de comparaciones múltiples de medias DUNCAN. Dicha prueba se presenta en el Cuadro 19, con un nivel de confianza del 99%.

**CUADRO 19. COMPARACIÓN DE MEDIAS (DUNCAN) DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN EL PROCESO DE FERMENTACIÓN.**

TRATAMIENTO	MEDIA, °C	SIGNIFICANCIA
4 ( $t_4P_4$ )*	44.67	a
3 ( $t_3P_3$ )*	35.33	b
2 ( $t_2P_2$ )*	32.67	c
1 ( $t_1P_1$ )*	29.67	d

\*  $t$  = Tiempo de funcionamiento del equipo, en *minutos*;  $P$  = Presión del compresor, en *bar*.  
 $t_1=2$  min;  $t_2=2.5$  min;  $t_3=3$  min;  $t_4=5$  min;  $P_1=15.33$  bar;  $P_2=16.10$  bar;  $P_3=17.29$  bar;  $P_4=22.25$  bar.

De la prueba DUNCAN desarrollada en el Cuadro 19, se determina que existen diferencias significativas entre cada una de las medias obtenidas de los resultados experimentales de cada tratamiento. Debiéndose entonces, determinar el tratamiento, donde las condiciones de funcionamiento del equipo (tiempo y presión del compresor), permitan obtener temperaturas adecuadas para la fermentación del yogurt.

Según Spreer (1991), la temperatura de incubación para la obtención de yogurt, debe mantenerse de entre 40 - 45 °C, en un periodo corto de fermentación (que va de 3 a 4 horas), hasta alcanzar una acidez de 0.80% a 1.20% de ácido láctico; ó, un pH de entre 4.41 - 4.50, lo que marca el final de la incubación. Asimismo, refiere que a esa temperatura se logra la acidez, la consistencia y el sabor deseado.

Por su parte, Tamine y Robinson (1991), indican que el proceso de incubación se efectúa óptimamente a una temperatura de 40 a 45 °C, durante 2.5 a 3 horas, hasta que coagule. Asimismo, refieren que este proceso tiene por objeto proporcionar las condiciones de temperatura y

tiempo para que se desarrolle óptimamente el cultivo inoculado, responsable de la fermentación láctica y formación de compuestos responsables del sabor y aroma del yogurt.

En este contexto, en la prueba de comparaciones múltiples de DUNCAN mostrado en el Cuadro 19, se observa que con el Tratamiento 4 ( $t_4 = 5$  minutos;  $P_4 = 22.25$  bar) se obtiene una mejor temperatura para la fermentación de yogurt ( $44.67$  °C), en comparación con las temperaturas obtenidas con los tratamientos 1 ( $t_1P_1$ ), 2 ( $t_2P_2$ ) y 3 ( $t_3P_3$ ).

La aseveración descrita en el párrafo precedente, se fundamenta en el reporte dado por Spreer (1991) y Tamine y Robinson (1991), quienes sugieren que la temperatura de incubación para la obtención de yogurt, debe mantenerse de entre  $40 - 45$  °C, refiriendo además que a esa temperatura se logra la acidez, la consistencia y el sabor deseado.

Habiéndose realizado las pruebas para evaluar el funcionamiento del equipo como máquina de fermentación; se pudo observar que bajo las condiciones obtenidas con el Tratamiento 4, el proceso de fermentación de yogurt se da de forma óptima, reflejándose en la buena conformación y consistencia del coagulo, así como de los aromas deseados producidos al final del proceso fermentativo. Concordando con lo referido por los autores citados en los párrafos precedentes.

#### **4.3. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LA PRESIÓN DEL COMPRESOR y TIEMPO EN LA OBTENCIÓN DE TEMPERATURAS PARA EL ENFRIAMIENTO DEL YOGURT.**

El Cuadro 20, muestra los resultados experimentales correspondientes a los grupos de series de experimentos en los que se evaluó el efecto del Tiempo ( $t$ ) y la Presión del compresor ( $P$ ) para generar temperaturas para el enfriamiento del yogurt.

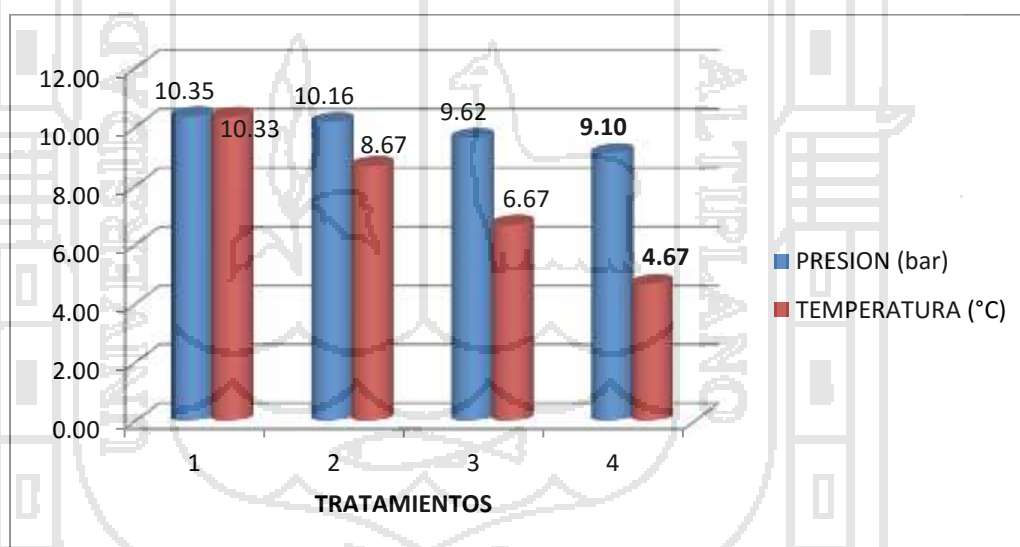
### CUADRO 20. RESULTADOS OBTENIDOS DEL PROCESO DE ENFRIAMIENTO.

$t_1 = 5$ MINUTOS	$t_2 = 8$ MINUTOS	$t_3 = 11$ MINUTOS	$t_4 = 15$ MINUTOS
$P_1 = 10.35$ bar	$P_2 = 10.16$ bar	$P_3 = 9.62$ bar	$P_4 = 9.10$ bar
10	9	6	5
10	8	7	4
11	9	7	5
$\bar{x} = 10.33$	$\bar{x} = 8.67$	$\bar{x} = 6.67$	$\bar{x} = 4.67$

NOTA: En el Cuadro 20, los resultados experimentales son expresados, en °C.

La representación gráfica de los resultados experimentales mostrados en el Cuadro 20, correspondientes a los grupos de experimentos para generar temperaturas para el enfriamiento del yogurt, se presenta en la Figura 25.

**FIGURA 25. PROMEDIO DE TEMPERATURAS OBTENIDAS DEL FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO COMO MAQUINA DE ENFRIAMIENTO.**



En la Figura 25, los tratamientos 1, 2, 3 y 4, representan los resultados experimentales obtenidos a diferentes tiempos de funcionamiento del equipo, como máquina de enfriamiento; es así, que para cada tratamiento se representaron los siguientes valores de presión y temperatura: 10.35 bar y 10.33 °C, en el primer tratamiento; 10.16 bar y 8.67 °C, en el segundo tratamiento; 9.62 bar y 6.67 °C, en el tercer tratamiento; y, 9.10 bar y 4.67 °C, en el cuarto y último tratamiento.

El descenso paulatino de la presión y temperatura, observado entre cada tratamiento del experimento; revela que el sistema de refrigeración instalado en el equipo multiproceso, tiene la propiedad de descender la presión, por ende, la temperatura en el interior del sistema, a medida que transcurre el tiempo de funcionamiento del equipo, como máquina de enfriamiento.

Según Pita (1991), cuando un sistema de refrigeración opera en el ciclo de enfriamiento, el gas de descarga fluye a un serpentín exterior, el cual hace las veces de un condensador enfriado por aire; por otro lado, el refrigerante líquido, fluye a través del dispositivo de expansión, hasta el serpentín interior que sirve de evaporador del sistema, enfriando de esta manera al producto, debido a que su temperatura es más elevada que la temperatura del refrigerante.

En este contexto, podemos justificar el descenso de la presión y temperatura observado en el interior del sistema, de la manera siguiente: Cuando el equipo opera como máquina de enfriamiento, el Serpentín acondicionado en las paredes laterales del tanque contenedor, cumple la función de Evaporador, razón por la cual capta el calor del interior del tanque contenedor, a través del fluido refrigerante que circula en su interior; por su parte, el Serpentín instalado en el interior de la unidad condensadora, cumple el rol de Condensador del sistema, de manera que disipa el calor excedente captado por el fluido refrigerante en el Evaporador del sistema, produciéndose de esta manera un descenso paulatino de la temperatura en el interior del tanque contenedor.

Debido a que paulatinamente el fluido refrigerante capta y extrae calor del interior del tanque contenedor, a través del Evaporador del sistema; es que se inicia de esta manera, nuevamente el ciclo de enfriamiento, con el fluido refrigerante ligeramente más frío, conllevando al descenso paulatino de la presión y temperatura en el interior del sistema, conforme va transcurriendo el tiempo de funcionamiento del equipo, como máquina de enfriamiento.



Los resultados experimentales reportados en el Cuadro 20, permitieron efectuar el Análisis de Varianza (ANVA); así como, interpretar dicha información estadística, mediante el modelo matemático Diseño Completamente al Azar (DCA).

En el Cuadro 21, se presenta el resumen del análisis de varianza de los resultados asociados a los experimentos del proceso estudiado (enfriamiento), con un nivel de confianza del 99%.

**CUADRO 21. ANVA ASOCIADO A LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS EN EL PROCESO DE ENFRIAMIENTO.**

FV	GL	SC	CM	Fc	Ft ( =0.01)	
Tratamiento	3	54.25	18.08	54.25	7.59	**
Error	8	2.67	0.33			
Total	11	56.92				

Del Cuadro 21, se interpreta que para los efectos principales de los factores en estudio: Tiempo ( $t$ ); y, Presión del compresor ( $P$ ), resultaron ser altamente significativos ( $\alpha = 0.01$ ). Lo que indica que los factores involucrados influyen de manera directa en la obtención de temperaturas, para el proceso de enfriamiento del yogurt.

Si bien, el análisis de varianza resumido en el Cuadro 21, nos muestra que existen diferencias altamente significativas entre las medias de los tratamientos; este análisis, no nos revela cuales diferencias se pueden considerar estadísticamente significantes. En este sentido, para aclarar dicha ambigüedad, se aplicó la prueba de comparaciones múltiples de medias DUNCAN. Dicha prueba se presenta en el Cuadro 22, con un nivel de confianza del 99%.

De la prueba DUNCAN desarrollada en el Cuadro 22, se determina que existen diferencias significativas entre cada una de las medias obtenidas de los resultados experimentales de cada tratamiento. Debiéndose

entonces, determinar el tratamiento, donde las condiciones de funcionamiento del equipo (tiempo y presión del compresor), permitan obtener temperaturas adecuadas para el enfriamiento del yogurt.

**CUADRO 22. COMPARACIÓN DE MEDIAS (DUNCAN) DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN EL PROCESO DE ENFRIAMIENTO.**

TRATAMIENTO	MEDIA, °C	SIGNIFICANCIA
1 ( $t_1P_1$ )*	10.33	a
2 ( $t_2P_2$ )*	8.67	b
3 ( $t_3P_3$ )*	6.67	c
4 ( $t_4P_4$ )*	<b>4.67</b>	d

\*  $t$  = Tiempo de funcionamiento del equipo, en minutos;  $P$  = Presión del compresor, en bar.  
 $t_1=5$  min;  $t_2=8$  min;  $t_3=11$  min;  $t_4=15$  min;  $P_1=10.35$  bar;  $P_2=10.16$  bar;  $P_3=9.62$  bar;  $P_4=9.10$  bar.

Según Reyes (2008), la temperatura de enfriamiento, debe mantenerse en 5 °C, hasta alcanzar una temperatura de 20 °C en el producto, lo que marca el final del enfriamiento.

Reyes (2008), refiere que la temperatura se disminuye rápidamente a 20 °C, para detener la fermentación y evitar la sobre acidificación; en esta etapa se realiza el batido, la adicción de los aromatizantes y el envasado. Si se envasa a temperaturas más bajas, se destruyen las estructuras de las proteínas, y no es posible conformarla otra vez a las temperaturas de almacenamiento.

Tamine y Robinson (1991), indican que el enfriamiento del coágulo (de manera rápida), llega a controlar la acidez del producto, reduciendo la actividad metabólica del cultivo; afirmando que de lo contrario, se tendrá una acidez excesiva en el producto.

Gómez (1999), refiere que el enfriamiento se debe realizar con la mayor brusquedad posible para evitar que el yogurt siga acidificándose en más de 0.3 unidades de pH, cuando mucho se debe alcanzar una temperatura de 15 °C en 1.5 - 2.0 horas.

Según Gómez (1999), el proceso de enfriamiento puede realizarse en dos (02) fases, durante la primera fase del proceso, se reduce la temperatura del coágulo de 30 - 45 °C a 15 - 20 °C, antes de la adición de los aromatizantes y del envasado; y, en la segunda fase de enfriamiento, el yogurt se enfría hasta temperaturas inferiores a 10 °C. Aclarando que el enfriamiento final, debe ser por tanto en el envase de comercialización.

En este contexto, en la prueba de comparaciones múltiples de DUNCAN mostrado en el Cuadro 22, se observa que con el Tratamiento 4 ( $t_4 = 15$  minutos;  $P_4 = 9.10$  bar) se obtiene una mejor temperatura para el enfriamiento de yogurt (4.67 °C), en comparación con las temperaturas obtenidas con los tratamientos 1 ( $t_1P_1$ ), 2 ( $t_2P_2$ ) y 3 ( $t_3P_3$ ).

La aseveración descrita en el párrafo precedente, se fundamenta en el reporte dado por Reyes (2008), quien sugiere que la temperatura para el enfriamiento del yogurt, debe mantenerse en 5 °C, hasta alcanzar una temperatura de 20 °C en el producto.

En este sentido, Gómez (1999) concuerda con Reyes (2008), en el hecho de que la temperatura debe reducirse hasta los 20 °C, temperatura a la cual puede realizarse eficientemente el batido, la adición de los aromatizantes y el envasado del yogurt.

Habiéndose realizado las pruebas para evaluar el funcionamiento del equipo como máquina de enfriamiento; se pudo observar que bajo las condiciones obtenidas con el Tratamiento 4, el proceso de enfriamiento de yogurt se da de forma óptima, reflejándose en el rápido descenso de la temperatura en el coágulo de yogurt, hasta la temperatura recomendada para iniciar el proceso de batido, adición de los aromatizantes y el envasado del yogurt.

#### 4.4. BATIDO DE YOGURT.

Según Robinson (1991), la inoculación del cultivo bacteriano, el batido del coágulo, así como el enfriamiento y la incorporación de los aromas y sabores, se realiza a velocidad lenta (17 - 20 *rpm*).

Es así, que en el presente Proyecto de Investigación, el proceso de batido de yogurt, se realizó a una velocidad constante de 20 *rpm*, por un tiempo de 30 minutos. Tiempo en el cual, el producto logra tener una consistencia fina y fluida. Adquiriendo de esta manera, características reológicas propias de un yogurt líquido bebible comercial.

Las propiedades reológicas de los alimentos son importantes para diseñar el proceso del fluido, control de calidad, almacenamiento, procesamiento y predecir la textura del alimento. La textura que se da durante la coagulación del yogurt, es una característica importante que determina la aceptabilidad del producto, Shaker *et al.* (2009).

En el análisis reológico del yogurt batido a 20 *rpm*, por un lapso de tiempo de 30 minutos (Anexo 10), se reporta que el índice de flujo (*n*) del producto (yogurt batido), es de 0.05; dándonos a entender que el fluido es más denso, cuando el movimiento de la velocidad es de 10 *rpm*; asimismo, el análisis también reporta que el índice de consistencia (*K*) del producto, es de 6,413; dándonos a entender que el fluido (yogurt), es más denso o viscoso cuando se encuentra en estado de reposo.

En términos generales, el comportamiento de la viscosidad, se clasifica en dos (02) grandes grupos: "Newtoniano" y "No-Newtoniano". La clasificación de un producto en estas categorías, depende del valor del "Índice de Flujo" (*n*), en el modelo conocido como "Power Law", Toledo (1994).

$$t = Kx^n$$

En este modelo, cuando  $n = 1$ , el fluido se conoce como Newtoniano, Si  $n < 1$ , se conoce como un fluido pseudoplástico. Si, por el contrario,  $n > 1$ , se conoce como un fluido dilatante, Toledo (1994).

De acuerdo a lo citado por Toledo (1994) en el párrafo precedente, y habiéndose determinado que el índice de flujo ( $n$ ) del yogurt batido, es menor a 1 ( $n < 1$ ), se establece que el fluido analizado (yogurt) presenta un comportamiento pseudoplástico. Este comportamiento, nos indica que al aplicar mayor velocidad de movimiento, la viscosidad aparente del yogurt desciende.

Geankoplis (1998), indica que en los fluidos Pseudoplásticos ( $n < 1$ ), la viscosidad aparente no es constante, y varía con las velocidades de corte o con los gradientes de velocidad en el recipiente; asimismo, para determinar la viscosidad aparente, plantea el uso la siguiente Ecuación:

$$\tau_a = (11N)^{n-1} \times K$$

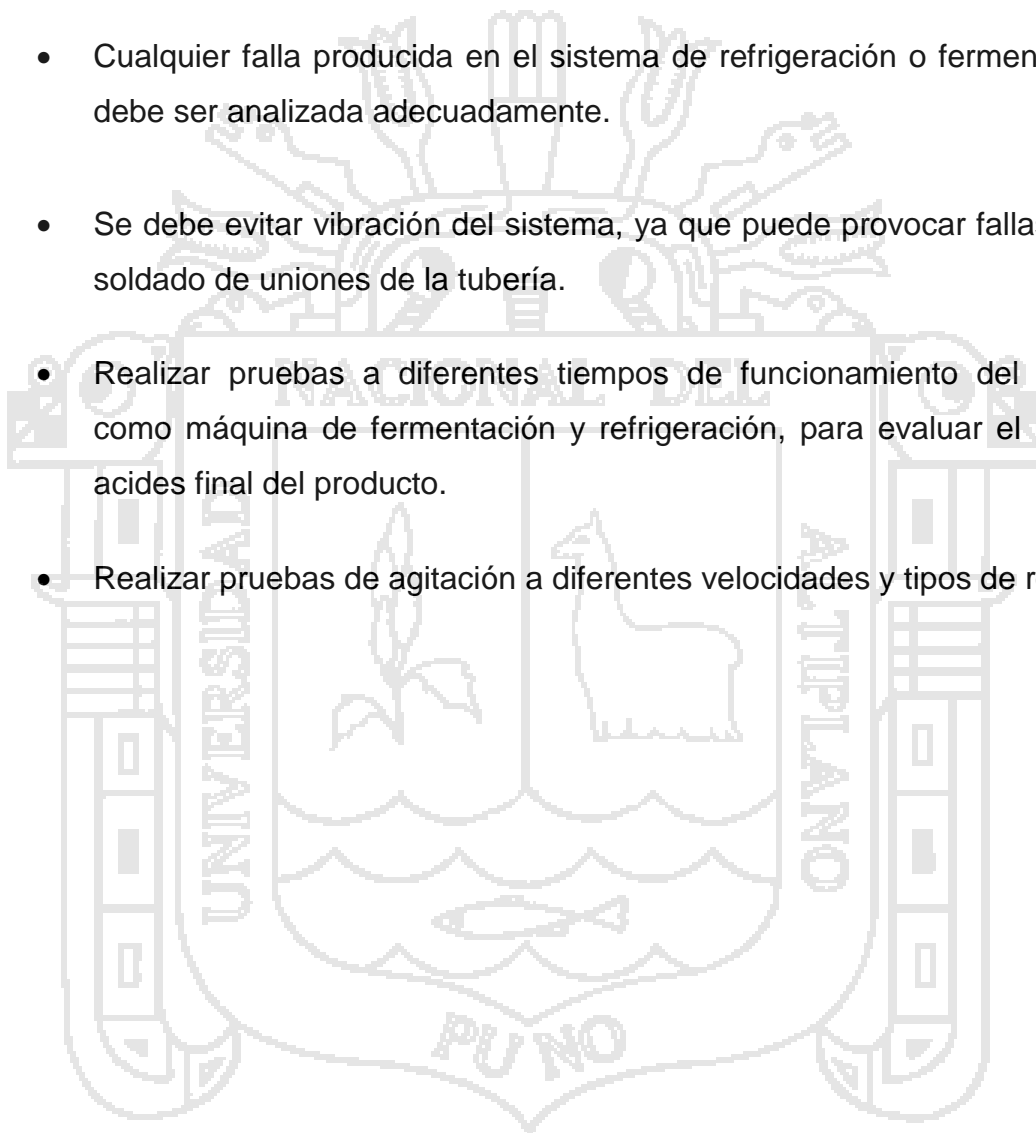
En este contexto, realizado el análisis reológico del yogurt batido (Anexo 11), y habiéndose determinado el índice de consistencia ( $K = 6,413$ ) e índice de flujo ( $n = 0.05$ ) del producto; se pudo establecer que el yogurt presenta un comportamiento pseudoplástico ( $n < 1$ ). Condiciones que permitieron determinar la viscosidad del producto, siendo de 3,605.64 *cp* a 10 *rpm*.

## V. CONCLUSIONES.

- Las características del equipo multiproceso para sistematizar las etapas de fermentación, enfriamiento y batido de yogurt, son: La capacidad del tanque contenedor fué de  $15,000 \text{ cm}^3$ . El aislante térmico empleado fué el Poliuretano, cuyo espesor fué de  $5.00 \text{ cm}$ . La carga térmica del tanque contenedor, fué de  $-153.84 \text{ Kcal/h}$  para el proceso de fermentación y de  $1,490.92 \text{ Kcal/h}$  para el proceso de enfriamiento. La superficie de transferencia de calor del evaporador fué de  $3.73 \text{ m}^2$ ;  $3.11 \text{ m}^2$  en aletas y  $0.62 \text{ m}^2$  en la tubería. La longitud de la tubería del evaporador fué de  $21 \text{ ML}$ , con un diámetro interior de  $8.40 \text{ mm}$ . La unidad condensadora seleccionada, estuvo conformada por una bomba de calor DAISEIKAIV y una unidad exterior RAS-7PKVP-E. El agitador elegido fué de tipo "Turbina", conformado por cuatro (04) palas planas, requiriéndose de un motor de  $1.84 \text{ W}$  de potencia, para accionar dicha Turbina.
- Para obtener temperaturas para la fermentación del yogurt, se requirió mantener el equipo encendido por un lapso de tiempo de 5 minutos; tiempo en el cual, la presión del compresor alcanzó  $22.25 \text{ bar}$  y una temperatura promedio de  $44.67 \text{ }^\circ\text{C}$ .
- Para obtener temperaturas para el enfriamiento del yogurt, se requirió mantener el equipo encendido por un lapso de tiempo de 15 minutos; tiempo en el cual, la presión del compresor alcanzó  $9.10 \text{ bar}$  y una temperatura promedio de  $4.67 \text{ }^\circ\text{C}$ .
- El tiempo de batido de yogurt, que permitió obtener una consistencia adecuada del producto, es de 30 minutos a una velocidad constante de  $20 \text{ rpm}$ , con un agitador tipo Turbina de cuatro (04) palas planas.

## VI. RECOMENDACIONES.

- Se debe tener cuidado al momento de realizar las conexiones respectivas para el funcionamiento adecuado del equipo; así como, al momento de cambiar la temperatura de fermentación a la temperatura de refrigeración en el termostato.
- Cualquier falla producida en el sistema de refrigeración o fermentación, debe ser analizada adecuadamente.
- Se debe evitar vibración del sistema, ya que puede provocar fallas en el soldado de uniones de la tubería.
- Realizar pruebas a diferentes tiempos de funcionamiento del equipo como máquina de fermentación y refrigeración, para evaluar el pH y/o acides final del producto.
- Realizar pruebas de agitación a diferentes velocidades y tipos de rodete.



## VII. BIBLIOGRAFÍA CITADA.

1. ASHRAE Handbook. 1997. Fundamentals SI Edition, Ed. ASHRAE.
2. Codex Alimentarius. 2003. Codex Stan 243-2003 1, Norma del Codex para leches fermentadas.
3. Coronel, J. F. 2006. Colección de transparencias de tecnología frigorífica, Universidad de Sevilla, España.
4. Barrio, J. P. y Morales, W. 1995. Refrigeración doméstica, Oficina de Bienes y Prestación de Servicios, Universidad Nacional de Ingeniería Lima, Perú.
5. Bocanegra, L. 1999. Seminario de refrigeración, Universidad Nacional de Ingeniería Lima, Perú.
6. Díaz, P. 1994. Transferencia de calor, teoría y problemas resueltos, Segunda Edición.
7. Dossat, R. J. 1980. Principios de refrigeración, Primera edición, Compañía Editorial Continental S.A. de C.V., México D.F.
8. Dossat, R. J. 1998. Principios de refrigeración, Décima octava reimpresión, Compañía Editorial Continental S.A. de C.V. México.
9. Empresa de Generación Eléctrica San Gabán S.A. 1998. Manual de equipos de enfriamiento Carrier.
10. García, M. J. 1994. Efecto de estabilizantes sobre el desuerado de yogur batido, Tesis UACH - Chapingo, México.
11. Geankoplis, C. J. 1998. Procesos de transporte y operaciones unitarias, Editorial Continental S.A. de C.V., México.



12. Gómez, J. C. 1999. Tesis “Método de control de acides de yogur”, Universidad Autónoma Chapingo, México.
13. Hayes, G. D. 1987. Food engineering data handbook, First Edition is published by arrangement with Longman Group UK Limited, London.
14. Hernández, E. 1990. Calefacción, aire acondicionado y refrigeración, Ediciones de Ciencia y Técnica S.A., Primera Edición, México.
15. Muñoz, C. 1994. Como elaborar y asesorar una investigación de tesis, Mac Graw Hill, Tercera Edición, España.
16. Nakamura, J. 1991. Termodinámica para ingenieros, W.H. Editores S.R. Ltda., Universidad de Ingeniería Lima, Perú.
17. Pilligua, L. I. 2006. Tesis “Diseño de un software para calcular cámaras frigoríficas”, Universidad Politécnica del Litoral Guayaquil, Ecuador.
18. Pita, E. G. 1991. Principios y sistema de refrigeración, Editorial LIMUSA S.A. de C.V., México D.F.
19. Postigo, J. y Cruz, J. F. 2000. Termodinámica aplicada, W.H. Editores S.R. Ltda., Segunda Edición, Universidad de Ingeniería Lima, Perú.
20. Refrigeración FH S.A. Fabricantes. 1999. Manual de refrigeración básica, Edición Revisada, Arequipa, Perú.
21. RETER E.I.R.L. 2002. Manual de refrigeración termodinámica, Lima, Perú.
22. Reyes, C. I. 2008. Tesis “Propuesta para tecnificar la producción artesanal de yogur probiótico”, USC, Guatemala.
23. Sánchez, M. A. 1992. Tesis “Evaluación de diferentes lactobacillus en la elaboración de un producto tipo yogurt”, UNAM, México.

24. Sanguinetti, E. 1995. Tratado práctico de refrigeración, Editado por Tecnilibros S.A., Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Mecánica, Lima, Perú.
25. Shaker, R. R., Jumah, R. Y. y Abu-Jdayil, B. 2000. Rheological properties of plain yogurt during coagulation process: impact of fat content and preheat treatment of milk, J. Food Engineering.
26. Spreer, E. 1991. Lactología industrial. Editorial Acribia. Zaragoza, España.
27. Stephen, M. E. y Quaid, W. M. 1978. Manual de refrigeração e aire condicionado, Editora Mc Graw - Hill do Brasil Ltda.
28. Stoecker, W. F. 1965. Refrigeración y acondicionamiento de aire, Ediciones del Castillo S.A. Madrid, España.
29. Stoecker, W. F. y Jones, J. W. 1985. Refrigeração e aire condicionado, Primeira Impression. Editora Mc Graw - Hill do Brasil Ltda., São Paulo, SP - Brasil.
30. Tamine, A. Y. y Robinson, R. K. 1991. Yogurt, ciencia y tecnología. Editorial Acribia, Zaragoza, España.
31. Toledo, R. T. 1994. Fundamentals of food process engineering, Second Edition.
32. Vélez, R. J. y Barbosa, C. P. 1997. Rheological properties of selected dairy products, Critical Reviews in Food Science and Nutrition.
33. Vélez, J. 2003. Apuntes propiedades físicas en alimentos, UDLA Puebla, México.

## VIII. ANEXOS.

### ANEXO 1. PROPIEDADES DE LOS METALES y NO METALES.

MATERIAL	CONDUCTIVIDAD TÉRMICA, <i>W/m.°C</i>	CALOR ESPECIFICO, <i>KJ/Kg.°C</i>	DENSIDAD, <i>Kg/m<sup>3</sup></i>	TEMPERATURA, <i>°C</i>
<b>1. METALES</b>				
Aluminio	220	0.87	2,640	0
Latón	97	0.38	8,650	0
Hierro fundido	55	0.42	7,210	0
Cobre	388	0.38	8,900	0
Acero (Plancha negra)	45	0.47	7,840	18
Acero (inoxidable)	20	0.48	7,950	20
<b>2. NO METALES</b>				
Asbesto (lamina)	0.17	0.84	890	51
Ladrillo	0.70	0.92	1,760	20
Cartón	0.07	1.26	640	20
Hormigón	0.87	1.05	2,000	20
Celuloide	0.21	1.55	1,400	30
Algodón en rama	0.04	1.26	80	30
Corcho	0.043	1.55	160	30
Goma expandida	0.04		72	0
Fibra vulcanizada	0.052		240	21
Vidrio, soldado	0.52	0.84	2,240	20
Hielo	2.25	2.10	920	0
Lana mineral	0.04		145	30
Polietileno	0.55	2.30	950	20
Espuma de poliestireno	0.036		24	0
Espuma de poliuretano	0.026		32	0
Cloruro de polivinilico	0.29	1.30	1,400	20
Virutas de madera	0.09	2.50	150	0
Madera	0.28	2.50	700	30

FUENTE: HAYES G. D. (1987).

## ANEXO 2. PROPIEDADES FÍSICAS y QUÍMICAS DE LOS ALIMENTOS.

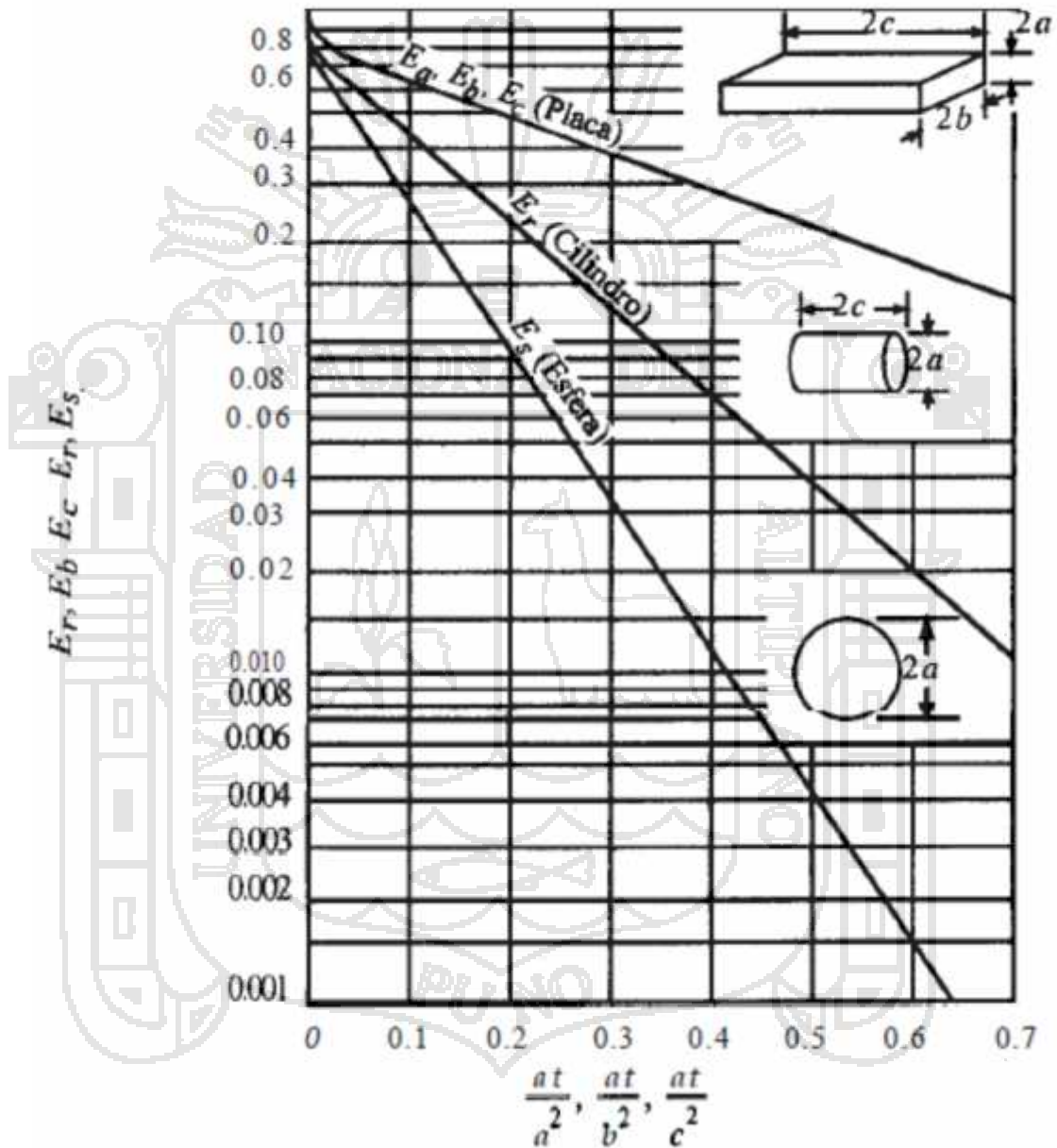
TIPO DE ALIMENTO	% DE AGUA	pH	PUNTO DE CONGELACIÓN, °C	CALOR ESPECÍFICO, KJ/Kg.°C		CALOR LATENTE, KJ/Kg	CONDUCTIVIDAD TÉRMICA, W/m.°C
				A*	B*		
<b>FRUTAS:</b>							
Manzana	80 - 84	3.00 - 3.30	-2	3.60	1.88	280	0.39 - 0.42
Plátano	75 - 76	-	-2	3.35	1.76	255	-
Pomelo	89	-	-2	3.81	1.93	293	0.40 - 0.45
Naranja	87	3.20 - 3.80	-2	3.77	1.93	288	0.43
Melocotón	87	3.40 - 3.60	-2	3.78	1.93	289	0.35 - 0.45
Piña	85	-	-2	3.68	1.88	285	0.35 - 0.45
Sandia	92	-	-2	4.06	2.01	306	0.56 - 0.63
<b>HORTALIZAS:</b>							
Espárragos	93	5.60 - 5.70	-1	3.93	2.01	310	-
Judías verdes	89	-	-1	3.81	1.97	297	0.39 - 0.92
Repollo	92	5.10 - 5.30	-1	3.93	1.97	306	-
Zanahoria	88	-	-1	3.60	1.88	293	0.62 - 0.67
Maíz	76	6.30 - 6.50	-1	3.35	1.80	251	0.14 - 0.18
Guisantes	74	6.10 - 6.30	-1	3.31	1.76	247	0.32 - 0.48
Patatas	80	5.40 - 5.80	-2	3.39	1.74	258	0.55
Tomates	95	-	-1	3.98	2.01	310	0.40 - 0.66
<b>CARNES:</b>							
Bacon	20	-	-	2.09	1.26	71	-
Vacuno	75 - 79	5.50 - 6.50	-2	3.22	1.67	255	0.43 - 0.48
Pescado	70	6.00	-2	3.18	1.67	276	0.56
Cordero	70 - 80	-	-2	3.18	1.67	276	0.42 - 0.45
Cerdo	60 - 76	-	-2	3.18	1.67	276	0.44 - 1.30
Aves	69 - 75	6.40 - 6.60	-2	-	-	-	0.41 - 0.52
Ternera	63	-	-2	2.97	1.67	209	0.44 - 0.49
<b>MISCELÁNEOS:</b>							
Cerveza	92	4.10 - 4.30	-2	4.19	2.01	301	0.52 - 0.64
Pan	32 - 37	-	-2	2.93	1.42	109 - 121	-
Mantequilla	15 - 16	-	-	1.40 - 2.70	1.20	53.50	0.197
Cereales	12 - 14	-	-	1.50 - 1.90	1.20	-	0.13 - 0.18
Queso	30 - 38	4.00 - 6.50	-2	1.94	1.24	-	-
Chocolate	55	-	-1	1.26	2.30	93	-
Nata, 40% de grasa	73	-	-2	3.52	1.65	-	0.33
Huevos	49	-	-3	3.20	1.67	276	0.34 - 0.62
Helados	58 - 66	-	-3, -18	3.30	1.88	222	-
Leche	87.50	6.50 - 6.70	-1	3.90	2.05	289	0.53
Zumo de naranja	89	3.90	-	-	-	-	0.48 - 0.68
Uvas pasas	24.50	3.60 - 4.20	-	1.94	-	-	0.55
Salchichas	65	-	-3	3.68	2.32	216	0.38 - 0.43
Salmon	64	6.20 - 6.40	-3	2.97	1.84	-	0.50 - 1.30
Yogurt	-	4.00 - 4.50	-	-	-	-	0.53 - 0.67

\* A = Por encima del punto de congelación; B = Por debajo del punto de congelación.

FUENTE: HAYES G. D. (1987).

**ANEXO 3. GRÁFICA DE CONDUCCIÓN EN ESTADO NO ESTACIONARIO y TEMPERATURAS PROMEDIO PARA RESISTENCIAS SUPERFICIALES DESPRECIABLES.**

$$E = \frac{T_1 - T_{prom}}{T_1 - T_0}$$



FUENTE: GEANKOPLIS (1998).

## ANEXO 4. CARACTERÍSTICAS y PROPIEDADES DEL REFRIGERANTE 22.

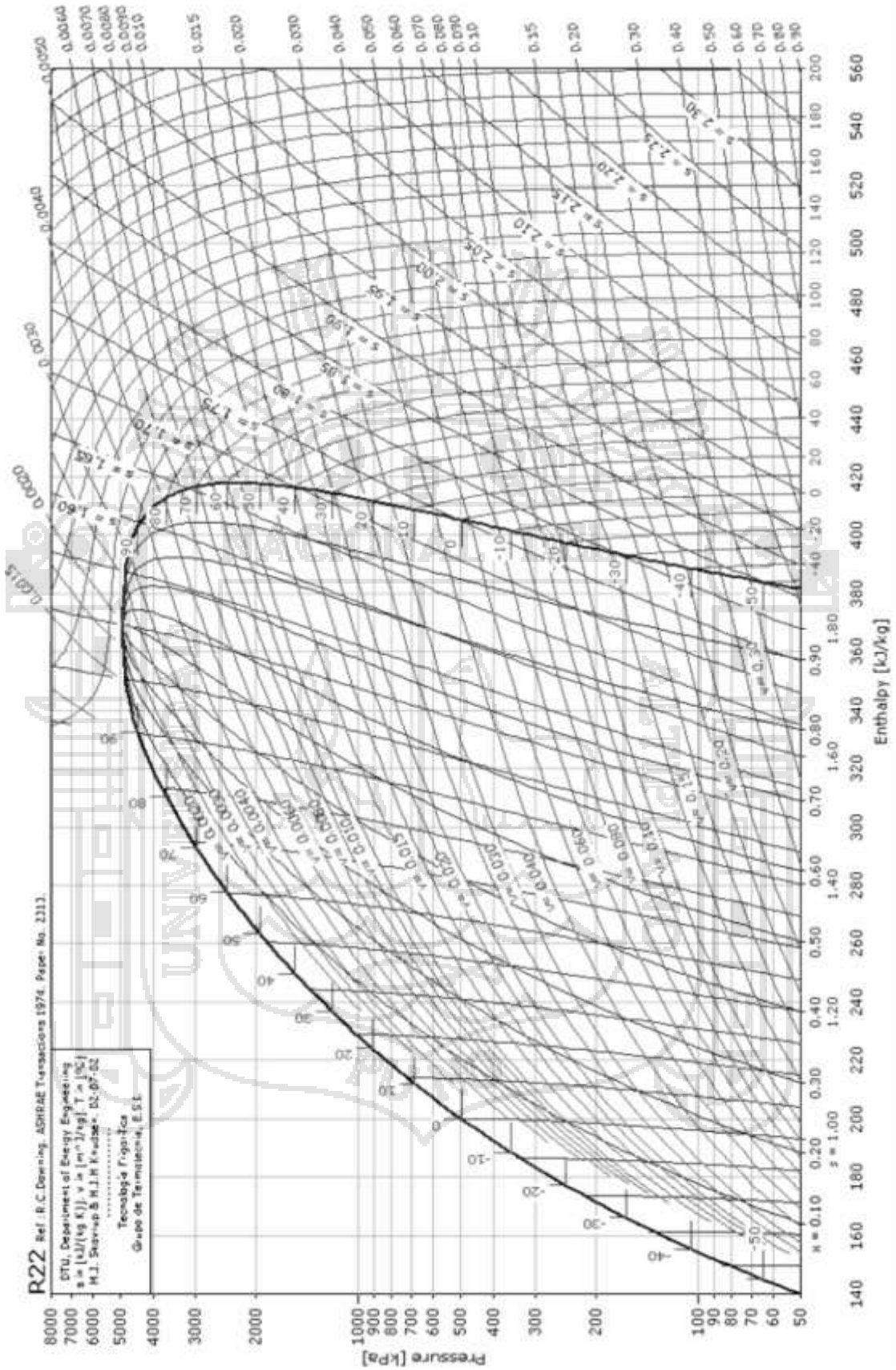
COMPUESTO QUÍMICO:	Dioflur monocloro metano.
FORMULA QUÍMICA:	CHCIF <sub>2</sub>
DESIGNACIÓN COMERCIAL:	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Freon-22;</li> <li>• Generatron-22; y,</li> <li>• Frigen-22.</li> </ul>
MASA MOLECULAR:	86.48
CARACTERÍSTICAS:	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estable;</li> <li>• No toxico;</li> <li>• No corrosivo; y,</li> <li>• No inflamable.</li> </ul>
PRESIONES DE OPERACIÓN:	43 <i>psi</i> (290 <i>KN/m</i> <sup>2</sup> ) a -15 °C (5 °F); 173 <i>psi</i> (1,175 <i>KN/m</i> <sup>2</sup> ) a 30 °C (86 °F).
CALOR LATENTE:	93.21 <i>BTU/Lb</i> (216.50 <i>KJ/Kg</i> ) a -15 °C (5 °F).
VOLUMEN ESPECÍFICO:	1.24 <i>ft</i> <sup>3</sup> / <i>Lb</i> a 5 °F (-15 °C).
PRESIÓN CRITICA:	716 <i>psi</i> (4,870 <i>KN/m</i> <sup>2</sup> ).
TEMPERATURA CRITICA:	205 °F (96 °C).

FUENTE: RETER E.I.R.L. (2002).

Las condiciones que cumple el R22 para ser usado como refrigerante, son:

- Presiones de evaporador y condensador convenientes. Es decir, que con respecto a la presión atmosférica, la presión del condensador no es muy alta; así como, la presión del evaporador, no es muy baja;
- Calor latente de evaporación alto, e igualmente, alto calor específico del vapor, a la presión del evaporador;
- Volumen específico de vapor a la presión del evaporador, reducido;
- No ataca químicamente, ni al aceite lubricante, ni al material comúnmente utilizado en la instalación; y,
- Bajo costo.

**ANEXO 5. DIAGRAMA P - h DEL REFRIGERANTE 22.**



FUENTE: ASHRAE Handbook (1997).

**ANEXO 6. TABLA DE SATURACIÓN R22.**



T (° C)	Presión absoluta (bar)	Densidad líquido (dm <sup>3</sup> /kg)	Densid. vapor (dm <sup>3</sup> /kg)	Densidad líquido (kg/m <sup>3</sup> )	Densid. vapor (kg/m <sup>3</sup> )	Entalpía líquido (kJ/kg)	Entalpía vapor (kJ/kg)	Calor lat. Vaporiz. (kJ/kg)	Entropía líquido (kJ/(kg.K))	Entropía vapor (kJ/(kg.K))
-70	0,205	0,670	941,552	1493,192	1,062	124,7	374,1	249,4	0,684	1,912
-65	0,280	0,676	705,906	1479,741	1,417	129,6	376,6	246,9	0,708	1,895
-60	0,375	0,682	537,464	1466,121	1,861	134,6	379,0	244,4	0,732	1,878
-55	0,495	0,689	415,055	1452,324	2,409	139,7	381,4	241,7	0,755	1,864
-50	0,644	0,695	324,726	1438,337	3,080	144,8	383,8	239,0	0,779	1,850
-45	0,827	0,702	257,112	1424,150	3,889	150,1	386,2	236,2	0,802	1,837
-40	1,049	0,709	205,842	1409,749	4,858	155,3	388,5	233,2	0,825	1,825
-35	1,316	0,717	166,474	1395,122	6,007	160,7	390,8	230,2	0,847	1,814
-30	1,634	0,725	135,901	1380,251	7,358	166,1	393,1	227,0	0,869	1,803
-25	2,009	0,733	111,004	1365,120	8,936	171,5	395,3	223,7	0,892	1,793
-20	2,447	0,741	92,109	1349,710	10,767	177,1	397,4	220,4	0,914	1,784
-15	2,956	0,750	77,454	1334,000	12,878	182,7	399,5	216,8	0,935	1,775
-10	3,542	0,759	65,363	1317,966	15,299	188,4	401,6	213,2	0,957	1,767
-5	4,212	0,768	55,358	1301,581	18,064	194,2	403,5	209,3	0,979	1,759
0	4,975	0,778	47,150	1284,815	21,209	200,0	405,4	205,4	1,000	1,752
5	5,836	0,789	40,368	1267,632	24,772	205,9	407,2	201,3	1,021	1,745
10	6,805	0,800	34,724	1249,994	28,799	211,9	408,9	197,0	1,042	1,738
15	7,890	0,812	29,996	1231,854	33,338	218,0	410,5	192,5	1,063	1,731
20	9,097	0,824	26,010	1213,158	38,446	224,1	412,0	187,9	1,084	1,725
25	10,447	0,838	22,630	1193,844	44,189	230,4	413,4	183,0	1,105	1,719
30	11,917	0,852	19,747	1173,836	50,642	236,8	414,6	177,8	1,126	1,712
35	13,546	0,867	17,273	1153,044	57,895	243,2	415,8	172,5	1,146	1,706
40	15,333	0,884	15,139	1131,356	66,056	249,8	416,7	166,9	1,167	1,700
45	17,288	0,902	13,287	1108,637	75,261	256,5	417,5	160,9	1,188	1,694
50	19,420	0,922	11,672	1084,712	85,677	263,4	418,0	154,6	1,209	1,687
55	21,742	0,944	10,254	1059,355	97,521	270,5	418,3	147,8	1,230	1,680
60	24,263	0,969	9,002	1032,265	111,08	277,8	418,3	140,5	1,251	1,673
65	26,996	0,997	7,889	1003,027	126,76	285,4	418,0	132,6	1,273	1,665
70	29,956	1,030	6,890	971,035	145,13	293,3	417,1	123,8	1,295	1,656

FUENTE: CORONEL, J. F. (2006).



**ANEXO 7. DIFERENCIA DE TEMPERATURA ENTRE TEMPERATURA DE EVAPORACIÓN DEL REFRIGERANTE y DEL MEDIO AMBIENTE INTERIOR.**

MEDIO ENFRIANTE AIRE	T DIFERENCIA DE TEMPERATURA ENTRE TEMPERATURA DE EVAPORACIÓN DEL REFRIGERANTE y DEL MEDIO AMBIENTE INTERIOR
Evaporadores de tubo liso y de techo con aletas de tiro natural (sin ventilador).	De 8 °C a 10 °C
Evaporadores de tubo y aletas de tiro forzado (con ventilador).	8 °C

FUENTE: RETER E.I.R.L. (2002).

**ANEXO 8. COEFICIENTES DE PASO DE CALOR PARA VARIOS TIPOS DE EVAPORADORES.**

COEFICIENTES DE PASO DE CALOR $k$ EN $Kcal/m^2h^{\circ}C$ PARA VARIOS TIPOS DE EVAPORADORES						
<b>a) TUBOS DESNUDOS.</b> (Tubos de cobre para R12, R22, R502) (Tubos de acero para R717)						
<b>ENFRIAMIENTO DE AIRE</b>			<b>ENFRIAMIENTO DE LÍQUIDOS</b>			
<b>TEMPERATURA DEL AIRE</b>	<b>Sobre 0 °C</b>	<b>Bajo 0 °C</b>	<b>TEMPERATURA DE EVAPORACIÓN</b>	<b>0 a -10 °C</b>	<b>-15 °C</b>	<b>-20 °C</b>
Aire tranquilo (sin ventilador)	16	12*	Líquido tranquilo	50-150	80-150	50
Aire forzado (con ventilador)	20	16*	Líquido ligeramente en movimiento	170	160	140
			Líquido fuertemente en movimiento	200-250	180-200	140-160
*Tomada en cuenta la escarcha			Enfriador de agua o salmuera de cubierta y tubo	500	400	300
<b>b) TUBOS CON ALETAS.</b>						
<b>TEMPERATURA DEL AIRE</b>				<b>Sobre 0 °C</b>	<b>Bajo 0 °C</b>	
Aire tranquilo (sin ventilador)				6	5	
Aire forzado (con ventilador, construcción parcialmente abierta)				8	7	
Aire forzado (con ventilador, evaporador de alto rendimiento)				8...10	6...8	
Evaporadores de aire acondicionado (velocidad elevada de aire)				20...40		

FUENTE: RETER E.I.R.L. (2002).

**ANEXO 9. TUBOS DE COBRE PARA REFRIGERACIÓN.**

<b>TUBOS DE COBRE PARA REFRIGERACIÓN</b>						
<b>DIÁMETRO NOMINAL (Pulg.)</b>	<b>Ø EXTERIOR (mm)</b>	<b>Ø INTERIOR (mm)</b>	<b>SUPERFICIE EXTERIOR (m<sup>2</sup>)</b>	<b>SUPERFICIE INTERIOR (m<sup>2</sup>)</b>	<b>VOLUMEN INTERIOR (m<sup>3</sup> x 10<sup>-6</sup>)</b>	<b>PESO (Kg.)</b>
1/4	6.30	4.60	0.0198	0.0144	16.62	0.160
3/8	9.60	7.70	0.0300	0.0242	46.57	0.230
1/2	12.70	10.90	0.0400	0.0342	93.31	0.260
5/8	15.80	14.10	0.0495	0.0442	156.40	0.350
3/4	19.00	17.20	0.0596	0.0540	232.35	0.455
7/8	22.20	20.40	0.0697	0.0641	312.61	0.590
1	25.40	24.60	0.0798	0.0773	416.30	0.680
1 1/8	28.50	26.70	0.0895	0.0839	532.15	0.970
1 3/8	34.90	33.10	0.1096	0.1040	810.42	1.310

FUENTE: RETER E.I.R.L. (2002).



## ANEXO 10. CATALOGO PARA LA SELECCIÓN DE LA UNIDAD CONDENSADORA.

**TOSHIBA** Leading Innovation >>>

Residencial

**Daiseikai V Pared Inverter**

**Especificaciones técnicas Bomba de Calor**

Sistema			DAISEIKAI V	DAISEIKAI V	DAISEIKAI V	DAISEIKAI V	DAISEIKAI V
Tamaño:			07	10	13	16	18
Capacidad de Refrigeración	kW	Frio	2,0	2,5	3,5	4,5	5,0
Rango de capacidad Refrigeración (mín. - máx.)	kW	Frio	0,3-3,0	0,3-3,5	0,3-4,5	0,3-5,0	0,3-5,5
Consumo (mín. - nom. - máx.)	kW	Frio	0,07 - 0,35 - 0,68	0,07 - 0,47 - 0,88	0,07 - 0,77 - 1,25	0,07 - 1,22 - 1,49	0,07 - 1,49 - 1,75
EER	W/W		5,63	5,26	4,55	3,69	3,36
EER al 50%			6,56	7,38	6,88	5,48	n.d.
Clase energética		Frio	A	A	A	A	A
Consumo eléctrico anual	kWh		177	237	385	610	745
Capacidad de Calefacción	kW	Calor	2,50	3	4	5,5	6,0
Rango de capacidad Calefacción (mín. - máx.)	kW	Calor	0,3-5,0	0,3-5,8	0,3-6,1	0,3-6,5	0,3-6,7
Consumo (mín. - nom. - máx.)	kW	Calor	0,07 - 0,44 - 1,3	0,07 - 0,56 - 1,90	0,07 - 0,84 - 1,60	0,07 - 1,34 - 1,70	0,07 - 1,54 - 1,75
CCP	W/W		5,68	5,36	4,76	4,10	3,90
CCP al 50%			6,25	6,52	6,06	5,73	n.d.
Clase energética		Calor	A	A	A	A	A
Unidad exterior			RAS-7RWPV-E	RAS-10RWPV-E	RAS-13RWPV-E	RAS-16RWPV-E	RAS-18RWPV-E
Caudal de aire	m <sup>3</sup> /h - l/s	Frio	1662 - 462	1800 - 500	2232 - 620	2232 - 620	2370 - 658
Presión sonora	dB(A)	Frio	46	48	50	50	52
Potencia sonora	dB(A)	Frio	61	63	65	65	67
Rango de funcionamiento	°C	Frio	-10 / 46	-10 / 46	-10 / 46	-10 / 46	-10 / 46
Caudal de aire Calefacción	m <sup>3</sup> /h - l/s	Calor	1530 - 425	1662 - 462	2088 - 580	2088 - 580	2232 - 620
Presión sonora	dB(A)	Calor	46	48	50	50	52
Potencia sonora	dB(A)	Calor	63	63	65	65	67
Rango de funcionamiento	°C	Calor	-15 / 24	-15 / 24	-15 / 24	-15 / 24	-15 / 24
Dimensiones (alto x ancho x p)	mm		550 x 780 x 200	550 x 780 x 200	550 x 780 x 200	550 x 780 x 200	550 x 780 x 200
Peso	kg		39	39	40	40	40
Tipo de compresor			DC Twin Rotary	DC Twin Rotary	DC Twin Rotary	DC Twin Rotary	DC Twin Rotary
Conexiones			Abocordado	Abocordado	Abocordado	Abocordado	Abocordado
Tubería de gas	Pulgadas		3/8"	3/8"	3/8"	1/2"	1/2"
Tubería de líquido	Pulgadas		1/4"	1/4"	1/4"	1/4"	1/4"
Longitud mínima de tubería	m		2	2	2	2	2
Longitud máxima de tubería	m		20	20	20	20	20
Diferencia máxima de altura	m		10	10	10	10	10
Longitud Recargada	m		15	15	15	15	15
Alimentación	V-ph-Hz		220-240/1/50	220-240/1/50	220-240/1/50	220-240/1/50	220-240/1/50

**ANEXO 11. CERTIFICADO DE ANÁLISIS REOLÓGICO DEL YOGURT.**



*Universidad Nacional del Altiplano - Puno*  
**FACULTAD DE INGENIERIA**  
**LABORATORIO DE QUIMICA** 03011



---

IQ-2012

## Certificado de Análisis

**ASUNTO** : ANALISIS REOLÓGICO DE YOGURT

---

**INTERESADO** : TESIS " CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO DE FERMENTACIÓN, REFRIGERACIÓN Y BATIDO DE YOGURT

**MOTIVO** : Trabajo de investigación

**MUESTREO** : 26-06-2012 por el interesado

**ANÁLISIS** : 27-06-2012

---

Los resultados de análisis de YOGURT BATIDO realizado con el Viscosímetro BROOCKFIELD DV-III ULTRA, han dado los siguientes parámetros:

Viscosidad:  
 Índice de consistencia: 6413  
 Índice de flujo: 0.05

Los resultados se aproximan a l modelo de la ley de la potencia.  
 Según se detalla a continuación:



Parámetro	Valor
Viscosidad	6413
Índice de consistencia	6413
Índice de flujo	0.05

Puno, 27 de Junio del 2012

Inge. MSc. Edith Tello Palma

Walter B. Apurilca Prayon Ph. D.  
 DECANO  
 FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA  
 UNA - PUNO

---

Ciudad Universitaria Av. Floral s/n Facultad de Ingeniería Química - Pabellón 94 - Telefax: (051)366142 - 352992

**ANEXO 12. MANUAL DE USO y MANTENIMIENTO DEL EQUIPO.****MANUAL DE USO y MANTENIMIENTO DEL  
EQUIPO MULTIPROCESO**

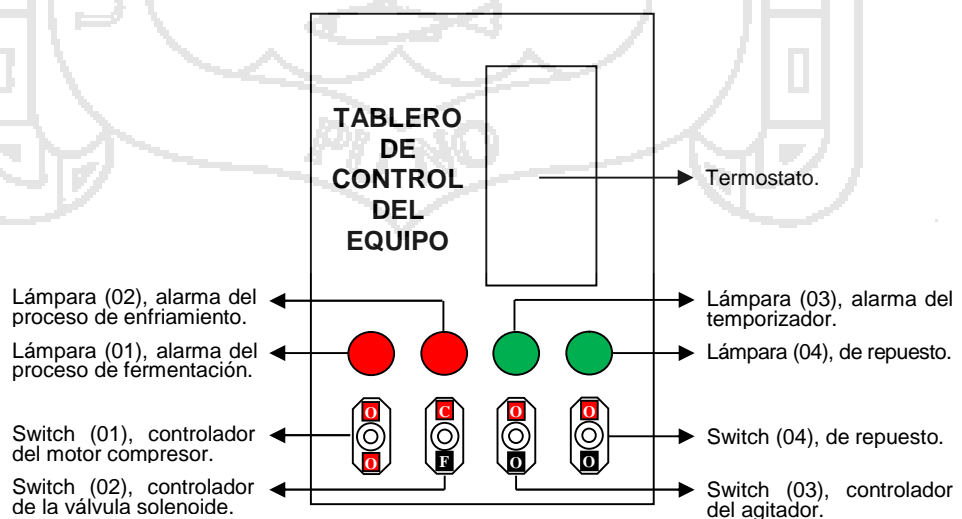
Puno, Julio del año 2012

**1. OPERACIÓN DEL SISTEMA.**

**1.1. PRECAUCIONES ANTES DE LA PUESTA EN MARCHA DEL SISTEMA.**

- Se recomienda trabajar en un ambiente adecuado y aséptico; dicho ambiente debe encontrarse en buenas condiciones, de manera que el equipo multiproceso para elaborar yogurt, pueda operar bien. Asimismo, al momento de trasladar el equipo, se recomienda no hacer inclinaciones superiores a 45°, para evitar que el compresor del equipo sufra alteraciones.
- Verificar visualmente las condiciones del equipo multiproceso, antes de conectar a la toma de fuente de energía de 220 voltios.
- Hacer una limpieza del tanque contenedor y el agitador, antes de poner en marcha el equipo.
- Una vez puesto en marcha el equipo, verificar visualmente el perfecto estado de funcionamiento del controlador de temperatura.

**2. PROCEDIMIENTO DE OPERACIÓN DEL SISTEMA.**



- Paso 1.** Conectar el enchufe general del equipo a la toma de fuente de energía de 220 voltios.
- Paso 2.** Programar en el termostato la temperatura de fermentación del yogurt y la Alarma (01), de manera que pueda activar el funcionamiento de la Lámpara (01), cuando el equipo haya alcanzado la temperatura deseada.
- Paso 3.** Accionar el Switch (01), para encender el motor compresor del equipo. El Switch (01), puede ser accionado desplazando la perilla de control, tanto en el sentido superior o inferior.
- Paso 4.** Verificar que la posición del Switch (02) que controla la válvula solenoide de cuatro (04) vías, se encuentre correctamente accionada para invertir el flujo del gas refrigerante, de manera que el equipo pueda generar temperaturas para la fermentación del yogurt.
- Paso 5.** Verificar que la Lámpara (01) se haya accionado, situación que indica que el equipo ya ha alcanzado la temperatura para la fermentación de yogurt.
- Paso 6.** Desactivar el Switch (01), para cesar el funcionamiento del motor compresor del equipo, y evitar de esta manera, que el equipo siga produciendo calor.
- Paso 7.** Programar en el temporizador el tiempo de fermentación del yogurt, tiempo en el cual se pondrá en funcionamiento la Lámpara (03), indicando que el tiempo programado para la fermentación del yogurt, ha finalizado.
- Paso 8.** Programar en el termostato la temperatura de enfriamiento del yogurt y la Alarma (02), de manera que pueda desactivar el funcionamiento de la Lámpara (02), cuando el equipo haya alcanzado la temperatura deseada.

- Paso 9.** Accionar el Switch (01), para encender el motor compresor del equipo.
- Paso 10.** Verificar que la posición del Switch (02) que controla la válvula solenoide de cuatro (04) vías, se encuentre correctamente accionada para invertir el flujo del gas refrigerante, de manera que el equipo pueda generar temperaturas para el enfriamiento del yogurt.
- Paso 11.** Verificar que la Lámpara (02) finalice su funcionamiento, situación que indica que el equipo ya ha enfriado el coagulo de yogurt a la temperatura deseada para iniciar el proceso de batido de yogurt.
- Paso 12.** Desactivar el Switch (01), para cesar el funcionamiento del motor compresor del equipo, y evitar de esta manera, que el equipo siga disminuyendo la temperatura del coagulo de yogurt.
- Paso 13.** Accionar el Switch (03) para poner en funcionamiento el motor reductor, e iniciar el proceso de agitación del yogurt; y, desactivarlo cuando el proceso de batido haya finalizado.
- Paso 14.** Desconectar el enchufe general del equipo de la toma de fuente de energía de 220 voltios, antes de realizar las etapas sucesivas para finalizar el proceso de elaboración de yogurt.

### 3. MANTENIMIENTO DEL SISTEMA

- El mantenimiento del sistema se realiza cada tres (03) meses; revisando su estructura, presión del gas, agitador y estado físico de los diferentes aparatos que componen el equipo multiproceso para la elaboración de yogurt.
- Revise las conexiones de los componentes eléctricos, verifique el buen contacto de los bornes de alimentación eléctrica del compresor, el motor del agitador y compruebe con un multímetro la continuidad de energía.



- Verifique que no haya fugas en los empates de la tubería con los accesorios. Las fugas se detectan con la ayuda de una esponja y espuma de jabón o detergente, esta espuma se aplica en los diferentes puntos de unión, si no existe fuga alguna, no deben formarse burbujas.
- Compruebe la exactitud con manómetros, si tiene refrigerante el sistema; si el manómetro marca cero (00), nos indica que el sistema no tiene gas refrigerante.
- Observe el funcionamiento del ventilador del condensador, así como el motor del agitador, cada tres (03) meses de uso.

#### 4. FRECUENCIAS DE MANTENIMIENTO.

OPERACIÓN	SEMANAL	MENSUAL	SEMESTRAL	ANUAL
<b>MOTOR DE LA AGITACIÓN:</b>				
Limpieza exterior		X		
Comprobaciones de las conexiones		X		
<b>COMPRESOR:</b>				
Realizar la inspección general del equipo		X		
Limpieza exterior		X		
Comprobación conexiones placa de bornes		X		
Comprobación de fugas		X		
<b>CONDENSADOR:</b>				
Limpieza exterior		X		
Limpieza interior			X	
Comprobación de fugas		X		
<b>FILTRO DESHIDRATADOR:</b>				
Sustitución			X	

## 5. LIMPIEZA DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN y MOTOR DEL AGITADOR.

Cuando se realiza el mantenimiento o reparación de cualquier componente del equipo multiproceso, se recomienda extraer toda la suciedad interna del sistema antes de hacer el montaje respectivo para el funcionamiento.

Es conveniente que cuando se procede a reparar la unidad, no se repare al azar o la suerte. El responsable deberá asegurarse que su reparación quedará en excelentes condiciones.

Por ello, debe de lavar el sistema para asegurar de que no exista suciedad ni sarro en las paredes internas de los componentes.

Los principales componentes que deberán tomarse en cuenta para su limpieza, son los siguientes:

- Compresor;
- Condensador; y,
- Motor de agitación.

El filtro del tubo capilar, no se toma en cuenta para la limpieza; ya que, lo más recomendable, es su cambio, por ser más económico. Puesto que el tubo capilar, por su diámetro fino, es más susceptible al atoro y sería insulso tratar de limpiarlo, por lo que se recomienda cambiarlo.

Con respecto al agitador de turbina, es necesario limpiarlo antes y después de su uso.

La limpieza, se efectuará cuando:

- Se efectúe el cambio del motor compresor por uno nuevo.
- Se repare el serpentín y ventilador del condensador.
- Se repare y/o efectúe el cambio de tubería y accesorios.
- Se efectúe el cambio del motor del agitador por uno nuevo.

## GALERÍA DE FOTOGRAFÍAS



**FOTO 1. CONSTRUCCIÓN DEL TANQUE CONTENEDOR DEL EQUIPO MULTIPROCESO (AGOSTO, 2010).**



**FOTO 2. ACONDICIONAMIENTO DE TUBERÍA DE COBRE (EVAPORADOR) EN LA PARED EXTERNA DEL TANQUE CONTENEDOR (AGOSTO, 2010).**



**FOTO 3. CONSTRUCCIÓN DE LA COBERTURA EXTERNA DEL TANQUE CONTENEDOR (AGOSTO, 2010).**



**FOTO 4. ACONDICIONAMIENTO DE AISLANTE TÉRMICO (POLIURETANO) EN LAS PAREDES LATERALES DEL TANQUE CONTENEDOR (AGOSTO, 2010).**



**FOTO 5. CONSTRUCCIÓN y ACONDICIONAMIENTO DE LA TAPA DEL TANQUE CONTENEDOR (SEPTIEMBRE, 2010).**



**FOTO 6. ACONDICIONAMIENTO DEL MOTOR REDUCTOR EN LA TAPA DEL TANQUE CONTENEDOR (OCTUBRE, 2012).**



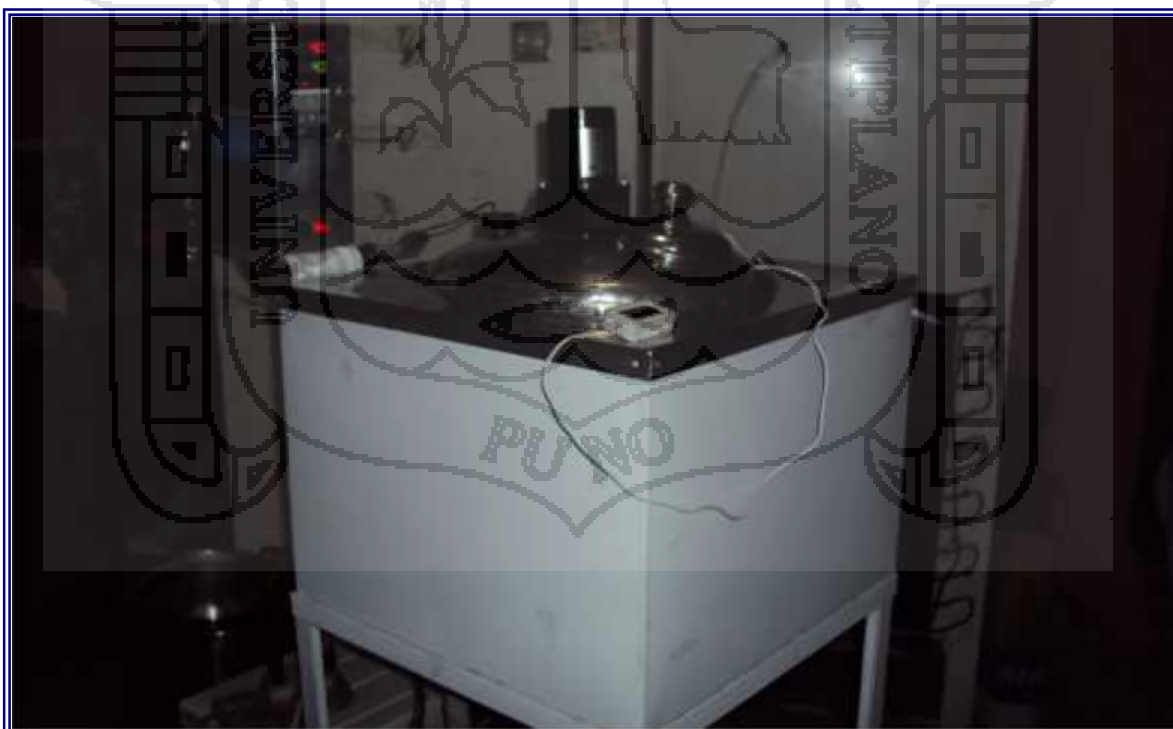
**FOTO 7. TRABAJOS EN EL SISTEMA ELÉCTRICO DEL EQUIPO MULTIPROCESO (OCTUBRE, 2010).**



**FOTO 8. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO MULTIPROCESO (NOVIEMBRE, 2010).**



**FOTO 9. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO MULTIPROCESO (NOVIEMBRE, 2010).**

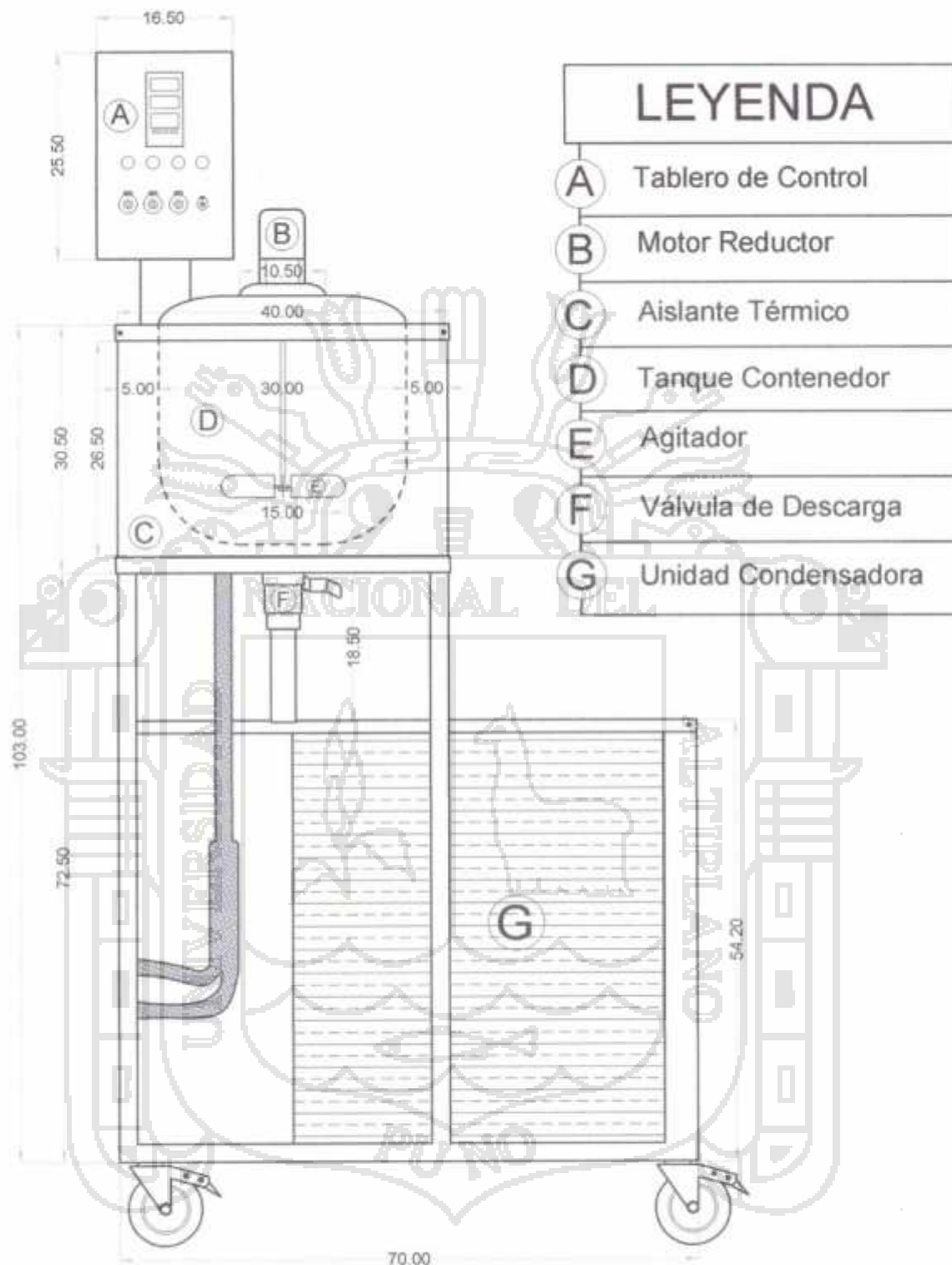


**FOTO 10. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO MULTIPROCESO (DICIEMBRE, 2010).**



**FOTO 11. VISTA GENERAL DEL EQUIPO MULTIPROCESO (JULIO, 2012).**





LEYENDA	
A	Tablero de Control
B	Motor Reductor
C	Aislante Térmico
D	Tanque Contenedor
E	Agitador
F	Válvula de Descarga
G	Unidad Condensadora

RESUMEN VISTA FRONTAL DEL EQUIPO MULTIPROCESO		
TITULO	ESCALA	LÁMINA Nº
"Construcción de un Equipo de Fermentación, Refrigeración y Batido de Yogurt"	1/75	01
	FECHA	
	Junio, 2012	

