



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
CUAUTITLÁN

**“EFECTO DE LA CONCENTRACIÓN DE SÓLIDOS SOBRE  
EL AUMENTO EN LA TEMPERATURA DE EBULLICIÓN  
EN LECHE”**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
**INGENIERA EN ALIMENTOS**

PRESENTA:

**ANA MARIA PUENTE VARGAS**

ASESORES:

I.A. VÍCTOR MANUEL AVALOS AVILA

I.B.Q. JAIME FLORES MINUTTI



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recepcional.

NOMBRE: Ana María Puente

Vargas

FECHA: 26 Nov / 2004

FIRMA: [Firma]



FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN  
 UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR  
 DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS

U. N. A. M.  
 FACULTAD DE ESTUDIOS  
 SUPERIORES CUAUTITLAN



Departamento de  
 Exámenes Profesionales

DR. JUAN ANTONIO MONTARAZ CRESPO  
 DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLAN  
 P R E S E N T E

ATN: Q. Ma. del Carmen García Mijares  
 Jefe del Departamento de Exámenes  
 Profesionales de la FES Cuautitlán

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la TESIS:

Efecto de la concentración de sólidos sobre el aumento en la temperatura de ebullición en leche.

que presenta la pasante: Ana María Puentes Vargas  
 con número de cuenta: 9958393-8 para obtener el título de :  
Ingeniera en Alimentos

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

**ATENTAMENTE**  
**"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"**

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 11 de Octubre de 2004

PRESIDENTE	<u>I.Q. Guadalupe Franco Rodríguez</u>	
VOCAL	<u>Dr. José Luis Arjona Román</u>	
SECRETARIO	<u>IA. Victor Manuel Avalos Avila</u>	
PRIMER SUPLENTE	<u>IA. Edgar F. Arechavaleta Vázquez</u>	
SEGUNDO SUPLENTE	<u>MC. Ricardo Blanco Pérez</u>	

## **AGRADECIMIENTOS**

A mis padres Maria de los Angeles y Angel Manuel, gracias por todo su esfuerzo y dedicación, lo que soy se los debo a ustedes, nunca terminare de agradecerles lo que han hecho por mi.

A mis hermanas Adriana y Andrea por brindarme una sonrisa cuando mas la necesitaba y apoyarme en mis decisiones.

A mis asesores Víctor Manuel y Jaime Flores, gracias por todo el apoyo que recibí y sobre todo por hacerme ver un modo distinto de la vida.

A mis sinodales Guadalupe Franco Rodríguez, Dr. José Luis Arjona, Edgar Arechavaleta, Ricardo Blanco, gracias por su apoyo.

A la UNAM por la infraestructura otorgada.

A mis amigos , por que siempre estuvieron conmigo en las buenas y en las malas, y no queriendo omitir a nadie gracias a todos y cada uno de ellos.

A un gran amigo que encontré y aunque fue difícil mantener tú amistad, muchas gracias a ti Víctor Manuel , sin tu apoyo no hubiera sido posible realizar este trabajo.

## INTRODUCCIÓN

Uno de los alimentos que se comercializa con mayor frecuencia es la leche, producto que generalmente contiene de 85 – 90% de agua, el cual es uno de los factores que dependen de la raza vacuna, esta cantidad de agua es una de las propiedades de la leche que debe considerarse en los costos de almacenamiento y transporte.

Con el fin de disminuir los costos hoy en día se emplean distintos métodos para reducir el contenido de agua en alimentos líquidos. Dentro de las técnicas más utilizadas se encuentran: el proceso de secado por aspersion, en el cual se llega a eliminar hasta el 95 % de agua de la leche, obteniendo como producto final leche en polvo; y el proceso de evaporación donde se reduce el contenido de agua hasta el 45%, elevando de esta manera el contenido de sólidos, esto hace que se inhiba el crecimiento microbiano y la actividad enzimática, por la consecuente disminución de la actividad acuosa ( $a_w$ ); aunque para asegurar su conservación, es necesario someter al producto a un proceso térmico que garantice su vida útil. <sup>Alais, 1998; Varnam, 1995</sup>

Durante el proceso de evaporación la ebullición se realiza a temperaturas entre los 40 y 70 °C a presión reducida, esto para evitar los daños que pueden presentarse en algunos componentes de los alimentos sensibles al calor, principalmente las vitaminas, entre las que podemos citar las riboflavinas entre las hidrosolubles y la vitamina A entre las liposolubles. De esta manera la temperatura de ebullición esta determinada por el vacío y en menor grado por la concentración de la solución en sistemas orgánicos. <sup>Alais, 1998</sup>

Cuando el producto se va concentrando, generalmente presenta un aumento en su punto de ebullición el cual se define como el aumento en el punto de ebullición (APE) sobre el del agua pura a una determinada presión. Singh, 1998

El APE es una de las propiedades coligativas que dependen de la cantidad de sólidos presentes en solución. Este aumento en el punto de ebullición es un factor muy importante que debe considerarse durante el proceso de evaporación ya que, si no es controlado adecuadamente provoca una disminución en el  $\Delta T$  entre el vapor y el producto, provocando una disminución en la velocidad de transferencia de calor entre el vapor y el producto. Fellows, 1994 - Geankoplis, 1982

Para estimar el aumento en el punto de ebullición se utilizan principalmente tres métodos: a) Medición experimental, que consiste en medir directamente la temperatura de ebullición del alimento en equipos abiertos (marmitas) y realizar una diferencia de temperaturas con los valores que se obtienen de las tablas de vapor para el agua; b) Cálculo termodinámico, el cual consiste en la utilización de las ecuaciones Raoult y Dalton, que presentan el inconveniente de conocer el peso molecular del alimento, valores que generalmente no se encuentran disponibles para alimentos, y por último c) Rectas de Dühring que en general es un método sencillo para realizar la estimación del aumento en el punto de ebullición de la solución, pero de igual manera que en el caso del nomograma no existen gráficos para soluciones alimenticias. Brennan, 1980, Foust-1960

Con lo mencionado anteriormente y, que usualmente en la industria alimentaria no se trabaja con soluciones tan diluidas que tengan las mismas características que las del agua pura se hace imprescindible conocer el aumento en el punto de ebullición durante el proceso de evaporación de alimentos para obtener productos de mayor calidad. La elaboración de un gráfico de Dühring para leche, presenta ciertas ventajas en su utilización para determinar el aumento en el punto de ebullición y se debe a que las líneas que conforman un gráfico de este tipo, son líneas rectas y sólo es necesario conocer la concentración de la solución y la temperatura de ebullición del agua a una determinada presión, interceptar los dos puntos y leer la temperatura de ebullición de la solución. Singh, 1998

Con la elaboración de este trabajo se pretende tener un material de apoyo didáctico y de aplicación industrial que sirva para la evaluación directa del APE real de la leche y como consecuencia en la evaluación del proceso de evaporación.

**INDICE.**

<b>Capitulo 1 . GENERALIDADES DE LA LECHE.</b>	<b>Pagina</b>
1.1. Definición de leche.	1
1.2. Propiedades físicas de la leche.	2
1.2.1. Punto de congelación.	3
1.2.2. Punto de ebullición.	4
1.2.3. Calor específico.	4
1.2.4. Tensión superficial.	5
1.2.5. Densidad.	6
1.2.6. Viscosidad.	6
1.3. Tratamientos térmicos utilizados en la conservación de productos lácteos.	8
1.3.1. Pasteurización.	8
1.3.2. Calentamiento ultra alto (UHT).	9
1.3.3. Proceso Bacto - Therm.	10
1.3.4. Esterilización.	10
1.4. Métodos de conservación por concentración.	11
1.4.1. Osmosis Inversa y ultrafiltración.	11
1.4.2. Concentración por congelación.	13
1.4.3. Concentración por evaporación.	14
1.4.4. Secado.	15
1.4.4.1 Secado por aspersion.	16
1.5. Productos lácteos obtenidos mediante un proceso de conservación por concentración.	18
1.5.1. Leche evaporada.	18
1.5.2. Leche evaporada azucarada.	19
1.5.3. Leche en polvo.	19

**CAPITULO 2. FISICOQUIMICA DE LAS SOLUCIONES.**

2.1. Definición de solución.	21
2.2. Ley de Raoult.	22
2.3. Ley de Henry.	23
2.4. Energía de Gibbs.	25
2.5. Propiedades coligativas.	28
2.5.1. Disminución de la presión de vapor.	28
2.5.2. Aumento en el punto de ebullición.	31

**CAPITULO 3. PROCESO DE EVAPORACION.**

3.1. Definición.	37
3.2. Objetivos del proceso.	39
3.3. Termodinámica de la presión de vapor.	40
3.4. Termodinámica del proceso de evaporación.	44
3.4.1. Cambio de fase.	45
3.4.2. Punto de ebullición.	46
3.5. Efecto de las variables de proceso.	47
3.5.1. Temperatura de alimentación.	47
3.5.2. Efecto de la presión del sistema.	48
3.5.3. Efecto de la presión de vapor de agua.	48
3.6. Cálculo del aumento en el punto de ebullición.	49
3.6.1. Método experimental.	49
3.6.2. Cálculo termodinámico.	50
3.6.3. Rectas de Dühring.	51
3.7. Equipo utilizado en la evaporación de leche.	55
3.8. Operación de evaporadores.	57

**CAPITULO 4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.**

4.1. Metodología.	60
4.1.1. Cuadro metodológico.	61
4.2. Descripción del diseño experimental.	64
4.3. Materiales.	65
4.4. Procedimiento experimental.	66
4.4.1. Preparación y caracterización de la muestra.	66
4.4.2. Medición de la temperatura de ebullición.	68
4.4.2.1 Procedimiento.	71

**CAPITULO 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS.**

5.1. Análisis de la medición de densidad.	72
5.1.1. Caracterización de la muestra.	72
5.2. Análisis del sistema experimental.	76
5.2.1 Caracterización del sistema experimental.	76
5.3. Análisis de las temperaturas de ebullición de leche.	79
5.3.1. Obtención de temperaturas de ebullición.	79
5.3.2. Análisis de varianza.	80
5.3.3. Método de Duncan.	85
5.3.4. Análisis de regresión lineal.	88
5.4. Elaboración de rectas de Dühring para leche.	90
5.5. Evaluación de la temperatura de ebullición por medio de las leyes de Dalton y de Raoult.	94

<b>CONCLUSIONES.</b>	101
	105

**BIBLIOGRAFIA.**

**INDICE DE TABLAS Y FIGURAS.**

<b>TABLA.</b>	<b>Página</b>
1.1. Composición química de leche vacuna de las razas occidentales.	1
1.2. Tensión superficial de distintos fluidos.	5
1.3. Composición química de diversos tipos de leche.	20
3.1. Constantes de elevación del punto de ebullición y depresión del punto de congelación.	36
4.1. Composición química de la leche en polvo por cada 100g de producto.	64
5.1. Caracterización de la leche.	72
5.2. Medición de densidad de leche con 10% de sólidos.	73
5.3. Medición de densidad de leche con 15% de sólidos.	74
5.4. Medición de densidad de leche con 20% de sólidos.	74
5.5. Medición de densidad de leche con 25% de sólidos.	74
5.6. Medición de densidad de leche con 30% de sólidos.	74
5.7. Parámetros estadísticos de la medición de densidad.	75
5.8. Obtención de temperaturas de ebullición del agua.	76
5.9. Obtención de temperaturas de ebullición con distintas concentraciones de leche.	81
5.10 Tabla de ANOVA.	82
5.11 Medias muestrales en orden creciente.	86
5.12. Valores de $r_p$ para las cinco medias maestras.	87
5.13. Valores de $r_p$ multiplicados por $S_x$ .	87
5.14. Parámetros estadísticos obtenidos mediante regresión lineal.	89
5.15. Obtención de temperaturas de ebullición por medio de relaciones termodinámicas.	99
5.16. Comparación de resultados.	99

<b>FIGURAS.</b>	<b>Página</b>
1.1. Membrana de cartucho en espiral.	12
1.2. Esquema de un sistema de concentración por congelación.	13
1.3. Evaporador de tubos verticales con circulación natural.	15
1.4. Secador por aspersión en dos etapas.	17
2.1. Diagrama de fases del agua.	26
2.2. Representación de un proceso de evaporación.	29
2.3. Diagrama de fases del disolvente y de la solución.	32
3.1. Representación grafica de Dühring para soluciones acuosas de sacarosa.	53
3.2. Evaporador de película descendente.	54
3.3. Evaporador de simple efecto.	55
3.4. Evaporador de múltiple efecto.	56
4.1. Esquema del sistema experimental.	69
5.1. Medición de densidad de leche con concentraciones de 10, 15, 20, 25 y 30 % de sólidos.	73
5.2. Comprobación del sistema experimental.	77
5.3. Evaluación del aumento en la temperatura de ebullición de leche con 10% de sólidos.	79
5.4. Grafico de Dühring para la evaluación del aumento en la temperatura de ebullición en leche.	91
5.5. Comparación de temperaturas de ebullición de la leche por medio del método termodinámico y experimental.	101

**NOMENCLATURA.**

SIMBOLO	DEFINICION
APE	Aumento en el punto de ebullición
$a_w$	Actividad acuosa
Cp	Calor especifico
$\rho$	densidad
$\Delta T$	Diferencia de temperaturas
G	Energia de Gibbs
Hm	Entalpia molar
K	Constante de la ley de Henry
$K_{ce}$	Constante molal del punto de congelación
$K_{pe}$	Constante molal del punto de ebullición
C	Constante de integración
$C_B$	Concentración de la solución
$m_B$	Masa del gas
m	Molalidad
$n_*$	Numero de moles en solución
OI	Osmosis inversa
PM	Peso molecular
P	Presión
$p^\circ$	Presión parcial
$P_v$	Presión de vapor
pc	Punto de congelación
pe	Punto de evaporación

R	Constante de los gases ideales
$S_m$	Entropía molar
T	temperatura
UF	Ultrafiltración
$V_m$	Volumen molar
X	Fracción mol
$\mu$	viscosidad

## 1.1. DEFINICIÓN.

De acuerdo a la definición hecha por Badui (1993), la leche es el producto segregado por las hembras de los mamíferos a través de las glándulas mamarias. En general la leche esta compuesta por agua, grasas, proteínas, carbohidratos, vitaminas y minerales, además de otras sustancias que están presentes en menor concentración y que en conjunto forman un sistema fisicoquímico relativamente estable, esto se debe a que todos los constituyentes se encuentran en equilibrio, estableciendo tres estados de dispersión.

La leche es un sistema biológico muy complejo en el que se presentan tres estados físicos de dispersión de sus múltiples constituyentes: a) lactosa así como las sales, los cationes, los aniones y las vitaminas hidrosolubles existen en solución; b) las proteínas y las caseínas del suero, forman dispersiones coloidales, y c) las sustancias liposolubles se encuentran como emulsión. Badui, 1993

El constituyente mayoritario de la leche es el agua y contiene cantidades variables según la especie vacuna de: lípidos, proteínas y carbohidratos que se sintetizan en la glándula mamaria, el porcentaje promedio de cada componente lo podemos observar en la tabla 1.1. Varnam, 1995

Tabla 1.1. Composición química de leche vacuna de las razas occidentales. Fennema, 2000

COMPONENTE	PORCENTAJE MEDIO	INTERVALO
Agua	86.6	85.4 - 87.7
Grasa	4.1	3.4 - 5.1
Proteína	3.6	3.3 - 3.9
Lactosa	5.0	4.9 - 5.0
Cenizas	0.7	0.68 - 0.74

En general las proteínas de la leche son de dos tipos, proteínas del lactosuero y caseínas. Las caseínas constituyen más del 80% de las proteínas totales de la leche, aunque la proporción relativa de proteínas del lactosuero frente a caseínas varía según el estado de lactación. La grasa de la leche tiene una composición compleja, entre sus principales componentes predominan los triglicéridos, que constituyen el 98% de la grasa láctea y se encuentran pequeñas cantidades de diglicéridos y de monoglicéridos y ácidos grasos libres. En el caso de la lactosa, el cual es el principal constituyente sólido de la leche, su concentración varía entre 4.9 y 5% es un disacárido constituido por dos moléculas de  $\alpha$ -D-glucosa y  $\beta$ -D galactosa, en general la lactosa es uno de los carbohidratos menos soluble, con una solubilidad en agua de sólo 17.8 % a 298.15 K; esta baja solubilidad tiene consecuencias durante la elaboración de leche evaporada, a menudo es necesario inducir la cristalización para producir un gran número de pequeños cristales y de esta forma evitar el defecto conocido como textura arenosa. En cuanto a los minerales, los más importantes son los bicarbonatos, cloruros y citratos de calcio, magnesio, potasio y sodio. Alais, 1998; Varnam, 1995

## **1.2. PROPIEDADES FÍSICAS DE LECHE.**

La leche, presenta ciertas propiedades físicas particulares que son reflejo de su composición y de las interacciones de sus constituyentes; el color y la viscosidad son dos factores importantes para aceptar o rechazar el producto. Además de que es importante conocer otras características físicas como densidad, la tensión superficial, el calor específico. La temperatura de congelación y la temperatura de ebullición. Alais, 1998

Algunas de sus propiedades físicas dependen del total de los componentes tales como: densidad, tensión superficial y calor específico; otras en cambio dependen de las sustancias disueltas dentro de las cuales se encuentran: su índice de refracción y punto de congelación; por otra parte se encuentran otras que dependen de los iones como son: pH, (reacción iónica) y conductividad, o de las sustancias reductoras: potencial Redox. <sup>Alais, 1998</sup>

### **1.2.1. Punto de congelación.**

Una de las propiedades coligativas de la leche es la reducción del punto de congelación (pc) por efecto de los solutos de peso molecular bajo como la lactosa y las sales, de acuerdo con lo establecido en la ley de Raoult, en general el pc varía de 272.63 K a 272.58 K. Teniendo como valor promedio 272.6 K, un valor igual o inferior a 272.62 K, en valor absoluto, permite sospechar una adición de agua. <sup>Badui, 1993</sup>

Esta medición se aplica también a la leche descremada, ya que el descremado no cambia el punto de congelación. Por el contrario la alteración por fermentación láctica y la adición de sales solubles bajan dicho punto. <sup>Alais, 1998</sup>

Este es uno de los valores que se utiliza en los análisis crioscópicos para identificar la alteración de la leche por dilución con agua. <sup>Badui, 1993</sup>

### 1.2.2 Punto de ebullición.

Los mismo sólidos disueltos hacen que el punto de ebullición (pe) de la leche sea ligeramente superior al del agua pura a la misma presión; su punto de ebullición es de 373.32 K, el de la leche evaporada es de 373.59 K y el de la leche condensada azucarada es de 376.37 K a 101325 Pa. Recordando que un mol de una sustancia disuelta en 1 Kg reduce la temperatura de congelamiento en 1.86 K y a su vez incrementa la de ebullición en 0.5 K. <sup>Badui, 1993</sup>

Es importante resaltar que la lactosa es el principal componente que influye en las propiedades coligativas de la leche como son: elevación del punto de ebullición, el descenso del punto de congelación así como en la presión osmótica.

Cuanto mas concentrada sea la solución tanto mas elevado será su punto de ebullición. A medida que ocurre la evaporación, la concentración del líquido aumenta elevando el punto de ebullición.

### 1.2.3 Calor específico (cp).

De acuerdo con Badui (1993), el calor específico de la leche es de 4.17198 J/Kg K y al igual que todos los productos lácteos, varia en forma directa con el contenido de agua. La siguiente ecuación se puede emplear para el cálculo de este parámetro.

1.1

$$C_p = 0.20 + \%agua/125 \quad (\text{Badui, 1993})$$

En general el calor específico de la leche es un poco más bajo que el del agua; los valores obtenidos corresponden a los que se pueden calcular de acuerdo con la composición de la leche tabla 1.1. <sup>Alais, 1998</sup>

En este caso es preciso tener en cuenta que la grasa funde hacia los 20 a 298.15 K, y a este valor es necesario añadir el calor latente de fusión al recalentar la leche. Usualmente el calor específico de la leche entera o descremada varía poco de 273.15 a 373.15 K. <sup>Alais, 1998</sup>

#### 1.2.4. Tensión superficial

La presencia de sustancias orgánicas en la leche, explica el descenso de su tensión superficial en relación con la del agua pura tabla 1.2

Tabla 1.2. Tensión superficial de distintos fluidos. <sup>Alais, 1998</sup>

Componente	Tensión superficial a 288.15 K (Pa)
Leche entera	4.7 – 5.3
Leche descremada	5.2 – 5.7
Agua	7.6

Durante la ebullición de leche se forma espuma estable y ocurre sobre todo en el caso de ebullición bajo presión reducida y cuando la cabeza hidrostática es grande. Para controlar la formación de espuma en muchas ocasiones se utilizan agentes tensoactivos, detergentes ó de uso común como dispositivos mecánicos de rotura de espumas.

Una propiedad interesante es que la dilución de la leche, hasta unas 10 veces, no modifica sensiblemente la tensión superficial; no aumenta bruscamente más que tras grandes diluciones (1/50). <sup>Alais, 1998</sup>

### 1.2.5 Densidad

La densidad de la leche depende de los diversos sólidos que contiene, de este modo la densidad varía proporcionalmente a la concentración, y varía de manera inversa al contenido de grasa, de tal forma que existe una ecuación lineal que relaciona este parámetro con los sólidos no grasos (sng) y la grasa (g). <sup>Badui, 1993</sup>

1.2

$$Pe = 1.0 + (0.0035 \times \% \text{ sng}) - (0.001 \times \% \text{ g}) \quad (\text{Alais, 1998})$$

La densidad al igual que la viscosidad varía con la temperatura; en general se mide a 288.15 K. A temperaturas diferentes es necesario realizar una corrección. La densidad de la leche es variable; los valores medios se encuentran entre 1030 Kg/m<sup>3</sup> y 1.033 Kg/m<sup>3</sup>. Mientras que para la leche evaporada es de 1066 y el de la leche condensada azucarada es de 1.308. Las condiciones físicas constituyen un factor importante que afecta la lectura de la densidad tomada con el lactodensímetro. Cuando la temperatura varía en las proximidades del punto de fusión de la materia grasa, la densidad varía. <sup>(Alais, 1998)</sup>

### 1.2.6 Viscosidad.

En relación con la viscosidad y a pesar de contener de 12 a 14% de sólidos, la leche se comporta prácticamente como un fluido newtoniano semejante al agua con una viscosidad de 2<sup>-3</sup> Pa·s. Tanto las micelas como los glóbulos de grasa son los principales responsables de la viscosidad de los productos lácteos, por lo que la leche descremada y el suero son fluidos con 1.5<sup>-3</sup> y 1.2<sup>-3</sup> Pa·s, respectivamente, semejando aun mas a la viscosidad del agua que presenta 1 Pa·s. <sup>Badui, 1993</sup>

La viscosidad de la leche disminuye con la elevación de la temperatura; a 293.15 K no es mas que la mitad, y a 313.15 K el tercio de la que tiene a 273.15 K, por efecto del calentamiento. Toda modificación o alteración que actué sobre la grasa o las proteínas, tendrá un efecto sobre la viscosidad; por ejemplo la homogenización eleva la viscosidad de la leche; el factor de multiplicación esta comprendido entre 1.2 y 1.4.

Alais, 1998

En general tanto la viscosidad y la densidad son factores que deben considerarse durante el proceso de evaporación. Cuando la leche entra al evaporador tiene una densidad promedio de  $1033 \text{ Kg/m}^3$  y a su vez cuenta con un valor de viscosidad de  $2^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ , cuando se eleva su temperatura sufre un descenso en la  $\rho$  y en la  $\mu$  respectivamente, pero cuando el líquido empieza a evaporarse, la leche se concentra provocando un incremento en estos dos factores.

Cuando ocurre esto, existe una tendencia en la reducción de las velocidades de circulación y por lo tanto una reducción en los coeficientes de transferencia de calor. Puesto que en general, la viscosidad y densidad de una solución sometida a evaporación aumentan conforme ocurre la concentración, es de esperarse que a medida que ocurre el proceso de evaporación descienda la velocidad de transferencia de calor.

### **1.3. TRATAMIENTOS TERMICOS UTILIZADOS EN LA CONSERVACIÓN DE PRODUCTOS LACTEOS.**

En la mayoría de los alimentos las velocidades de descomposición y de alteración dependen directamente de la temperatura a la que se encuentren, por lo tanto en la mayoría de las ocasiones los alimentos se someten a un proceso térmico a fin de prevenir su conservación. Como el objeto de este estudio es la leche, existen diversos tratamientos térmicos a los que se somete dicho alimento.

La aplicación de un proceso térmico implica el uso controlado de calor para aumentar o disminuir la velocidad de las reacciones en los alimentos, dependiendo de las circunstancias. En este caso el objetivo del calentamiento que se indica a continuación es la prolongación de la vida útil y la eliminación de microorganismos patógenos. Los tratamientos térmicos que usualmente se utilizan para leche son los siguientes:

#### **1.3.1 Pasteurización.**

La pasteurización es un tratamiento térmico aplicado a los alimentos, menos drástico que la esterilización, pero suficiente para inactivar los microorganismos patógenos asociados a la leche como es el caso de el bacilo tuberculoso. Por ejemplo, la pasteurización inactiva la mayor parte de las formas vegetativas de los microorganismos, pero no las esporas resistentes al calor. De la misma forma que se utiliza para inactivar bacterias la pasteurización puede considerarse también en relación con las enzimas de los alimentos, que pueden ser inactivadas por el calor. Earle, 1998

Actualmente, la pasteurización HTST (Altas temperaturas tiempo corto) se lleva a cabo en sistemas continuos de intercambiadores de calor de placas o de tubos, en los que la leche se somete a una temperatura de 344.15 K – 345.15 K durante 15-20 segundos de tratamiento efectivo. Las pasteurización esta calculada en la reducción de 12 ciclos logarítmicos de la cuenta microbiana *Clostridium burnetti*.<sup>Badui, 1993</sup>

### 1.3.2 Calentamiento ultraalto (UHT).

Existen dos métodos de calentamiento ultra alto, en el primero que es donde se aplica un calentamiento Indirecto se alcanzan temperaturas de 409.15 411.15 K en un tiempo de 5 a 8 segundos, este tratamiento se aplica en cambiadores de calor tubulares o de placas y en el segundo caso, que es donde se aplica un calentamiento directo, se alcanzan hasta 413.15 – 418.15 K durante un tiempo de 2 a 4 segundos, por inyección de vapor purificado consiguiendo una elevación instantánea de la temperatura de la leche que se desee tratar; posteriormente la leche pasa a una cámara de vacío, en donde ocurre una expansión del líquido, con la subsiguiente separación del vapor, que es absorbido por la corriente de agua que se emplea para generar vacío en la cámara. Con el fin de evitar la dilución o la concentración de la leche, la cantidad de vapor inyectado debe regularse de tal manera que corresponda con la cantidad de agua eliminada en la expansión a vacío. El objetivo de la ultra pasteurización es el de aumentar el tiempo de conservación de la leche, aún sin mantenerla bajo refrigeración.<sup>Belitz, 1997; Keating, 1999</sup>

### 1.3.3. Proceso Bactotherm.

En este tratamiento térmico existe una combinación de esterilización por centrifugación en bactofugas (338.15 a 343.15 K) y calentamiento UHT del sedimento separado (2-3% de la leche) con una recombinación subsiguiente.

De esta manera se evita el calentamiento de la totalidad de la leche, lo que ofrece ciertas ventajas desde el punto de vista del sabor. Con esta técnica se logra una vida útil de la leche de 8 a 10 días. <sup>Belitz, 1997</sup>

### 1.3.4. Esterilización.

El objeto de la esterilización es destruir todos los microorganismos que, como bacterias, levaduras y mohos, pueden existir en los alimentos, a fin de prevenir su descomposición. A la vez, la esterilización evita que sobrevivan los organismos patógenos (productores de enfermedades) y sean ingeridos con el alimento.

Los microorganismos se destruyen por el calor, pero el grado de calentamiento necesario para destruirlos es variable. El microorganismo indicador utilizado con más frecuencia es el *Clostridium Botulinum* el cual indica si el tratamiento es el adecuado. <sup>Earle, 1998</sup>

Generalmente el proceso de esterilización se realiza en autoclaves, en las cuales la leche se somete a 380.15 a 388.15 K durante un tiempo de 1200 s a 2400s, o a temperaturas de 393.15 - 403.15 K durante 480 a 720 s, una vez envasado el producto.

A diferencia de los tratamientos anteriores, el envase utilizado para este producto una lata. <sup>Badui, 1993; Belitz, 1997</sup>

## **1.4. METODOS DE CONSERVACIÓN POR CONCENTRACIÓN.**

Algunos de los productos alimenticios que se elaboran hoy en día requieren en ocasiones de leche con mayor contenido de sólidos como es el caso de leche evaporada la cual es utilizada en productos de panadería, donde el producto final tiene propiedades físicas de mayor calidad debido a que mejora el sabor del producto final. Dentro de los métodos de eliminación de agua de la leche se encuentran los siguientes.

### **1.4.1. Osmosis inversa y ultrafiltración.**

La osmosis inversa (OI) y la ultrafiltración (UF) son dos técnicas de separación por membranas en la que los solutos de distintos pesos moleculares se separan de la solución. Los dos procesos no son iguales, ya que la OI requiere una presión de funcionamiento de 689.473 KPa a 13789.466 KPa y retiene solutos de peso molecular generalmente inferior a 0.5 Kg/mol, además de que también se efectúa por diferencia de concentraciones, mientras que la UF se lleva a cabo a presiones menores, de 68.947 KPa a 689.473 KPa y en ella se retienen solutos de peso generalmente superior a 1 Kg/mol. El mecanismo de separación también es distinto y mientras la UF puede casi, pero no totalmente, explicarse como un proceso relativamente simple de filtración en tamiz, la OI implica transporte por difusión molecular. Varnam, 1999

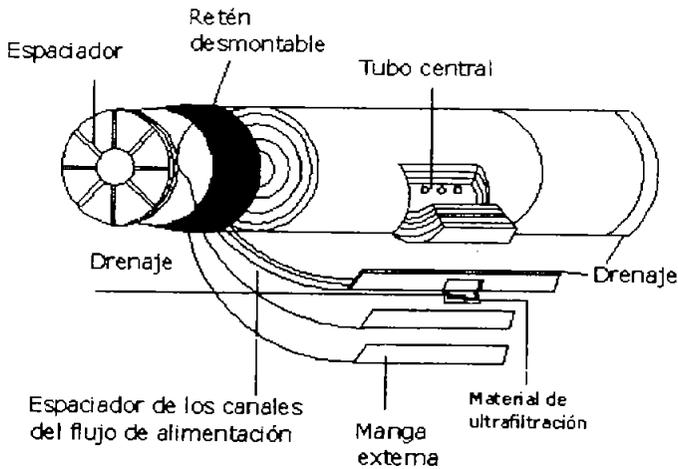


Figura 1.1. Membrana de cartucho en espiral. Fellows, 1994

En ambos procesos, OI y UF, las propiedades de las membranas tienen una gran importancia y las características son comunes en los procesos de membrana indicando las más importantes tenemos:

1. Capacidad de proporcionar el grado de separación necesario (corte de peso molecular) a altos flujos de permeado y durante un largo periodo de tiempo.
2. Facilidad de limpieza
3. Suficiente resistencia para tener una larga vida útil.

### 1.4.2. Concentración por congelación.

La concentración por congelación consiste en el enfriamiento de la leche por debajo de su punto de congelación y la posterior eliminación de los cristales de hielo formados. Los trabajos realizados sugieren que es posible una concentración del 36 a 38% de sólidos tanto para leche entera como para leche descremada. No obstante, la concentración por congelación es un proceso muy caro, cuyos costos son unas tres o cuatro veces mas elevados que los de la evaporación o la osmosis inversa. Vamam, 1995

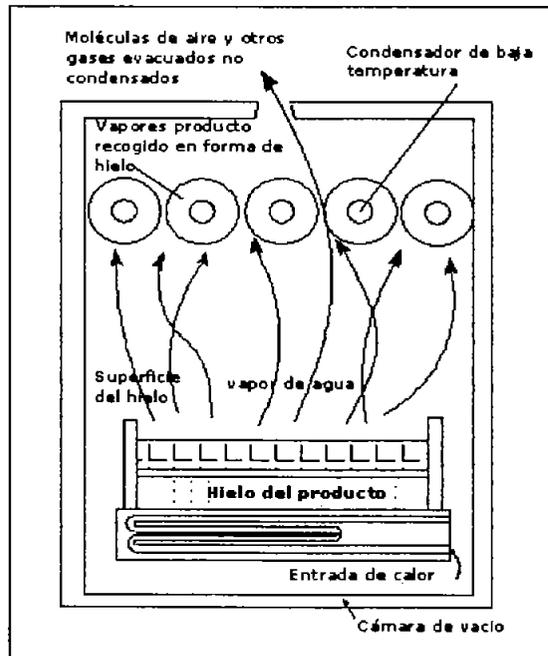


Figura 1.2. Esquema de un sistema de concentración por congelación. Singh, 1998

### 1.4.3. Concentración por Evaporación.

La evaporación es el método mas antiguo y el mas ampliamente utilizado en la reducción de la cantidad de agua en alimentos. La evaporación es un proceso de transferencia de calor. En algunos casos, para reducir las alteraciones que origina el calentamiento, la ebullición se lleva a cabo a temperaturas entre 313.15 y 343.15 K en productos lácteos, debido a que si se sobrepasa esta temperatura, la cual es la temperatura crítica de la leche, se presentan cambios notables en el producto final sobre sus características organolépticas en cuanto a sabor, color y aroma. Para evitar estos cambios que son desfavorables, la ebullición se realiza a presión reducida. Los detalles de la operación se discutirán mas adelante.

En la figura 1.3 se observan los detalles principales de un evaporador de tubos verticales. En estas condiciones, la temperatura de ebullición del producto está determinada por la presión (en la cámara de vapor - líquido) y, en menor grado, por la concentración de la leche (APE), así como la presión hidrostática de una columna de líquido cuando se emplean evaporadores con calandria de tubos. Alais, 1998; Varnam, 1995

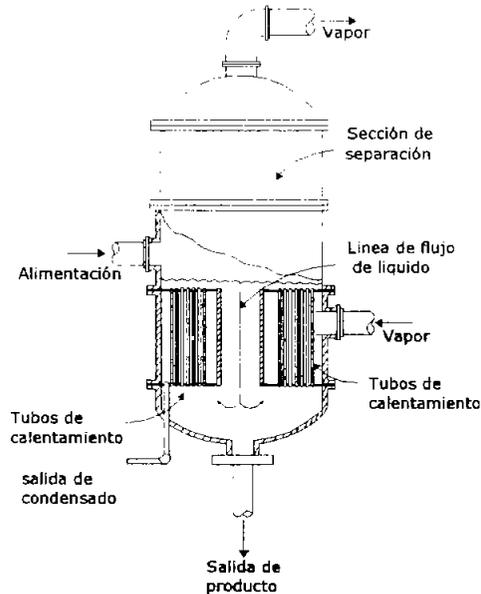


Figura 1.3. Evaporador de tubos verticales con circulación natural. Foust, 1960

#### 1.4.4. Secado

El proceso de secado puede ser considerado como una continuación de la concentración con la finalidad de obtener un producto estable, de baja humedad con los mínimos cambios organolépticos posibles y las propiedades funcionales apropiadas para el uso al que va ser destinado.

El secado a escala industrial de la leche, consiste en la eliminación de agua mediante la aplicación de calor a temperaturas por encima de las ambientales. Una parte del agua en la leche concentrada se encuentra débilmente ligada y para el propósito de secado se puede considerar como libre. De este modo existen dos técnicas empleadas en el secado de leche, a) evaporación en rodillos secadores, donde la presión de

vapor saturado en la superficie que cede la humedad es igual a la presión atmosférica ( $P''_v = P$ ) y b) vaporización, mediante secado por aspersión, donde la presión del vapor saturado de la superficie que cede la humedad es menor a la presión atmosférica ( $P''_v < P$ ).

#### 1.4.4.1. Secado por aspersión.

En general para el proceso de secado de leche, es mas frecuente utilizar el secado por aspersión que el secado por rodillos.

El secado por aspersión consiste en mezclar en una cámara de secado la leche pulverizada en gotas de diámetro menor de  $300 \mu\text{m}$  (preferiblemente 10 a  $100 \mu\text{m}$ ), con aire caliente a una temperatura de entrada de 423.15 a 493.15 K. El aire suministra el calor y las gotas pierden su humedad. La temperatura de evaporación en las condiciones normales del aire de entrada es entre 313.15 a 323.15 K, la temperatura de las partículas secas nunca excede a la del aire frío de salida. Las partículas secas se separan del aire, antes o después de su extracción de la cámara de secado, se enfrían y se envasan. El esquema básico de un secador por atomización con dos fases se presenta en la figura 1.3. En el cual la leche concentrada entra por la parte superior del desecador a través del aspersor. <sup>Vamam, 1995</sup>

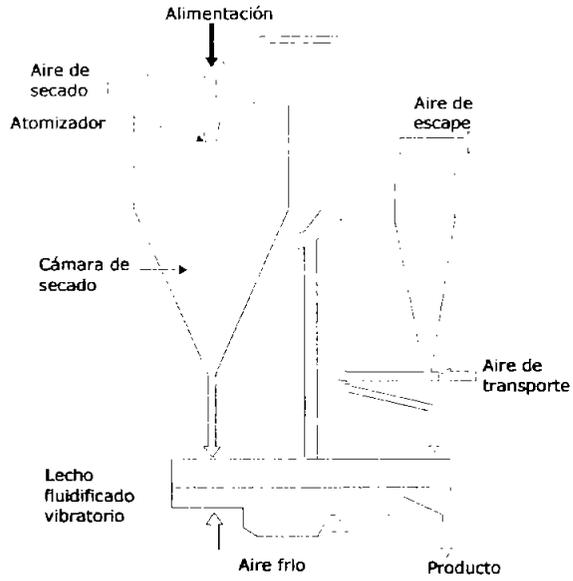


Figura 1.4. Secador por aspersion en dos etapas. Varnam, 1995

## **1.5. PRODUCTOS LACTEOS OBTENIDOS MEDIANTE UN PROCESO DE CONSERVACIÓN POR CONCENTRACIÓN.**

A partir de leche fresca se elaboran diversos productos ampliamente aceptados por la mayoría de la población. En general la leche al contener un gran número de nutrientes y por ser un alimento con un pH casi neutro, esta sujeta a contaminaciones microbiológicas que la hacen ser un producto altamente perecedero.

Debido a esto es necesario obtener productos lácteos en diversas presentaciones, para el aseguramiento de tal producto, dentro de los principales productos que se obtienen mediante un proceso de eliminación de agua se encuentran los siguientes:

### **1.5.1 Leche evaporada.**

En la industria láctea, la reducción parcial del agua de constitución, se lleva a cabo mediante un proceso de concentración por evaporación obteniendo como producto final leche evaporada. Para la comercialización de leche evaporada es necesario aplicar un tratamiento de conservación adicional como es la esterilización. Tratamiento que como anteriormente se había mencionado combina altas temperaturas con un tiempo determinado de proceso.

La leche evaporada se obtiene por una deshidratación parcial de la leche entera, semidescremada o descremada. Se obtiene a partir de leche de alta calidad que se precalienta a temperaturas aproximadamente de pasteurización. La leche se concentra normalmente en una proporción 3:1 en el proceso de evaporación. Alais, 1998 ; Badui, 1993

### **1.5.2. Leche evaporada azucarada (leche condensada).**

La leche condensada se obtiene a partir de leche entera o descremada. La prolongación de la vida útil de este producto no se debe a su tratamiento térmico, sino a la reducción de la actividad de agua ( $a_w$ ) como consecuencia de alta concentración de solutos. La leche se precalienta y, en algunos casos, se somete a un sobrecalentamiento, antes de pasar al evaporador. La práctica normal es añadir el azúcar en una solución de un 65% en las últimas fases de la evaporación. Cuando el azúcar se añade en este momento, es necesario pasar el concentrado a través de un "finalizador", un pequeño evaporador aparte que está especialmente diseñado para eliminar agua de volúmenes relativamente pequeños hasta dejar el producto con un alto contenido en sólidos totales y para trabajar con material viscoso. <sup>Alais, 1998</sup>

### **1.5.3. Leche en polvo.**

Para la elaboración de leche en polvo, se parte de leche de buena calidad microbiológica. La leche puede ser entera, descremada o semidescremada. La leche cruda debe someterse a un tratamiento térmico que sea al menos equivalente al de pasteurización. Después del tratamiento térmico, la leche pasa a la etapa de concentración por evaporación, de esta manera la leche se concentra hasta el 45 a 55 % de sólidos totales. Enseguida la leche pasa al atomizador del secador. La temperatura del aire de entrada es de 453.15 a 503.15 K y la de salida de 343.15 a 368.15 K, el producto final en polvo tiene una humedad residual del 2 a 5 % (95-98% de sólidos totales). <sup>Alais-1998; Varnam-1995</sup>

Tabla 1.3. Composición química de diversos tipos de leche. <sup>Alais 1998</sup>

Componente	Leche	Leche concentrada		Leche en polvo		
		Leche concentrada azucarada	Entera	Descremada	Entera	Descremada
Agua	87.5	29	66	68.5	4	5
Materias grasas	3.5	9	10	0.5	26	1.5
Materias nitrogenadas	3.3	9	9	12	27	34
Lactosa	4.9	12	13	16	37	50
Materias minerales	0.8	2	2	3	6	8
Sacarosa		41				
Extracto seco	9.0	23	24	31	70	93.5

En la tabla 1.3 podemos observar la composición de los distintos tipos de leche anteriormente mencionados que se elaboran mediante un proceso de evaporación y/o secado respectivamente. Como podemos observar los diferentes tipos de leche que son sometidos a un proceso de concentración presentan una disminución en su porcentaje de agua en comparación con el porcentaje que presenta la leche normal, debido a esto presentan un incremento en sus distintos componentes por efecto de la eliminación de agua.

## 2.1. DEFINICIÓN DE SOLUCION.

Debido a que algunos componentes de la leche como la lactosa, las sales y algunas vitaminas hidrosolubles existen en solución es importante conocer las propiedades de las soluciones así como sus efectos sobre el aumento en la temperatura de ebullición.

Una solución es cualquier fase homogénea que contenga mas de un componente. Se realiza adicionando una sustancia a otra, de tal manera que después de mezcladas, se observe un solo estado físico. En una solución, la mayor cantidad de sustancia, y la que corresponde al estado físico observado se llama solvente, la sustancia en menor cantidad y que se disuelve en un solvente dado se llama soluto. Laidler Keth, 1998; Wolfe, 1996

A escala microscópica suceden tres cosas cuando se forma una solución: 1) las partículas del soluto se separan entre sí; 2) las moléculas del solvente se alejan entre sí para dar cabida a las partículas del soluto; y 3) las partículas del soluto y las moléculas del solvente se mezclan.

Se considera que una solución es ideal cuando existe una uniformidad total de las fuerzas Intermoleculares, que surgen de un tamaño molecular y una estructura semejantes. En general una solución que se forma sin cambio alguno de energía se llama solución ideal. Laidler, 1998

La solubilidad se define como la cantidad de soluto que se disuelve en una cantidad determinada de solvente. Para predecir la solubilidad de una sustancia en otra se deben considerar tres factores: la naturaleza del soluto y del solvente, la temperatura y la presión. Wolfe, 1996

Una solución acuosa de un electrolito conduce una corriente por que el soluto se separa en iones al disolverse. Las sales solubles, los ácidos y las bases fuertes se disocian completamente y sus soluciones conducen una gran corriente, así que estos solutos son electrolitos fuertes. Los ácidos y las bases débiles se disocian muy poco, y son electrolitos débiles por que sus soluciones conducen poca corriente. Muchos compuestos, como azúcar y alcohol, no se disocian en lo absoluto en iones. Son no electrolitos por que sus soluciones no conducen ninguna corriente. Silberberg, 2002

## 2.2. LEY DE RAOULT

Las presiones de vapor parciales de los componentes individuales dentro de la solución permiten medir comportamiento de dichos componentes. Esto se debe a que la presión de vapor parcial mide la tendencia que tiene una molécula a escapar de la solución, lo que a su vez constituye una medida de las fuerzas de cohesión dentro de la solución. Laidler, 1998

La ley de Raoult describe la dependencia entre la presión de vapor de un componente en una solución ideal, y la presión de vapor del mismo componente puro a la temperatura de la solución. La presión de vapor de un componente en una solución es igual al producto de la fracción mol del componente en la solución por la presión de vapor del componente puro a la temperatura de la solución.

2.1

$$P_{V_{A \text{ en solución}}} = X_{A \text{ en solución}} \cdot P_{V_{A \text{ puro}}}$$

La fracción mol del componente A es la fracción de la cantidad total de moles en la solución, formada por A:

2.2

$$X_A = \frac{n_A}{(n_A + n_B + n_C)}$$

La presión de vapor total de una solución ideal es igual a la suma de la presión de vapor de los componentes volátiles de la solución.

2.3

$$P_{v \text{ solución}} = P_{v_{A \text{ en solución}}} + P_{v_{B \text{ en solución}}} + P_{v_{C \text{ en solución}}}$$

La presión parcial de un componente de una mezcla gaseosa es igual a la fracción mol del componente multiplicada por la presión total de la mezcla. Umland, 2000

2.4

$$P_A = X_A P_{total}$$

### 2.3. LEY DE HENRY

Otra de las propiedades de las soluciones es, que la masa del gas  $m_B$  disuelta en un volumen dado de disolvente a temperatura constante, es proporcional a la presión del gas en equilibrio con la solución.

2.5

$$m_B = K_B P_B$$

La ecuación 2.5 es conocida como la ley de Henry la cual expresa la relación cuantitativa entre la presión y la solubilidad de los gases. Donde el subíndice B se utiliza para referirse al soluto (el subíndice A suele

emplearse para el disolvente) y  $K$  es la constante de la ley de Henry. La mayoría de los gases sigue la ley de Henry a temperaturas que no sean demasiado bajas y presiones moderadas. Puesto que la masa por unidad de volumen es igual a la concentración, la ecuación 2.5 se puede escribir de la siguiente manera:

2.6

$$P_B = K'x_B \quad \text{o} \quad P_B = K''c_B$$

Donde para soluciones diluidas la concentración  $c_2$  es proporcional a la fracción molar de la sustancia disuelta. Laidler, 1998; Silberbeg 2002

Como la ley de Raoult es aplicable al soluto volátil y también al disolvente volátil, la presión  $P_2$  del soluto volátil en equilibrio con una solución en la cual el soluto tenga una fracción molar de  $X_B$  es:

2.7

$$P_2 = x_2 p_2^*$$

En este caso  $P_2^*$  es la presión de vapor del gas bajo licuefacción a la temperatura de la solución. De este modo se observa que un gas en solución puede considerarse en términos de su solubilidad a la presión  $P_2$  o bien,  $P_2$  puede considerarse como la presión de vapor del soluto volátil. Laidler, 1998

## 2.4. ENERGÍA DE GIBBS

La contribución de cada componente en una solución se describe en términos de cantidades molares parciales. Cualquier propiedad termodinámica extensiva  $X = x(T, P, n_i)$  tiene un valor molar parcial  $X_1$  que se define:

2.8

$$X_1 \equiv \left[ \frac{\partial X}{\partial n_i} \right]_{T, P, n_j}$$

Todas las ecuaciones termodinámicas son aplicables a estas cantidades molares parciales. La energía de Gibbs molar parcial se conoce como potencial químico  $\mu_1$  y en sistemas de componentes múltiples el potencial químico desempeña un papel termodinámico que equivale a la energía de Gibbs. Laidler Keth, 1998

De acuerdo a la segunda ley de la termodinámica, la cual indica que cualquier proceso espontáneo debe ir acompañado de un aumento de la entropía total lo cual indica una condición para el equilibrio, ya que un sistema en equilibrio no puede experimentar un cambio espontáneo. Esta condición de equilibrio es conocida como energía de Gibbs y se denota por el símbolo  $G$ .

El criterio para que coexistan dos fases de una sustancia pura es que sus energías de Gibbs sean iguales a determinada temperatura y presión. Sin embargo cuando  $T$  o  $P$  cambia mientras que la otra variable se mantiene constante, una de las fases desaparece, esto se puede comprobar en un diagrama de fases del agua mostrado en la figura 2.1

observando que al disminuir la presión del sistema existe un cambio en la fase. <sup>Laidler Keth, 1998</sup>

Las variables asociadas con el criterio de equilibrio de la energía de Gibbs son la presión y la temperatura, por lo que es natural describir el equilibrio de fases en un diagrama de presión - temperatura mostrado en la figura 2.1. <sup>Laidler, 1998</sup>

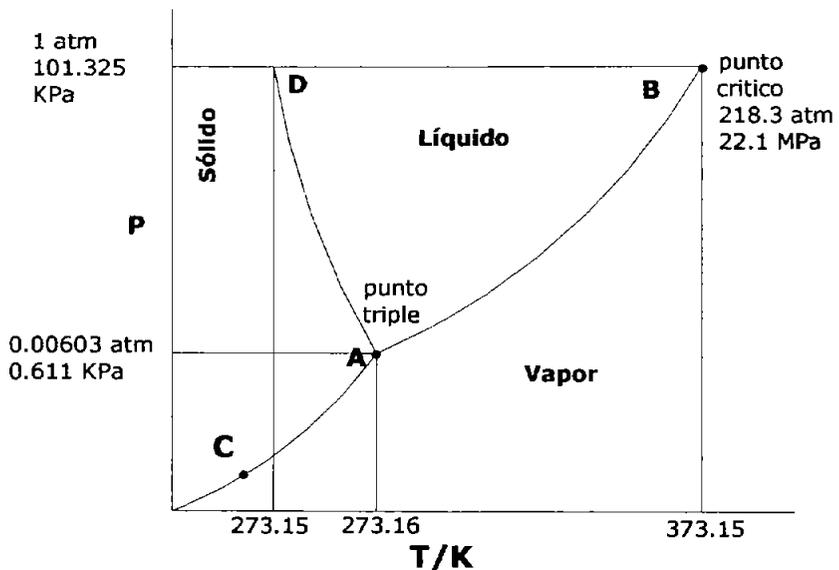


Figura 2.1 Diagrama de fases del agua. <sup>(Laidler, 1998)</sup>

Un diagrama de fases es una forma grafica de resumir las condiciones bajo las cuales se da un equilibrio entre estados diferentes de la materia y permite predecir la fase de una sustancia que es estable a cualquier temperatura y presión. <sup>Brown, 1993</sup>

El diagrama contiene tres curvas importantes y cada una representa las condiciones de temperatura y presión en las que pueden coexistir varias fases en equilibrio. Las áreas marcadas como sólido, líquido y vapor son regiones en donde sólo existe una fase. Brown, 1993; Laidler, 1998

La línea A - B es la curva de presión de vapor del líquido. Representa el equilibrio entre las fases líquida y gaseosa. El punto de esta curva, donde la presión de vapor es de 1atm, es el punto de ebullición normal de la sustancia. La curva de presión de vapor termina en el punto crítico B que es la temperatura crítica y la presión crítica de la sustancia. La línea A - C representa la variación de la presión de vapor del sólido, a medida que se sublima a temperaturas diferentes. La línea A - D representa el cambio en el punto de fusión del sólido cuando aumenta la presión. Esta línea suele presentar una pendiente ligeramente hacia la derecha a medida que la presión aumenta. El punto de fusión de una sustancia es idéntico a su punto de congelación. Los dos difieren solamente en la dirección desde la cual se considera el cambio de fase. Brown, 1993

En el punto triple las tres fases (líquida, sólida y vapor) coexisten a la misma presión de vapor, 0.61 KPa. Es un punto invariable para el sistema acuoso, lo cual significa que sólo en este conjunto de condiciones pueden coexistir las tres fases. Laidler, 1998

Cualquier punto sobre el diagrama que no caiga sobre una línea corresponde a las condiciones en las que sólo existe una de las tres fases. Brown, 1993

## 2.5. PROPIEDADES COLIGATIVAS.

Una propiedad coligativa es aquella que esta directamente relacionada con el número de partículas de soluto disueltas en el disolvente. En gran medida, las propiedades coligativas son independientes de la naturaleza del soluto únicamente dependen de la concentración de las partículas de soluto disueltas. Estas cuatro propiedades físicas que son iguales para todos los solutos no volátiles son: la disminución de la presión de vapor, la elevación del punto de ebullición, la disminución del punto de congelación y la presión osmótica. A pesar de que la mayoría de estos efectos son pequeños tienen muchas aplicaciones prácticas, incluyendo algunas vitales para sistemas biológicos. Para efecto de este estudio sólo se consideraran las dos primeras. Silberberg, 2002; Umland, 2000

### 2.5.1. Disminución de la presión de vapor.

Cuando se disuelve un soluto no volátil no electrolito en un solvente la presión de vapor de la solución es menor que la presión de vapor del agua pura. Esta disminución de la presión de vapor  $\Delta P$  se puede entender si recordamos que los procesos naturales tienden a ocurrir en la dirección que incrementa el desorden. Un disolvente puro se evapora por que las partículas que se mueven aleatoriamente en fase de vapor tienen un desorden mayor que cuando se encuentran aglomeradas entre sí en el líquido (figura 2.2). Una solución tiene mayor desorden que un líquido puro así que el disolvente tiene una menor tendencia a evaporarse para alcanzar el mismo nivel de desorden. Como resultado de esto se alcanza el equilibrio para la solución, se igualan las velocidades de evaporación y condensación a una menor presión de vapor.

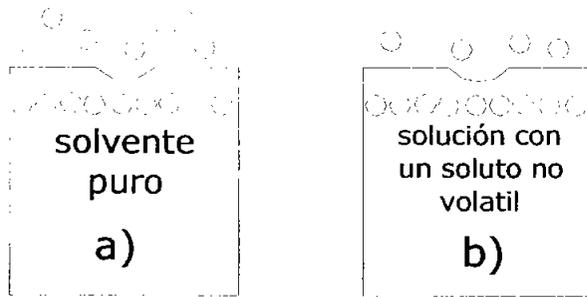


Figura 2.2. Representación de un proceso de evaporación. Wolfe, 1996

En la figura 2.2 podemos observar que en a) en un solvente puro, todas las moléculas superficiales son moléculas del solvente; b) en una solución que contiene un soluto no volátil en la superficie hay moléculas del soluto y del solvente, las moléculas del soluto disminuyen el número de moléculas superficiales de solvente que puede evaporarse.

Cuando un líquido se evapora, sus moléculas en la fase gaseosa ejercen una presión de vapor. Tan pronto como unas moléculas dejan el líquido, se establece una fase de vapor.

En términos cuantitativos podemos decir que la presión de vapor del disolvente sobre la solución ( $P_{\text{disolvente}}$ ) es igual a la fracción molar del disolvente en la solución ( $X_{\text{disolvente}}$ ) multiplicado por la presión de vapor del disolvente puro ( $P^{\circ}_{\text{disolvente}}$ ). Esta relación se expresa con la ley de Raoult mencionada anteriormente.

2.9

$$P_{\text{disolvente}} = X_{\text{disolvente}} \cdot P^{\circ}_{\text{disolvente}}$$

Debido a que  $X_{disolución}$  siempre es menor que 1, la  $P_{disolvente}$  es siempre menor que la  $P^{\circ}_{disolvente}$ . En la práctica la ley de Raoult realiza una buena aproximación al comportamiento de soluciones diluidas.

Ahora si la solución consiste sólo de un soluto y un disolvente, la suma de sus fracciones molares es igual a 1.

2.10

$$X_{disolvente} + X_{soluto} = 1 \quad \therefore \quad X_{disolvente} = 1 - X_{soluto}$$

Reordenando la ecuación 1 tenemos:

2.11

$$P_{disolvente} = X_{disolvente} \cdot P^{\circ}_{disolvente} = (1 - X_{soluto}) \cdot P^{\circ}_{disolvente}$$

Multiplicando el término del lado derecho obtenemos la siguiente expresión:

2.12

$$P_{disolvente} = P^{\circ}_{disolvente} - (X_{soluto} \cdot P^{\circ}_{disolvente})$$

Al reagrupar la ecuación anterior tenemos:

2.13

$$P^{\circ}_{disolvente} - P_{disolvente} = \Delta P = X_{soluto} \cdot P^{\circ}_{disolvente}$$

De esta manera la magnitud de  $\Delta P$  es igual a la fracción molar del soluto multiplicada por la presión de vapor del disolvente puro.

### 2.5.2. Aumento en el punto de ebullición.

La adición de moléculas de un soluto no electrolito y no volátil hace bajar la presión de vapor del solvente, debido a esto se deben alcanzar mayores temperaturas para igualar la presión de vapor del solvente con la presión atmosférica. De esta manera el punto de ebullición de una solución de soluto no volátil no electrolito es mayor que la temperatura de ebullición del solvente puro.

El punto de ebullición ( $P_e$ ) de un líquido es la temperatura a la cual su presión de vapor es igual a la presión total del sistema. Ya que la presión de vapor de una solución es mas baja que la presión externa en el punto de ebullición del disolvente, la solución no ebulle. De acuerdo con esto es necesaria una temperatura más alta para elevar la presión de vapor de la solución de tal manera que sea igual a la presión externa. Se puede observar este aumento en la temperatura de ebullición sobreponiendo un diagrama de fase para la solución sobre uno para el disolvente puro tal como se muestra en la figura 2.3.

Observemos que la curva vapor – líquido para la solución permanece por debajo de la curva del disolvente puro a cualquier temperatura y a su derecha a cualquier presión. Umland, 2000; Wolfe, 1996

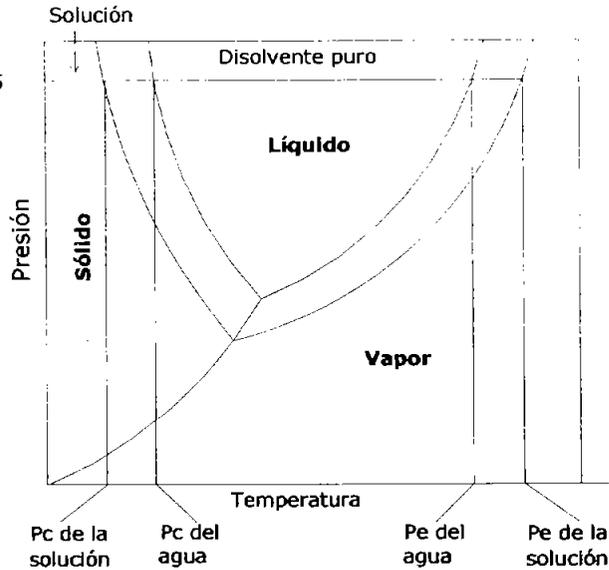


Figura 2.3. Diagrama de fases del disolvente y de la solución.

Considerando una solución en equilibrio con el vapor del solvente puro. La condición de equilibrio es que:

2.14

$$\mu(T, p, x) = \mu_{\text{vap}}(T, P)$$

Si la solución es ideal,

2.15

$$\mu^{\circ}(T, P) + RT \ln x = \mu_{\text{vap}}(t, p),$$

2.16

$$\ln x = \frac{\mu_{\text{vap}} - \mu^{\circ}(T, p)}{RT}$$

La energía libre de vaporización es:

2.17

$$\Delta G = \mu_{\text{vap}}(T, p) - \mu^{\circ}(T, p)$$

De manera que:

2.18

$$\ln x = \frac{\Delta G_{\text{vap}}}{RT}$$

Diferenciando la ecuación con respecto a  $x$ , a presión constante, obtenemos:

2.19

$$\frac{1}{x} = \frac{1}{R} \left[ \frac{\partial(\Delta G_{\text{vap}}/T)}{\partial T} \right]_P \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)_P$$

Aplicando la ecuación de Gibbs- Helmholtz, la ecuación anterior se reduce a:

2.20

$$\frac{1}{x} = - \frac{\Delta H_{\text{vap}}}{RT^2} \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)_P$$

La ecuación puede integrarse para obtener:

2.21

$$\int_x^x \frac{dx}{x} = - \frac{1}{R} \int_{T_0}^T \frac{\Delta H_{\text{vap}}}{T^2} dT$$

Donde el límite inferior corresponde al solvente puro con una temperatura de ebullición  $T_0$  y el superior a la solución en la cual la fracción molar del solvente es  $x$  con una temperatura de ebullición  $T$ . La integración se hace suponiendo que  $\Delta H_{vap}$  es independiente de la temperatura. Castelan, 1976

2.22

$$\ln x = -\frac{\Delta H_{vap}}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)$$

que se transforma en:

2.23

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_0} + \frac{R \ln x}{\Delta H_{vap}}$$

La temperatura de ebullición  $T$  de la solución se expresa en función del calor de vaporización y la temperatura de ebullición del solvente puro,  $\Delta H_{vap}$  y  $T_0$ , y la fracción molar  $x$  del solvente en la solución. Castelan, 1976

Para expresar la elevación de la temperatura de ebullición en función de la molalidad total de los solutos, la ecuación anterior se escribe en la forma:

2.24

$$dT = -\frac{RT^2}{\Delta H_{vap}} d \ln x$$

Incluyendo la ecuación

2.25

$$d \ln x = - \frac{(M/100)}{[1 + (Mm/1000)]} dm$$

La ecuación 2.24 se transforma en

2.26

$$dT = \frac{MRT^2}{1000\Delta H_{vap}} \frac{dm}{[1 + (Mm/1000)]}$$

Si la solución es diluida con respecto a todos los solutos, entonces  $m$  se aproxima a cero y  $T$  a aproxima a  $T_0$ . La constante de elevación de la temperatura está definida por:

2.27

$$K_{pe} = \left( \frac{\partial T}{\partial m} \right)_p = \frac{MRT_0^2}{1000\Delta H_{vap}}$$

La elevación de la temperatura de ebullición  $\Delta T = T - T_0$ , de modo que  $d\Delta T_b = 0$ . Mientras  $m$  sea pequeña, la ecuación se integra a

2.28

$$\Delta T_e \propto m \quad \text{ó} \quad \Delta T_e = K m$$

La relación entre la elevación de la temperatura de ebullición y la molalidad de una solución ideal diluida, corresponde a la relación entre la disminución de la temperatura de congelación y la molalidad. Castelan, 1976

Donde  $m$  es la molalidad de las partículas de soluto en la solución y  $K$  es una constante molal de elevación del punto de ebullición que depende de las características del disolvente y tiene unidades de grados centígrados por unidad molar (K/m). En la tabla 3.1 se muestran algunos datos para constantes de elevación para algunos disolventes. <sup>Chang, 2002</sup>

Tabla 3.1. Constantes de elevación del punto de ebullición y depresión del punto de congelación. <sup>Umiand 2000</sup>

<b>Disolvente</b>	<b>Punto de ebullición normal (K)</b>	<b><math>K_{pe}</math> (K/m)</b>	<b>Punto de congelación normal (K)</b>	<b><math>K_{pc}</math> (K/m)</b>
Agua H <sub>2</sub> O	373.15	0.512	273.15	-1.86
Benceno C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	353.15	2.53	478.65	-5.12
Alcanfor	480.55	5.61	451.195	-39.7

Se utiliza la molalidad como unidad de concentración por que esta relacionada directamente con la fracción molar y, en consecuencia a las partículas de soluto. También implica masa en lugar de volumen de disolvente, así que no se ve afectada por cambios de temperatura.

### 3.1. DEFINICIÓN DE EVAPORACION.

Como se menciona anteriormente la evaporación, es un proceso de transferencia de calor, en el cual un líquido se lleva a ebullición por medio de un intercambiador de calor, utilizando normalmente vapor saturado, reduciendo las temperaturas de proceso por la aplicación de vacío al sistema, en el proceso.

Durante la evaporación, el calor latente se transfiere desde el medio de calentamiento (vapor) hacia el alimento, de esta manera se hace posible que el líquido alcance su temperatura de ebullición, por lo tanto cuando la presión de vapor del líquido alcanza la presión del entorno, el líquido hierve produciendo un cambio de fase de agua a vapor.

Generalmente la velocidad de transferencia de calor no depende de la  $T$  del medio de calentamiento, uno de los factores que se deben de tomar en cuenta entre otras variables, es la diferencia de temperaturas ( $\Delta T$ ) entre la  $T$  del medio de calentamiento y la  $T$  de ebullición del líquido. Para obtener una diferencia de temperaturas, la  $T$  del medio de calentamiento debe de ser mayor a la  $T$  de ebullición del líquido. De este modo se puede elevar la velocidad de evaporación incrementando la diferencia de temperaturas. De igual manera la velocidad de evaporación esta determinada por la velocidad de transferencia de calor hacia el alimento y de la velocidad de transferencia de masa de vapor a partir del alimento. Brennan, 1980

Para la evaporación de alimentos líquidos, que pueden alterarse por exposición a elevadas temperaturas de proceso, es necesario reducir la temperatura de ebullición, esto se logra trabajando a presión reducida utilizando dispositivos que la reduzcan.

Dentro de los principales se encuentran los siguientes: a) eyectores de vapor de agua y b) bombas de vacío, los dos combinados generalmente con condensadores para el vapor procedente del evaporador. Dentro de las ventajas que se obtienen con el empleo de vacío, es que se asegura tener dentro del sistema temperaturas bajas de proceso y evitar la degradación del alimento por efecto de calor, además de que incrementa la diferencia de temperaturas entre el medio de calentamiento y la temperatura de ebullición del alimento.

Para mantener el vacío dentro del sistema es necesario remover continuamente y rápidamente los vapores del alimento y aire u otros gases (comúnmente no condensables) originados con el producto o de aire escapado en el equipo.

Finalmente la evaporación es diferente del secado ya que el producto tratado en el proceso de evaporación permanece siempre en estado líquido.

### 3.2. OBJETIVOS DE LA EVAPORACIÓN.

El proceso de evaporación es una de las operaciones básicas que normalmente se utiliza para disminuir la cantidad de agua de alimentos líquidos diluidos, obteniendo productos mas concentrados. La evaporación tiene diversos objetivos a alcanzar, los cuales generalmente siempre son para mantener un producto en buen estado, alargando su vida de anaquel. De esta manera tenemos que la reducción de agua hace que aumente el contenido de sólidos en el caso de mermeladas y melazas mejorando su conservación por reducción de su actividad de agua y por la elevada presión osmótica por la adición de azúcar.

Provoca una disminución en el peso y volumen del alimento reduciendo los costos de almacenamiento y transporte; cambia el aroma y color de los alimentos por ejemplo en los jarabes caramelizados y leche evaporada para su utilización en productos de panadería mejorando el sabor del producto final; y finalmente tenemos un producto de uso mas conveniente por que proporciona estabilidad microbiológica. <sup>Brennan,1980;</sup>  
Singh,1998

### 3.3. TERMODINAMICA DE LA PRESION DE VAPOR.

La mayoría de las sustancias pueden existir en más de una fase o estado de agregación el criterio para el equilibrio entre dos fases es que la energía de Gibbs sea la misma en ambas fases, en determinada temperatura y presión. Sin embargo cuando T o P cambia mientras que la otra variable se mantiene constante, una de las fases desaparecerá.

Formulando el equilibrio de fases para una sola sustancia pura en el estado líquido y vapor. Si la presión y la temperatura se hacen variar de manera infinitesimal conservando el equilibrio se obtiene la ecuación.

3.1

$$dG_v = dG_l$$

Como la expresión sólo depende de T y P, las derivadas totales se pueden escribir de la siguiente manera

3.2

$$\left(\frac{\partial G_v}{\partial P}\right)_T dP + \left(\frac{\partial G_v}{\partial T}\right)_P dT = \left(\frac{\partial G_l}{\partial P}\right)_T dP + \left(\frac{\partial G_l}{\partial T}\right)_P dT$$

Utilizando dos de las relaciones de Maxwell ecuaciones 3.3 y 3.4 obtenemos la ecuación 1.5

3.3

$$\left( \frac{\partial G_m}{\partial P} \right)_T = Vm$$

3.4

$$\left( \frac{\partial G_m}{\partial T} \right)_P = -Sm$$

Las derivadas parciales pueden sustituirse mediante la ecuación 3.3 y 3.4 en la ecuación 3.2 para obtener la siguiente expresión:

3.5

$$Vm_v dP - Sm_v dT = Vm_l dP - Sm_l dT$$

O bien

3.6

$$\frac{dP}{dT} = \frac{Sm_v - Sm_l}{Vm_v - Vm_l} = \frac{\Delta Sm}{\Delta Vm}$$

Si el cambio de entalpía molar a presión constante para la transformación de fase es  $\Delta Hm$ , el término  $\Delta Sm$  puede expresarse como  $\Delta Hm/T$  y la ecuación se transforma en:

3.7

$$\frac{dP}{dT} = \frac{\Delta H_m}{T \Delta V_m}$$

La cual es la forma general de la ecuación de Clapeyron y pueden aplicarse a procesos de evaporación. Al efectuar la derivación no se hace ninguna suposición especial y por lo tanto es válida para el proceso general de equilibrio entre dos fases cualesquiera de la misma sustancia. Para aplicar la ecuación 3.7 es necesario conocer la entalpía molar del proceso junto con la presión de vapor en el equilibrio. Para integrar esta expresión de manera exacta, es preciso conocer  $\Delta H_m$  y  $\Delta V_m$  en función de la temperatura y la presión; sin embargo se pueden considerar constantes en intervalos de temperatura poco amplios.

Cuando una de las fases en equilibrio es una fase de vapor, se supone que  $V_{m,v}$  es mucho más grande que  $V_{m,l}$ , de manera que  $V_{m,l}$  puede despreciarse en comparación con  $V_{m,v}$ , cuando la presión es de aproximadamente 1 bar. La segunda suposición es reemplazar  $V_{m,v}$  por su equivalente de la ley de los gases ideales,  $RT/P$ . Entonces la ecuación 3.7 se transforma en 3.8

3.8

$$\frac{dP}{dT} = \frac{\Delta_{vap} H_m P}{RT^2}$$

o si la presión estándar es 1 atmósfera,

3.9

$$\frac{dP}{P dT} = \frac{d \ln(P)}{dT} = \frac{\Delta_{vap} H_m}{RT^2}$$

La expresión 3.9 se conoce como ecuación de Clausius -Clapeyron. Para poder utilizar la ecuación se efectúa la integración suponiendo que  $\Delta_{vap} H_m$  es independiente de la temperatura y la presión obteniendo la siguiente expresión:

3.10

$$\int \frac{d \ln P}{dT} = \int \frac{\Delta_{vap} H_m}{RT^2}$$

3.11

$$\int d \ln P = \frac{\Delta_{vap} H_m}{R} \int T^{-2} dT$$

3.12

$$\ln P = - \frac{\Delta_{vap} H_m}{RT} + C$$

Donde C es una constante de integración, otra forma útil de la ecuación 3.12 se obtiene integrando entre límites específicos:

3.13

$$\int_{P_1}^{P_2} d \ln P = \frac{\Delta_{vap} H_m}{R} \int_{T_1}^{T_2} T^{-2} dT$$

Estableciendo los límites la ecuación queda de la siguiente manera

3.14

$$\ln \frac{P_2}{P_1} = \frac{\Delta_{vap} H_m}{R} \left[ \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right]$$

Una vez consideradas las ecuaciones de Clausius –Clapeyron podemos entender la termodinámica del proceso de evaporación. Mediante el estudio de las relaciones termodinámicas que se mencionan a continuación.

### **3.4. TERMODINÁMICA DEL PROCESO DE EVAPORACIÓN.**

La termodinámica juega una función muy importante en la descripción del proceso de evaporación para productos alimenticios. Es particularmente evidente esta importancia en la descripción y evaluación de parámetros para describir el cambio de fase y establecer la elevación del punto de ebullición. Hay dos factores que deben tomarse en cuenta en el proceso de evaporación:

**3.4.1. Cambio de fase.**

Como se ha mencionado anteriormente durante el proceso de evaporación ocurre un cambio de fase, para relacionar el calor latente de vaporización el cual se describe en función de la presión, esta relación es indicada por medio de la ecuación de Clausius- Clapeyron 3.12.

3.15

$$\ln P = -\frac{\Delta H}{RT} + C$$

La cual claramente expresa que existe una relación directa entre el calor latente de vaporización ( $\Delta H$ ) y la presión de vapor ( $P$ ). Para productos alimenticios que contienen sólidos y otros componentes que influyen en el calor latente de vaporización se puede utilizar la misma ecuación pero considerando que es para un alimento.

3.16

$$\ln P' = -\frac{\Delta H'}{RT} + C$$

La ecuación 3.16 relaciona el calor latente de vaporización para un alimento fluido ( $\Delta H'$ ); a la presión de vapor ( $P'$ ) y a la misma temperatura ( $T$ ). De esta manera combinando las dos ecuaciones, anteriores considerando que es a la misma temperatura obtenemos la siguiente expresión.

3.17

$$\ln p' = \frac{\Delta H'}{\Delta H} \ln p + C'$$

Para establecer la relación  $\ln - \ln$  entre la presión de agua pura y la presión del líquido alimenticio. Se traza el logaritmo de presión de vapor para productos alimenticios contra el logaritmo de presión de agua pura a varias temperaturas, estableciendo la relación entre el calor latente del alimento líquido y el calor latente del agua.

### 3.4.2. Punto de ebullición.

Para todo líquido existe una temperatura a la cual empieza a hervir. El punto de ebullición es la temperatura a la cual la presión de vapor de un líquido es igual a la presión externa. En el punto de ebullición, se forman burbujas en el seno del líquido. Cuando se forma una burbuja, el líquido que originalmente ocupaba ese espacio es impulsado hacia los lados, y se obliga a aumentar el nivel del líquido en el recipiente. La presión ejercida sobre la burbuja es la presión atmosférica, más algo de presión hidrostática. La presión dentro de la burbuja se debe sólo a la presión de vapor del líquido. Cuando la presión de vapor llega a ser igual a la presión externa, la burbuja sube a la superficie del líquido y se revienta. Si la presión de vapor en la burbuja fuera menor que la presión externa, la burbuja se desplomaría mucho antes de llegar a la superficie. Se puede concluir, por tanto, que el punto de ebullición de un líquido depende de la presión externa.

Dado que el punto de ebullición se define en términos de la presión de vapor de un líquido, se espera que el punto de ebullición este relacionado con el calor molar de vaporización: a mayor  $\Delta H_{vap}$ , mayor será el punto de ebullición

### 3.5. EFECTO DE LAS VARIABLES DE PROCESO.

#### 3.5.1. Efecto de la temperatura de alimentación.

La temperatura de entrada de la alimentación tiene un gran efecto sobre la operación del evaporador. Si la alimentación está a presión y temperatura superior al punto de ebullición en el evaporador, se logra una vaporización adicional por medio de la evaporación instantánea de una parte de la alimentación caliente. El precalentamiento reduce el tamaño del evaporador y el área de transferencia de calor que se requiere. Geankoplis, 1982

La alimentación que se introduce en un evaporador a de ser tal, comparada con el líquido hirviente contenido en él que la temperatura media del líquido hirviente no sea afectada por la entrada de alimentación fría o caliente. Si la alimentación se encuentra a una temperatura muy baja con respecto al punto de ebullición del líquido concentrado, probablemente existirían zonas en el evaporador en las que la temperatura del líquido podría ser inferior a la del punto de ebullición del líquido concentrado.

Sería imposible determinar la extensión de estas zonas y su temperatura media, por lo que prácticamente, la única temperatura que puede utilizarse para los cálculos es la temperatura de ebullición del líquido concentrado. Badger, 1981

### 3.5.2. Efecto de la presión del sistema.

Normalmente se desea que exista una diferencia de temperaturas ( $\Delta T$ ) elevada, refiriéndonos a la diferencia que existe entre la temperatura del medio de calentamiento y la temperatura de ebullición del líquido, debido a que cuanto mayor sea el  $\Delta T$ , menor es la superficie de calentamiento necesaria y, por tanto, el costo del equipo de evaporación. Si se agrega al equipo un condensador y una bomba de vacío puede lograrse que la presión en el espacio de vapor sea menor que la atmosférica. En general los evaporadores no tienen que trabajar en vacío necesariamente, pero como es más económico alimentarlos con vapor a bajas presiones es necesario producir vacío con ellos para tener una caída de temperatura  $\Delta T$  económica. Badger, 1981

### 3.5.3. Efecto de la presión de vapor de agua.

La razón de que no se utilice vapor de alta presión es que el vapor en estas condiciones de presión y temperatura es mucho más valioso como fuente de potencia que como fuente de calor. En efecto el vapor de alta presión tiene un valor menor de calor latente que el vapor de baja presión. Debido a esto se deduce que en un evaporador cualquiera, el vapor de baja presión deja en libertad mayor cantidad de calor como calor latente, que el vapor de alta presión. En general la mayor parte de los evaporadores trabajan con vapor entre 34.324 -171.6209 KPa, aunque también existen algunos que lo hacen con vapor entre 343.241 y 441.310 KPa. (Badger 1981)

### 3.6. CALCULO DEL AUMENTO EN EL PUNTO DE EBULLICIÓN.

Generalmente la vaporización de líquidos puros no representa ningún problema desde el punto de vista fisicoquímico. La temperatura del líquido está fijada por la presión bajo la cual es manejada, y esto puede calcularse conociendo la relación entre presión de vapor y temperatura. <sup>Foust, 1960</sup>

Existen tres métodos principales que se utilizan para la evaluación del aumento en el punto de ebullición los cuales son:

- 1) Método experimental (el sistema se encuentra abierto)
- 2) Cálculo termodinámico (Ecuación de Dalton y Ley de Raoult)
- 3) Rectas de Dühring

#### 3.6.1. Método experimental.

Consiste en tomar la temperatura de ebullición de la solución y del agua en un recipiente abierto y el aumento en el punto de ebullición es la diferencia entre las dos temperaturas de ebullición.

Calculando el  $APE = T_A - T_B$

Donde  $T_A$  = temperatura de la solución

$T_B$  = temperatura de ebullición del agua

### 3.6.2. Cálculo termodinámico.

Para evaluar la temperatura de ebullición por medio de relaciones termodinámicas es necesario utilizar dos leyes de la termodinámica, como son la ley de Dalton y la ley de Raoult.

En general la ley de Dalton establece que la presión total de una mezcla de gases es igual a la suma de las presiones parciales de cada gas. En una mezcla de gases tenemos la siguiente expresión.

3.18

$$P_T = P_A + P_B$$

En una mezcla de gases A y B, en los cuales se refieren al soluto y al solvente respectivamente. Donde  $P_A$  y  $P_B$  son las presiones parciales de los gases y  $P_T$  es la presión total como resultado de las colisiones de ambos tipos de moléculas A y B.

En el caso de que el soluto sea no electrolito y no volátil, como normalmente es el caso en el proceso de evaporación la ecuación 3.18 se transforma en:

3.19

$$P_T = P_B X_B$$

Donde  $X_B$  se refiere a la fracción molar del solvente. La fracción molar es una cantidad adimensional que expresa la relación del número de moles de un componente con el número de moles de todos los componentes presentes. Y su valor siempre es menor que 1.

En el caso de tener una solución donde el soluto es no volátil podemos utilizar la ecuación 3.19 que expresa la ley de Raoult.

3.20

$$P_{disolvente} = X_{disolvente} \cdot P_{disolvente}^{\circ}$$

De esta manera al conocer la presión del disolvente y la fracción mol del disolvente, podemos conocer la presión de vapor del disolvente, obtener la temperatura de ebullición del líquido por medio de las tablas de vapor, realizar una diferencia de temperaturas y conocer el aumento en la temperatura de ebullición. Los detalles del cálculo por medio matemático se encuentran detallados mas adelante.

### 3.6.3. Rectas de Dühring.

El tercer método que se utiliza para evaluar el aumento en la temperatura de ebullición es mediante la utilización de las Rectas de Dühring, las cuales establecen una relación lineal entre la temperatura de ebullición de la solución y la temperatura de ebullición del agua a la misma presión. Esta relación no se cumple en todo el intervalo de temperaturas, pero es bastante aceptable si se utiliza en pequeños intervalos.

Cuando un líquido se evapora, sus moléculas en la fase gaseosa ejercen una presión de vapor. Tan pronto como unas cuantas moléculas dejan el líquido, se establece una fase de vapor. Como para todo fin practico, la presión de vapor de un componente no volátil es cero. Se puede establecer una relación entre el aumento en la temperatura de ebullición del líquido de interés y el líquido de referencia, se considera que sus

presiones de vapor son iguales. Utilizando una forma integrada de la ecuación de Clausius - Clapeyron.

Para un líquido de interés (alimento)

3.21

$$\ln P = -\frac{\Delta H_1}{RT_1} + C_1$$

Para un líquido de referencia (agua)

3.22

$$\ln P = -\frac{\Delta H_2}{RT_2} + C_2$$

Considerando que los dos tienen la misma presión de vapor igualamos las ecuaciones 3.21 y 3.22.

3.23

$$\ln P = -\frac{\Delta H_1}{RT_1} + C_1 = -\frac{\Delta H_2}{RT_2} + C_2$$

Donde  $T_1$  representa la temperatura de ebullición del líquido de interés y  $T_2$  representa la temperatura de ebullición del líquido de referencia. Realizando un arreglo obtenemos:

3.24

$$\frac{\Delta H_1}{RT_1} = \frac{\Delta H_2}{RT_2} + (C_2 - C_1)$$

La expresión 3.24 indica una relación lineal entre las dos temperaturas antes consideradas, utilizando una expresión de este tipo se obtiene un gráfico del tipo de Dühring mostrado en la figura 3.1.

Las curvas del gráfico muestran la relación entre la temperatura de ebullición de la solución y la temperatura de ebullición del agua. De igual manera indica como una solución entre mas concentrada se encuentre, mayor es su temperatura de ebullición. Aunque un gráfico de este tipo puede utilizarse para estimar el aumento en la temperatura de ebullición para alimentos líquidos, la magnitud exacta no se puede calcular sin tener mayor información específica de la composición del producto.

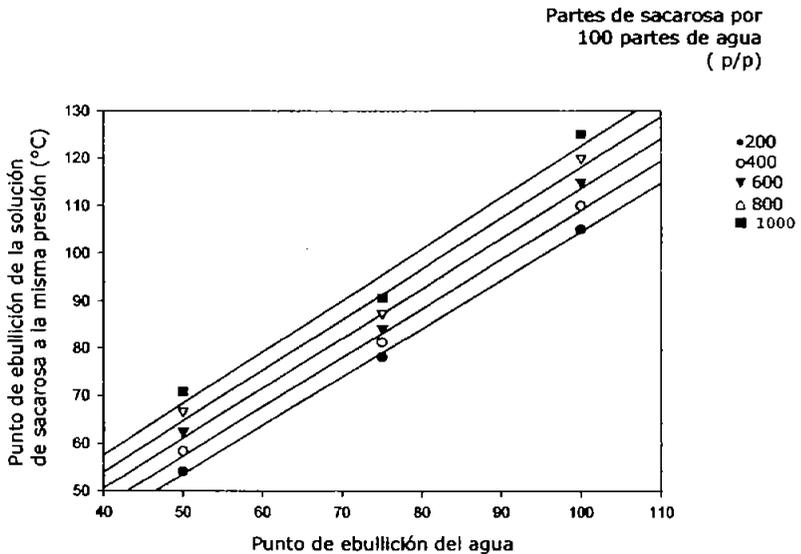


Figura 3.1. Representación grafica de Dühring para soluciones acuosas de sacarosa. Brennan, 1980

En resumen, de los tres métodos mostrados anteriormente para evaluar el aumento en el punto de ebullición concluimos que todos presentan un inconveniente para su utilización. Por ejemplo en el método experimental, donde se realiza la medición de temperaturas a la presión atmosférica presenta ciertas desventajas, debido a que el sistema se encuentra abierto y por lo tanto solo se obtiene una temperatura de ebullición. Además de que durante el calentamiento la solución se empieza a concentrar teniendo pérdidas de humedad provocando una variación en la concentración de la muestra, obteniendo una temperatura de ebullición incorrecta, por que la concentración no es la misma que inicialmente tenía la solución.

El segundo método propuesto en el cual intervienen relaciones matemáticas, implica el uso de las leyes de Dalton y de Raoult, incluye un inconveniente para poder utilizarlo, el cual consiste en conocer la masa molecular del alimento, y generalmente estos datos no son conocidos para alimentos debido a que son sistemas complejos de varios componentes como vitaminas, proteínas, carbohidratos, lípidos y minerales, donde cada componente varían de acuerdo a una gran cantidad de condiciones como son: el origen, el tipo, o de algún pretratamiento que haya tenido el alimento antes del proceso de vaporación. Sin embargo se puede obtener la masa molecular de estos componentes por medio de métodos como cromatografía de y espectrometría de masas.

Por ultimo para hacer uso de las rectas de Dühring, es prácticamente sencillo, debido a que solo se necesita conocer la concentración a la cual se encuentra el alimento durante el proceso de evaporación y la temperatura de ebullición del agua a la misma presión, se hace una intersección de los dos puntos y de esta manera se conoce la temperatura de ebullición del alimento, se realiza una diferencia de temperaturas y se conoce el aumento en el punto de ebullición, el inconveniente que presenta este método es que sólo existen rectas para soluciones que son poco frecuentes en la industria alimentaria, como son soluciones de sacarosa y de cloruro de sodio.

### **3.7. EQUIPO UTILIZADO EN EL PROCESO DE EVAPORACIÓN.**

Para realizar el proceso de evaporación de productos lácteos se han propuesto los evaporadores de película descendente. Las ventajas de los evaporadores de película descendente son su construcción sencilla, la menor alteración térmica del producto y su mayor eficacia de funcionamiento. El evaporador de película descendente consiste en una serie de tubos a través de los cuales desciende el flujo de leche. Los tubos se encuentran rodeados por una camisa de calentamiento por vapor y se mantienen a vacío. Normalmente los tubos miden entre 4 y 10 m de altura con un diámetro de 25 – 80 mm.



### 3.8. OPERACIÓN DE EVAPORADORES.

En el evaporador de la figura 3.3 los vapores producidos se retiran sin utilizar su contenido en calor denominándose evaporador de simple efecto.

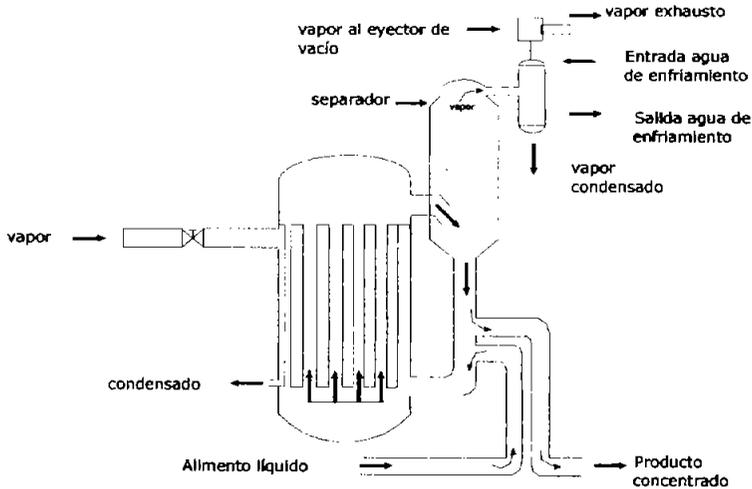


Figura 3.3. Evaporador de simple efecto. Brennan, 1980.

Cuando los vapores se reutilizan como medio de calentamiento en otra cámara de evaporación tal como en la figura 3.4 el sistema de evaporación se denomina evaporador de múltiple efecto. El vapor vivo solo se utiliza en el primer efecto. La utilización del vapor, generado en un efecto como medio calefactor en otros efectos aumenta la eficacia en el uso de la energía consumida. El producto que sale parcialmente concentrado del primer efecto se introduce como alimentación al segundo efecto.

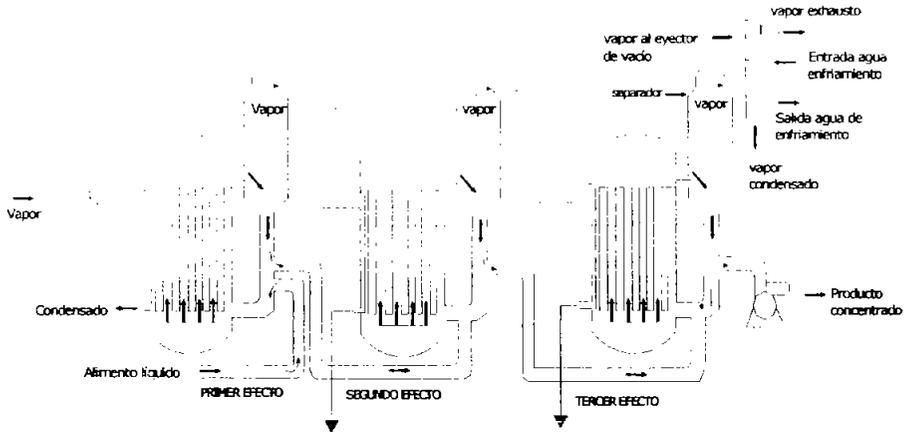


Figura 3.4. Evaporador múltiple efecto. Brennan, 1980

Después de la concentración del producto alcanzada en el segundo efecto, éste se introduce como alimentación al tercer efecto (alimentación corriente directa), obteniéndose la concentración de sólidos deseada. Brennan, 1980

Específicamente se trata de un evaporador de triple efecto, ya que los vapores producidos en el primer, o segundo efecto se utilizan de nuevo como medio de calentamiento en el segundo y tercer efectos, respectivamente.

Esta disposición de flujo se denomina sistema de alimentación en corriente directa, algunas otras disposiciones utilizadas incluyen sistemas de alimentación en contracorriente y en flujo cruzado.

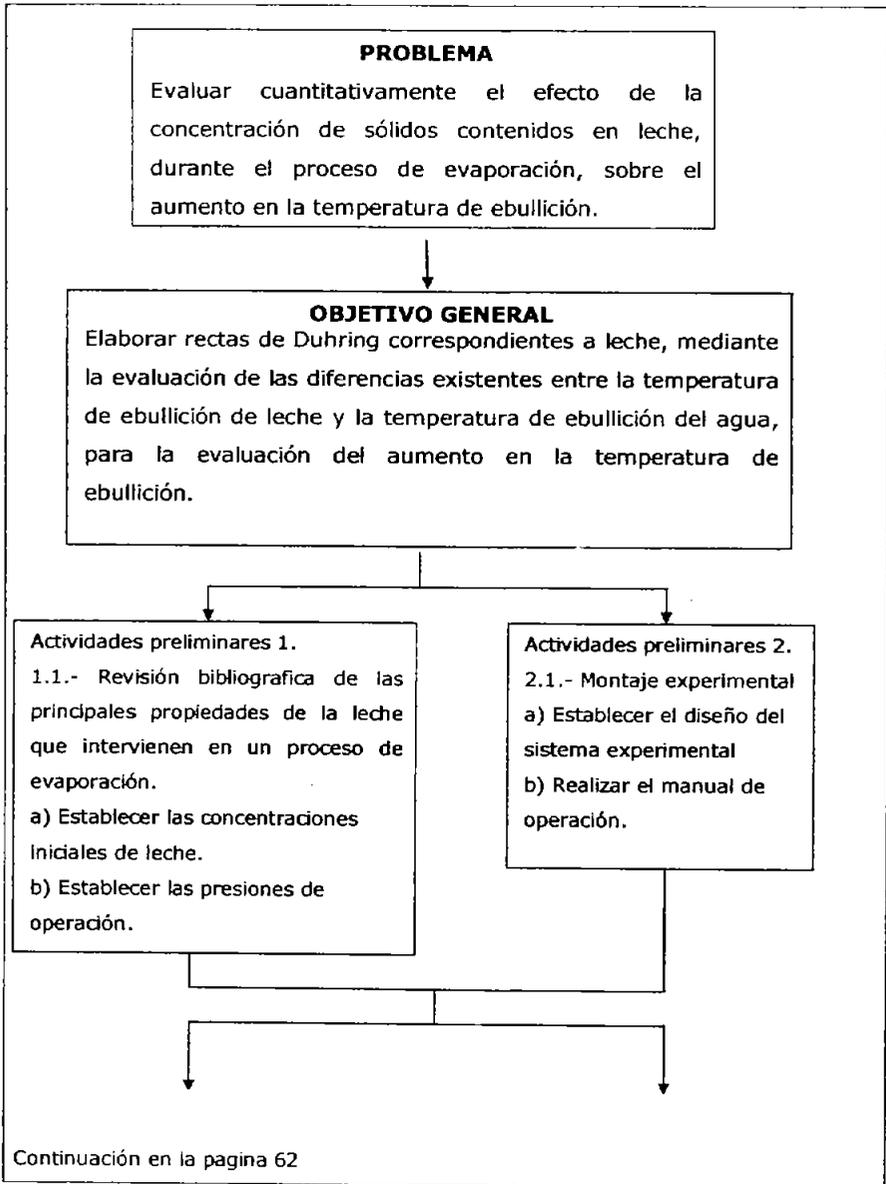
En general en un evaporador de dos o mas efectos, la temperatura de la cámara de calefacción es mayor en el primer efecto que en el segundo; para que el vapor proveniente de la evaporación del primer efecto haga hervir el liquido del segundo efecto la temperatura de ebullición del segundo efecto debe ser menor que la del primero, y así sucesivamente, para ello el segundo efecto ha de trabajar a una presión mas baja.

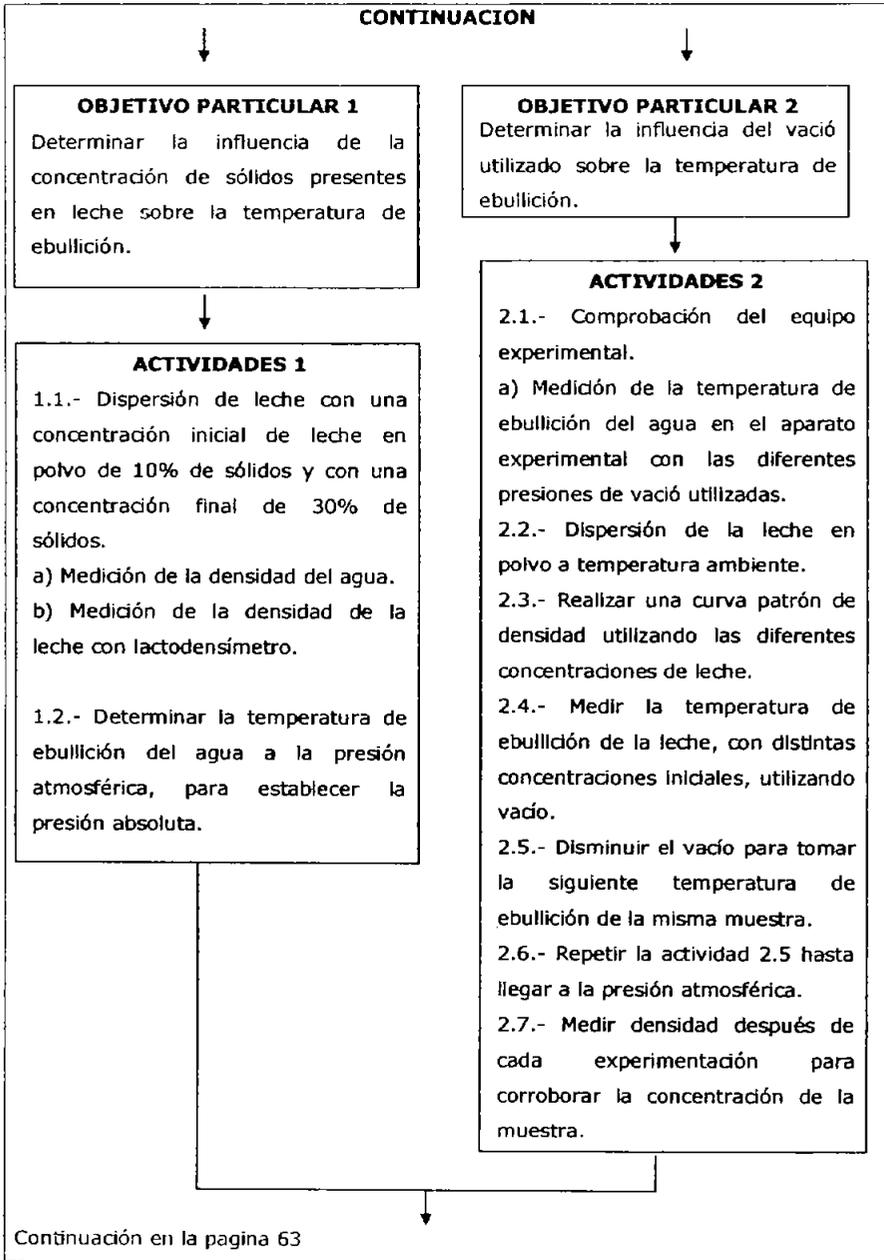
Consecuentemente, la presión en el segundo efecto ha de ser menor que la presión del primero. En estas circunstancias la alimentación de líquido es sencilla si pasa del efecto 1 al 2, y de este al 3, ya que en estas condiciones la alimentación fluirá hacia delante, y significa que el líquido más concentrado se encuentra siempre en el último efecto.

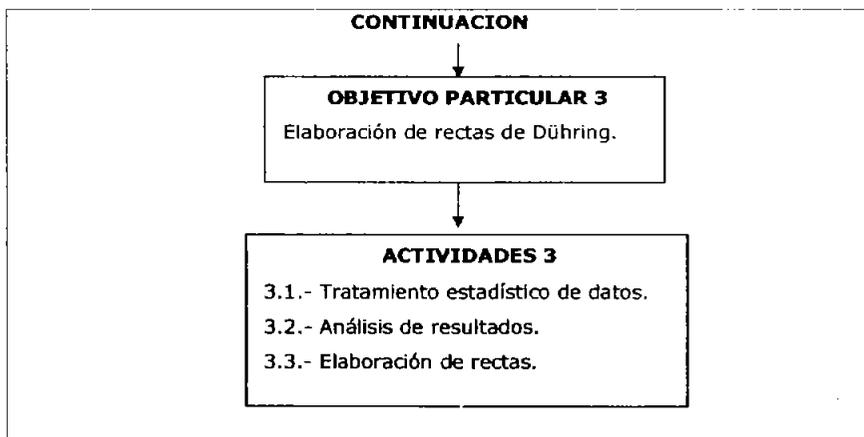
#### **4.1. METODOLOGIA.**

Una vez que se realizó la revisión bibliográfica acerca de los principales procesos de conservación por concentración de leche, se indica de manera especial el proceso de evaporación, el cual involucra distintas variables que deben considerarse durante el proceso, de esta manera se presenta el cuadro metodológico desarrollado para la resolución experimental del problema y objetivos propuestos el cual consiste básicamente en la elaboración de las rectas de Dühring para leche. La organización general parte de la propuesta del problema de estudio, el cual cuenta con un objetivo general, el cual se divide en tres objetivos particulares.

#### 4.1.1. Cuadro metodológico.







## 4.2. DESCRIPCION DEL DISEÑO EXPERIMENTAL

El diseño experimental se centra en la resolución del problema, para lo cual se plantearon los objetivos particulares.

Para poder dar inicio a la experimentación es importante conocer las propiedades de la materia con que se piensa experimentar, que en este caso es la leche en polvo entera, así como su efecto en un proceso de evaporación, esto para poder determinar en que condiciones se va a operar el sistema y cuales son los puntos críticos que deben ser considerados durante la operación. Todo esto conforma lo que son las actividades preliminares que son parte del objetivo general, el cual consiste en la evaluación del aumento en la temperatura de ebullición en leche. Una vez realizada la revisión bibliografica se establece utilizar concentraciones de leche de 10,15,20,25 y 30% de sólidos, con un vacío de hasta 39.996 Kpa, debido a que el sistema de vacío llega hasta este limite.

De acuerdo con lo mencionado anteriormente continuamos con la siguiente etapa experimental que es la solución de los tres objetivos particulares.

El objetivo particular 1 consiste en evaluar la influencia de la concentración de sólidos sobre las propiedades de la leche. Para esto es necesario realizar la medición de densidad de la leche con dos concentraciones iniciales de 10 y 30 % de sólidos, así como su temperatura de ebullición a la presión atmosférica.

El objetivo particular 2 radica en determinar la influencia de los distintos vacíos utilizados durante la experimentación. Para poder llevar a cabo la resolución de este objetivo es necesario verificar que el sistema funcione correctamente y esto se realiza con la experimentación con agua. Una vez que se comprueba que el sistema funciona correctamente se procede a la evaluación de las temperaturas de ebullición de la leche disminuyendo el vacío utilizado y midiendo las temperaturas en cada presión establecida.

Finalmente el objetivo particular 3 que es la elaboración de las rectas de Dühring para leche, consiste en realizar el tratamiento estadístico correspondiente de los datos obtenidos durante la experimentación para poder realizar el gráfico.

#### **4.3. MATERIALES.**

- Leche en polvo entera (Alpura)
- Agua destilada comercial (Aurrera)
- 1 condensador de rosario de vidrio.
- 1 matraz de tres bocas de 500ml.
- 1 vacuometro ( 0 – 76cmHg)
- 1 soporte universal
- 4 termómetros de mercurio (-20 a140°C) con una sensibilidad de 0.5°C.
- 1 parrilla de calentamiento con agitación electromagnética.
- 1 baño de aceite.
- 2 matraz Erlenmeyer de 1000 ml
- sistema de vacío (hasta 39.996 KPa)
- sistema de aire comprimido
- manguera de látex
- densímetro de 1 a 1.2 g/ ml.

#### 4.4. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.

##### 4.4.1. Preparación y caracterización de las distintas concentraciones de leche.

Para la preparación de las distintas concentraciones de leche fue necesario el uso de leche en polvo la cual tiene una composición química promedio de proteínas, carbohidratos, lípidos y minerales que se observan en la tabla 4.1, agua destilada y un agente antiespumante para evitar la concentración de burbujas durante la experimentación y de esta manera reducir el porcentaje de error al tomar temperaturas de ebullición. La preparación de las soluciones se realizó a temperatura ambiente  $T = 293.15 \text{ K}$ , con agitación constante.

Tabla 4.1. Composición química de la leche en polvo (Alpura) por cada 100 gramos de producto.

<b>Componente</b>	<b>Promedio (g)</b>
Carbohidratos	39
Proteínas	26
Lípidos	26
Minerales	6.1

La dispersión de las distintas concentraciones de leche, se llevo a cabo a temperatura ambiente de  $293.15 \text{ K}$ , con una presión atmosférica de  $74.660560 \text{ KPa}$ . La adición de la leche en polvo al agua destilada, se realizó lentamente y con agitación constante provocada por el agitador electromagnético con el que cuenta la parrilla de calentamiento, esto con el fin de evitar la formación de grumos en la solución, que pueden afectar en la medición de la temperatura de ebullición.

Es importante tener en cuenta que para la preparación de las distintas concentraciones de leche 10, 15, 20, 25 y 30 % de sólidos, es necesario disminuir la cantidad de agua utilizada en la solución el porcentaje de agua que contiene la leche en polvo, para obtener una relación masa - volumen o peso - peso y de esta forma se sabe que la solución preparada tiene una concentración inicial del porcentaje de sólidos requeridos.

Para determinar las propiedades que son de relevancia en este trabajo, se llevo a cabo la medición de densidad de leche antes y después de cada experimento. Cada determinación se realizo por triplicado. La medición de densidad es una medida indirecta de evaluar la concentración de sólidos en leche. Se determino por medio de la utilización de un densímetro con un intervalo de 1 a 1.2 g/ml.

#### **4.4.2. Determinación de la temperatura de ebullición.**

Para llevar a cabo la experimentación se utilizó el sistema mostrado en la figura 4.1. El cual cuenta con los siguientes materiales.

- Una trampa de humedad, esto con el fin de confirmar que no existiera una pérdida de agua en la solución.
- Una trampa de vacío para evitar que existan fluctuaciones en el sistema y que el vacío manejado durante la experimentación no se vea afectado.
- Un baño de aceite, el cual permite mantener la temperatura de calentamiento constante durante la experimentación.
- Un vacuómetro, el cual indica el vacío al que opera el sistema.
- Un sistema de vacío para trabajar bajo presión reducida.
- Un matraz de tres bocas donde se encuentra la leche, con un termómetro en el centro del líquido para evaluar la temperatura de ebullición.
- Tres termómetros alrededor del matraz para verificar que la temperatura alrededor de este fuera constante, y que la temperatura de ebullición del líquido no se vea afectada por la temperatura promedio que existe alrededor del matraz.
- Un condensador de vidrio, el cual lleva un flujo de agua fría constante para evitar que existan pérdidas de humedad cuando el líquido empieza a hervir, evitando de esta manera la concentración de la leche y tomar temperaturas de ebullición incorrectas.
- Finalmente consta con una parrilla de calentamiento con agitación electromagnética para que la temperatura del líquido que se encuentra dentro del matraz sea la misma en todos los puntos del líquido.

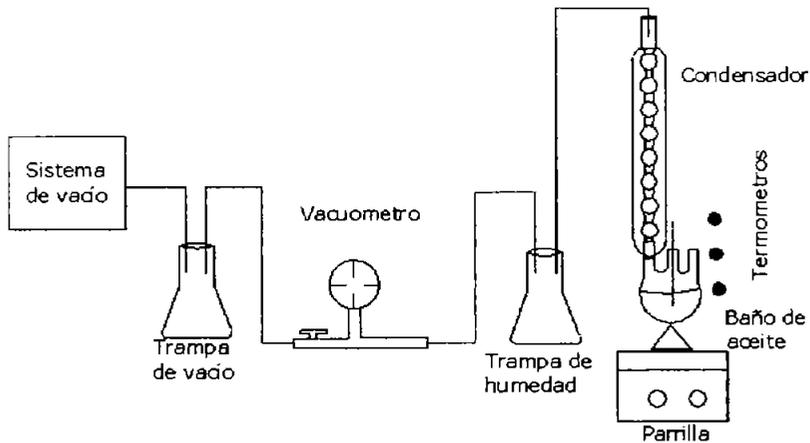


Figura 4.1. Esquema del sistema experimental.

Con la utilización de este arreglo se pudo controlar adecuadamente las variables involucradas en la temperatura de ebullición entre las que se encuentran: concentración de sólidos presentes, presión de ebullición (Pa), y la temperatura de ebullición de la leche (K), y por lo tanto obtener los datos experimentales correctamente.

- **Concentración de sólidos presentes.** Antes de que la leche alcance su temperatura de ebullición, alrededor de los 343.15 K el agua que contiene la leche empieza a evaporarse, para evitar dicha acción fue necesaria la utilización de un condensador de vidrio, el cual condensa el agua evaporada y en conjunto con la gravedad permite el regreso de esta a el matraz, de esta manera se evita un cambio en la concentración de la muestra. Para verificar que la concentración de sólidos no cambiara fue necesario realizar una medición de densidad antes y después de cada experimentación.
- **Presión.** Es una de las variables que se mantuvo constante durante la experimentación, manteniendo presiones de vacío de 0 – 30 cm Hg. (37.996 – 77.993 KPa), manejando un intervalo de 2 cm Hg ( 2.666 KPa), regulando el paso del aire a través del manómetro de vacío.
- **Temperatura de ebullición.** Una vez fijada la presión de vacío mas alta que alcanza el sistema en este caso es de 30cm Hg. (37.996 KPa), se midió la temperatura de ebullición colocando un termómetro en el seno de la leche corroborando que fuera constante durante determinado tiempo (un minuto), además de que se colocaron tres termómetros alrededor del matraz para verificar que la temperatura del termómetro no se viera afectada por la temperatura que existe alrededor del matraz.

## 4.4.2.1 Procedimiento.

- 1.- Se coloca una muestra de 250 ml de leche con una concentración inicial del 10 % de sólidos.
- 2.- Cerrar el sistema.
- 3.- Se acciona el flujo de agua fría por el condensador.
- 4.- Se acciona el sistema de vacío con una presión inicial de 30 cmHg (39.996KPa)
- 5.- Se empieza el calentamiento por medio de un baño de aceite.
- 6.- Se registra la temperatura de ebullición a la presión de 39.996 KPa.
- 7.- Se registran las temperaturas de los termómetros que se encuentran alrededor del matraz para verificar que no existan cambios significativos entre los tres termómetros.
- 8.- Se disminuye la presión en un intervalo de 2.666 KPa.
- 9.- Se vuelve a tomar la temperatura de ebullición a la nueva presión a la que se encuentra el líquido.
- 10.- Se repiten los pasos 8 y 9 hasta llegar a la presión atmosférica.
- 11.- Se retira el calentamiento
- 12.- Se limpia el sistema y se seca el condensador por medio de aire comprimido.
- 13.- Se repite nuevamente el procedimiento, y se utiliza una nueva muestra de leche con la siguiente concentración

Se verificó que el aparato experimental funcionara adecuadamente, esto se realizó con la medición de las temperaturas de ebullición de agua destilada y comparándolas con las temperaturas de ebullición de agua que se indican en las tablas de vapor. Cada medición de temperaturas se realizó por triplicado para descartar cualquier error en la mediación de la temperatura de ebullición.

## 5.1 ANALISIS DE LA MEDICION DE DENSIDAD.

### 5.1.1 Caracterización de la muestra.

La medición de la densidad de leche se realizó por triplicado, considerando un análisis estadístico que involucra el promedio, la desviación estándar y el coeficiente de variación que en este caso no sobrepasó el 10%, por lo tanto los valores mostrados son estadísticamente confiables. Los resultados que se obtuvieron de la medición de densidad de leche al inicio y al final del experimento son los siguientes:

Tabla 5.1. Caracterización de leche.

Concentración de sólidos (%)	$\rho$ inicial (Kg/m <sup>3</sup> )	$\rho$ final (Kg/m <sup>3</sup> )
10	1027.3	1027.4
15	1040.1	1040.2
20	1052.7	1053.6
25	1067.3	1067.6
30	1080.0	1082.0

La Figura 5.1.muestra que no existen cambios significativos en los valores que se obtuvieron de densidad antes y después de la experimentación, con esto se puede comprobar de que no existe un cambio significativo en la concentración de sólidos presentes en la muestra que se sometió a la experimentación. Además de que no fue necesario la preparación de varias muestras de leche a una misma concentración para medir cada temperatura de ebullición.

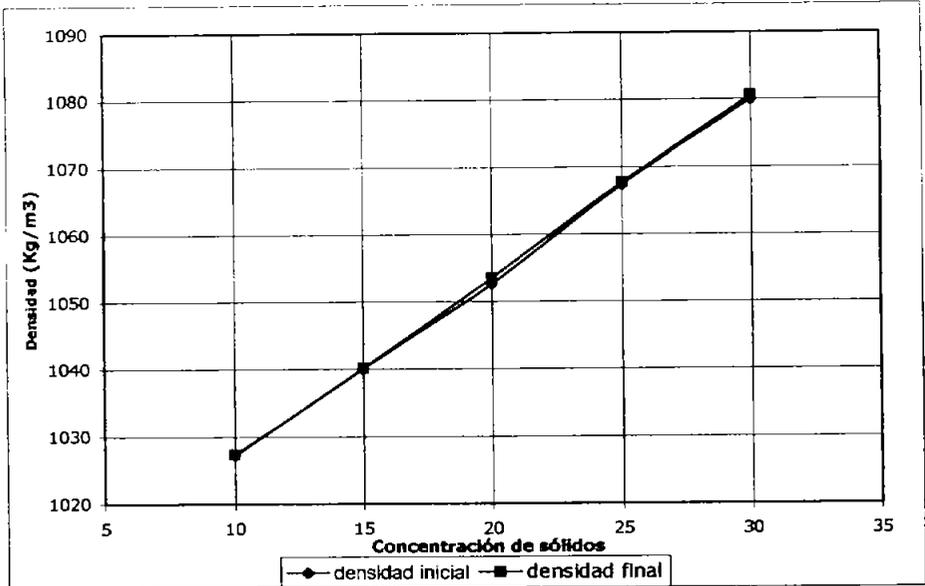


Figura 5.1. Medición de densidad de leche con concentraciones de 10,15, 20, 25 y 30 % de sólidos.

Los datos obtenidos durante la experimentación de densidad se muestran a continuación.

Tabla 5.2. Medición de densidad de leche con 10% de sólidos.

Medición	Entrada (Kg/m <sup>3</sup> )	Salida (Kg/m <sup>3</sup> )
1	1027.1	1027.3
2	1027.5	1027.6
3	1027.3	1027.3
X	1027.3	1027.3
SD	2 <sup>-04</sup>	1.732 <sup>-04</sup>
CV	0.0194	0.168

Tabla 5.3. Medición de densidad de leche con 15% de sólidos.

Medición	Entrada (Kg/m <sup>3</sup> )	Salida (Kg/m <sup>3</sup> )
1	1040.0	1040.5
2	1040.2	1040.0
3	1040.2	1040.2
X	1040.1	1040.2
SD	1.1547 <sup>-04</sup>	2.51 <sup>-04</sup>
CV	0.0111	0.0241

Tabla 5.4. Medición de densidad de leche con 20% de sólidos.

Medición	Entrada (Kg/m <sup>3</sup> )	Salida (Kg/m <sup>3</sup> )
1	1052.3	1053.0
2	1053.0	1054.0
3	1053.0	1054.0
X	1052.7	1053.6
SD	4.0412 <sup>-04</sup>	5.773 <sup>-04</sup>
CV	0.0388	0.05476

Tabla 5.5. Medición de densidad de leche con 25% de sólidos.

Medición	Entrada (Kg/m <sup>3</sup> )	Salida (Kg/m <sup>3</sup> )
1	1067.3	1068.0
2	1067.3	1067.0
3	1067.3	1068.0
X	1067.3	1067.6
SD	----	5.773 <sup>-04</sup>
CV	----	0.054

Tabla 5.6. Medición de densidad de leche con 30% de sólidos.

Medición	Entrada (Kg/m <sup>3</sup> )	Salida (Kg/m <sup>3</sup> )
1	1080	1082
2	1080	1081
3	1080	1083
X	1080	1082
SD	----	1 <sup>-03</sup>
CV	----	0.0924

De igual manera los datos obtenidos de la medición de densidad se sometieron a una regresión lineal. Obteniendo los siguientes resultados.

Tabla 5.7. Parámetros estadísticos de la medición de densidad.

Densidad (g/ml)	b	m	r	r <sup>2</sup>
$\rho$ inicial	1000.44	2.652	0.99970	0.99940
$\rho$ final	999.52	2.732	0.99972	0.99944

El coeficiente de Pearson ( $r$ ) se debe interpretar sólo como una medida matemática de la magnitud de la relación lineal entre dos variables, es decir, un valor alto de ( $r = 1$ ) significa que las dos variables tienden de manera simultánea a variar en la misma dirección, es decir si aumentamos la concentración, la densidad tiende a aumentar.

Con los valores obtenidos del coeficiente de Pearson ( $r$ ) y el valor de la pendiente ( $m$ ) se demuestra que existe una dependencia lineal entre las dos variables involucradas que interactúan entre sí, esto indica que existe una tendencia en el aumento de la concentración de sólidos.

## 5.2. ANALISIS DEL SISTEMA EXPERIMENTAL.

### 5.2.1. Caracterización de aparato experimental.

Para comprobar que los datos obtenidos de temperatura de ebullición fueran los correctos, en cada presión operada fue necesario demostrar el funcionamiento del aparato experimental con un líquido ideal (agua destilada, debido a que sus propiedades termodinámicas de presión y temperatura de esta se especifican en las tablas de vapor) y de esta manera comparar los datos experimentales con los datos teóricos obtenidos por medio de las tablas de vapor.

Tabla 5.8. Obtención de temperaturas de ebullición del agua.

Presión absoluta (KPa)	Temperatura de ebullición de agua (K) Experimental	Temperatura de ebullición de agua (K) Teórico	$\Delta T$ (K)
37.996	347.813	350.616	-2.803
40.663	349.465	351.65	-2.185
43.329	350.961	352.65	-1.689
45.996	352.398	353.683	-1.285
48.662	353.778	354.583	-0.805
51.329	355.117	355.15	-0.033
53.995	356.456	356.4	0.056
56.618	357.648	357.616	0.032
61.994	359.979	359.95	0.029
64.661	361.073	360.95	0.123
67.327	362.096	362.016	0.08
69.993	363.12	363.05	0.07
72.660	364.094	364.05	0.048
75.327	365.043	365.05	-0.006
77.993	365.983	365.983	-0.003

En la figura 5.2 de temperatura de ebullición de agua destilada, podemos observar que en el primer intervalo de presión absoluta (37.231 – 51.021 KPa) existe una diferencia de temperaturas entre la temperatura teórica que se obtuvo por medio de las tablas de vapor y la temperatura experimental, esto se debe probablemente a un error de medición de presiones a los mayores vacíos evaluados. Es necesario mencionar que el vacuómetro que se utilizó para la experimentación es un vacuómetro comercial tipo Bourdon, que no estaba validado, y por lo tanto presenta esta desviación en la medición de la temperatura de ebullición del agua, cuando se tiene el mayor vacío, en comparación con las temperaturas de ebullición que se obtendrían con un vacuómetro inundado, el cual es un instrumento de mayor precisión.

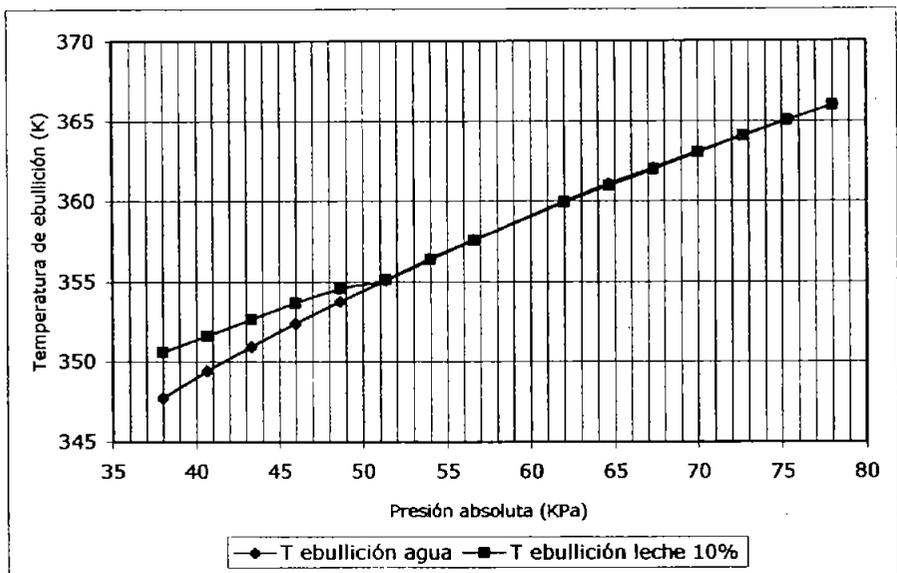


Figura 5.2. Comprobación del sistema experimental.

Debido a esta desigualdad de temperaturas fue necesario realizar una diferencia de temperaturas ( $T$  de ebullición teórica -  $T$  de ebullición experimental), de esta manera obtener un  $\Delta T$  para cada presión absoluta. El  $\Delta T$  que se obtuvo en la caracterización del agua, se utiliza para realizar una corrección en las temperaturas de ebullición de la leche, aditivamente dicha temperatura a la temperatura de ebullición de la leche. De esta manera se evita la elaboración de rectas de Dühring con temperaturas de ebullición erróneas.

De igual manera se observa que después de un periodo existe una aproximación bastante cercana entre las dos temperaturas de ebullición. Hasta llegar a obtener un  $\Delta T$  de 0.048 K para la presión absoluta de 75.327 KPa.

### 5.3. ANÁLISIS DE LAS TEMPERATURAS DE EBULLICIÓN DE LECHE.

#### 5.3.1 Obtención de temperaturas de ebullición.

Para la obtención de las temperaturas de ebullición se realizó una medición directa y después se realizó una diferencia de temperaturas que se obtuvo anteriormente al comparar las temperaturas de ebullición del agua.

Como se observa en la figura 5.3, para la concentración de leche al 10 % de sólidos, existe un aumento en la temperatura de ebullición de la leche en comparación con la temperatura de ebullición del agua.

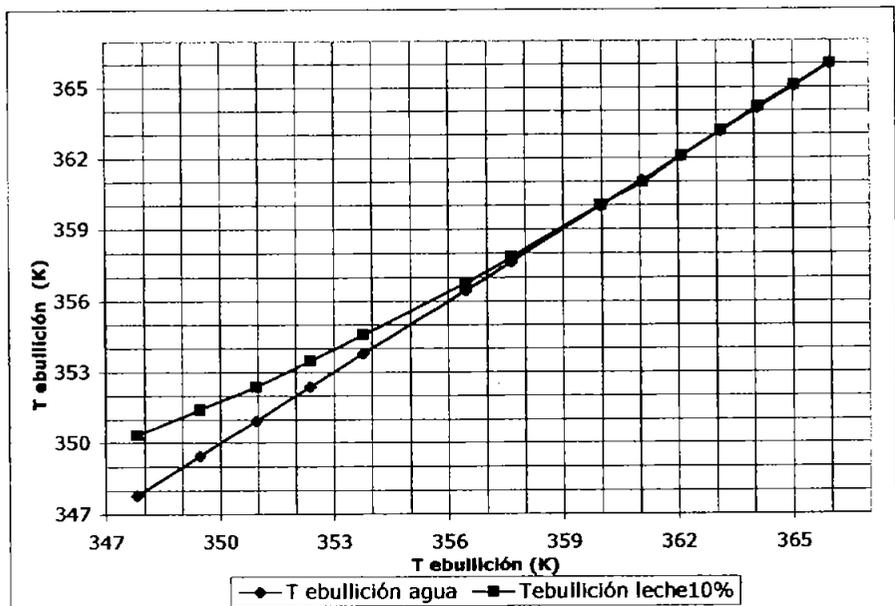


Figura 5.3. Evaluación del aumento en la temperatura de ebullición de leche con 10% de sólidos.

Esta diferencia de temperaturas en el intervalo temperaturas de 347.15 – 357.15 K, se hace muy evidente obteniendo un  $\Delta T_{\text{maximo}}$  de 2.534 K, en la presión absoluta de 37.989 KPa, pero conforme se va disminuyendo la presión de vacío la diferencia de temperaturas de hace menos visible hasta obtener un  $\Delta T_{\text{maximo}}$  de 0.033 K en la presión de 77.993 KPa (presión atmosférica).

Para las distintas concentraciones iniciales 15, 20, 25 y 30 % de sólidos se obtienen resultados muy semejantes en comparación con los que se obtuvieron con la concentración del 10% de sólidos.

### **5.3.2. Análisis de varianza para las cinco concentraciones de leche.**

Cada medición de temperatura de ebullición se realizó por triplicado, tomando en cuenta el promedio, la desviación estándar y el coeficiente de variación que en este caso no fue superior del 10%. Para verificar que no existiera una diferencia significativa en las medias de los datos se propuso realizar varias pruebas estadísticas a los datos las cuales son: el ANOVA y Prueba de Duncan.

Tabla 5.9. Obtención de temperaturas de ebullición de leche con distintas concentraciones.

Temperatura de ebullición de leche					
Presión absoluta (KPa)	Temperatura de ebullición 10% de sólidos	Temperatura de ebullición 15% de sólidos	Temperatura de ebullición 20% de sólidos	Temperatura de ebullición 25% de sólidos	Temperatura de ebullición 30% de sólidos
37.997	350.347	350.58	3650.813	351.013	351.147
40.663	351.431	351.731	352.031	352.331	352.631
43.364	352.394	352.627	352.861	353.094	353.294
45.996	353.465	353.665	353.931	354.065	354.265
48.662	354.578	354.778	354.978	355.178	355.345
51.329	355.917	356.117	356.317	356.517	356.717
53.995	356.775	357.075	357.375	357.675	357.875
56.662	357.848	358.015	358.182	358.248	358.415
59.328	359.196	359.363	359.629	359.829	360.029
61.994	360.012	360.179	360.379	360.579	360.779
64.661	360.973	361.273	361.506	361.739	361.939
67.327	362.096	362.296	362.495	362.696	362.896
69.993	363.153	363.42	363.486	363.886	364.096
72.660	364.198	364.464	364.664	364.864	364.998
75.327	365.083	365.316	365.55	365.816	365.95
77.993	366.016	366.216	366.35	366.55	366.75
	$\Sigma=5733.482$ $Y=358.3446$	$\Sigma=5737.115$ $Y=358.5696$	$\Sigma=5740.547$ $Y=358.7841$	$\Sigma=5744.08$ $Y=359.005$	$\Sigma=5747.116$ $Y=359.194$

El factor de corrección basado en la suma de todas las observaciones es ecuación 5.1:

5.1

$$\Sigma 5733.482 + \Sigma 5737.115 + \Sigma 5740.547 + \Sigma 5744.08 + \Sigma 5747.116 \\ = 28702.34$$

Calculando el Fc:

5.2

$$F_c = \frac{(28702.34)^2}{80} = 10297804.02$$

La suma de cuadrados de todas las observaciones es:

5.3

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^j Y_{ij}^2 = 10300131.48$$

Por lo tanto:

5.4

$$SCT = 10300131.48 - 10297804.02 = 2327.455$$

Utilizando los cuadrados de las sumas de los datos pertenecientes a cada columna obtenemos:

5.5

$$SCB = 26.7044$$

$$\frac{(5733.482)^2}{16} + \frac{(5737.115)^2}{16} + \frac{(5740.547)^2}{16} + \frac{(5747.116)^2}{16} + \frac{(5744.08)^2}{16} - 10297804.02 =$$

$$= 26.7044$$

$$\text{Finalmente } SCW = 2327.455 - 26.7044 = 2300.7506$$

Formando la tabla de ANOVA para las distintas concentraciones de leche

Tabla 5.10. Tabla de ANOVA

<b>Fuente de variación</b>	<b>S.C</b>	<b>gl</b>	<b>CM</b>
Debida a los Tratamientos	SCB = 26.7044	4	6.6762
Debida al error	SCW = 2300.7506	75	30.6766
	SCT= 2327.455	79	

Utilizando la razón de F, CMB/CMW obtenemos:

5.6

$$F_c = \frac{6.6762}{30.6766} = 0.2176$$

Puesto que el valor crítico correspondiente para  $\alpha = 0.01$  es  $F_{(4,75)} = 3.608$  y como  $F = 0.2176 < F_{0.01(4,75)} = 3.608$ . Se acepta la hipótesis nula  $H_0$  que indica que las medias de los tratamientos son iguales.

$$H_0 = H_1 = H_2 = H_3 = H_4 = H_5$$

Debido a que en las tablas los valores son mayores que uno. Resultado de ello es que no se necesita encontrar el valor crítico del estadístico F, cuando el valor estadístico de prueba F, sea menor que uno. Esto es, no existe la posibilidad de rechazar la hipótesis  $H_0$  cuando  $F < 1$ .

La prueba estadística de ANOVA indica que no existe una diferencia significativa en las medias de las muestras debido a que el valor de  $F_c$  que se obtuvo con los datos fue de 0.2176 y puesto que el valor crítico correspondiente a  $\alpha (0.01)$  para  $F_{c(4,75)} = 3.608$ . Se nota que el valor calculado es mucho menor que el de las tablas y que ni siquiera es mayor que 1, el resultado de esto es que no se necesita encontrar el valor crítico de estadístico F, cuando el valor del estadístico de prueba F sea menor que uno. Esto es no existe la posibilidad de rechazar la hipótesis nula  $H_0$  cuando  $F < 1$ . Hamett, 1981; Mendenhall, 1997; Weimer, 1999

Con esto podemos demostrar que las medias de las cinco corridas experimentales no son significativamente diferentes, por lo tanto los valores de temperatura de ebullición de leche, son estadísticamente confiables y que cada temperatura de ebullición para cada concentración de sólidos utilizada durante la experimentación tiene la misma tendencia de aumentar conforme se disminuye el vacío.

Para corroborar lo anterior la serie de datos se sometió a la prueba de Duncan (comparaciones múltiples), la cual indica si la diferencia entre las medias de datos es estadísticamente significativa.

### 5.3.3. Método de Duncan (Comparaciones Múltiples).

El método de Duncan sirve para indicar si una media dada (o grupo de medias) difieren de forma significativa de otra media considerada (o grupo de medias).

Las suposiciones básicas de las pruebas del rango múltiple Duncan son, en esencia, las del análisis de variancia en una dimensión para tamaños muestrales iguales. La prueba compara el rango de cualquier conjunto de  $p$  medias con un apropiado rango de mínima significancia  $R_p$ , dado por :

Rango de mínima significancia:

5.7

$$R_p = S_x \cdot r_p$$

Aquí  $S_x$  es una estimación  $S_x = \Gamma / \sqrt{n}$ , y puede calcularse mediante la formula. Error estándar de la media.

5.8

$$S_x = \sqrt{\frac{MSE}{N}}$$

Donde  $MSE$  es la media de los cuadrados del error en el análisis de variancia.

El valor de  $r_p$  depende del nivel deseado de significancia y del número de grados de libertad correspondientes a la  $MSE$ , que se obtienen de las tablas 12 a y b para  $\alpha = 0.05$  y  $0.01$ , para  $p = 2, 3, \dots, 10$ , y para varios grados de libertad entre 1 y 120. <sup>(Miller 1992)</sup>

### 5.3.3.1. Procedimiento:

1.- En primer término se ordenan en un orden creciente de magnitud las cinco medias muestrales.

Tabla 5.11. Medias muestrales en orden creciente.

<b>Leche % de sólidos</b>	10	15	20	25	30
<b>Medias</b>	Y= 358.3446	Y= 358.5696	Y= 358.7841	Y= 359.005	Y= 359.194

A continuación se calcula  $S_x$  usando el error del cuadrado medio 30.6764 que se obtuvo del análisis de varianza, utilizando la ecuación 5.11.

5.9

$$S_x = \sqrt{\frac{30.6764}{16}} = 1.3846$$

Entonces se obtiene de la tabla 12 a los siguientes valores de  $r_p$  para  $\alpha = 0.05$  y 80 grados de libertad.

Tabla 5.12. Valores de  $r_p$  para las cinco medias muestrales.

<b>P</b>	2	3	4	5	6
<b><math>r_p</math></b>	2.82	2.97	3.06	3.13	3.19

Multiplicando cada valor  $r_p$  por  $S_x = 1.2536$  da los siguientes resultados:

Tabla 5.13 Valores de  $r_p$  multiplicados por  $S_x$ .

<b>P</b>	2	3	4	5	6
<b><math>r_p</math></b>	3.9045	4.112	4.2368	4.3337	4.4168

El rango de las cinco medias es  $359.194 - 358.3446 = 0.8494$ , dado que el valor no sobrepasa el valor dado por  $S_x = 1.3846$  se considera que las diferencias correspondientes no son significativas. <sup>Miller, 1992</sup>

Con los parámetros estadísticos que se obtuvieron de los dos métodos mencionados anteriormente, se confirma que la diferencia entre las cinco medias de datos no es estadísticamente significativa.

### 5.3.4 Análisis de regresión lineal.

Otra de las pruebas que se realizó a las series de datos fue la regresión lineal para verificar que tan fuerte era la relación entre las dos variables involucradas obteniendo los siguientes resultados en forma de ecuación

5.10

$$y = mx + b$$

Ecuación para leche con 10% de sólidos.

5.11

$$y = 0.8763 X + 44.8539$$

Ecuación para leche con 15% de sólidos.

5.12

$$y = 0.8759 X + 45.2055$$

Ecuación para leche con 20% de sólidos.

5.13

$$y = 0.8703 X + 47.2403$$

Ecuación para leche con 25% de sólidos.

5.14

$$y = 0.8721 X + 47.4209$$

Ecuación para leche con 30% de sólidos.

5.15

$$y = 0.8703 X + 47.8509$$

Donde  $y$  es igual a la temperatura de ebullición de la leche, y  $X$  es la temperatura de ebullición del agua pura. La finalidad de obtener estas ecuaciones es para poder evaluar la temperatura de ebullición de leche con una concentración específica de sólidos, y conociendo la temperatura de ebullición del agua pura a la misma presión. Las ecuaciones están validadas en un intervalo de presión de 37.997 a 77.993 KPa. Para las concentraciones de leche de 10, 15, 20, 25 y 30 % de sólidos.

Tabla 5.14. Parámetros estadísticos obtenidos mediante regresión lineal.

Parámetros	L.10% de sólidos	L. 15% de sólidos	L. 20% de sólidos	L.25% de sólidos	L. 30% de sólidos
<b>r</b>	0.9977	0.9976	0.9975	0.9971	0.9971
<b>r<sup>2</sup></b>	0.9955	0.9952	0.9951	0.9943	0.9942
<b>m</b>	0.8763	0.8759	0.8703	0.8721	0.8703
<b>b</b>	44.8539	45.2055	47.2403	47.4209	47.8509

Con esto se demuestra que existe una fuerte dependencia lineal entre las variables que se involucran en el proceso en este caso la presión absoluta y la temperatura de ebullición de las muestras, se comprueba que si se aumenta la presión existe una fuerte tendencia de aumento en la temperatura de ebullición para cada concentración de leche. De igual manera se observa que el valor de la pendiente ( $m$ ) para cada concentración de sólidos es muy parecida en todos los casos, esto nos indica que existe la misma relación de aumento de temperatura a una presión establecida o que el aumento de  $T$  se mantiene constante.

Considerando que los valores del coeficiente de pearson ( $r$ ) son muy cercanos a 1 se pueden considerar los valores de la grafica para hacer una aproximación de la temperatura de ebullición de leche a una temperatura mas baja de ebullición, conociendo la temperatura de ebullición del agua a la misma presión.

#### **5.4. ELABORACIÓN DE RECTAS DE DÜHRING PARA LECHE.**

Para la elaboración de las rectas de Dühring, se tomaron en cuenta las temperaturas de ebullición de las distintas concentraciones obteniendo la siguiente grafica. Como se observa no existe una diferencia muy significativa entre las cinco rectas de las distintas concentraciones de acuerdo a su tendencia lineal del grafico. El grafico de temperaturas de ebullición se encuentra en K, para la evaluación del aumento en la temperatura de ebullición de leche.

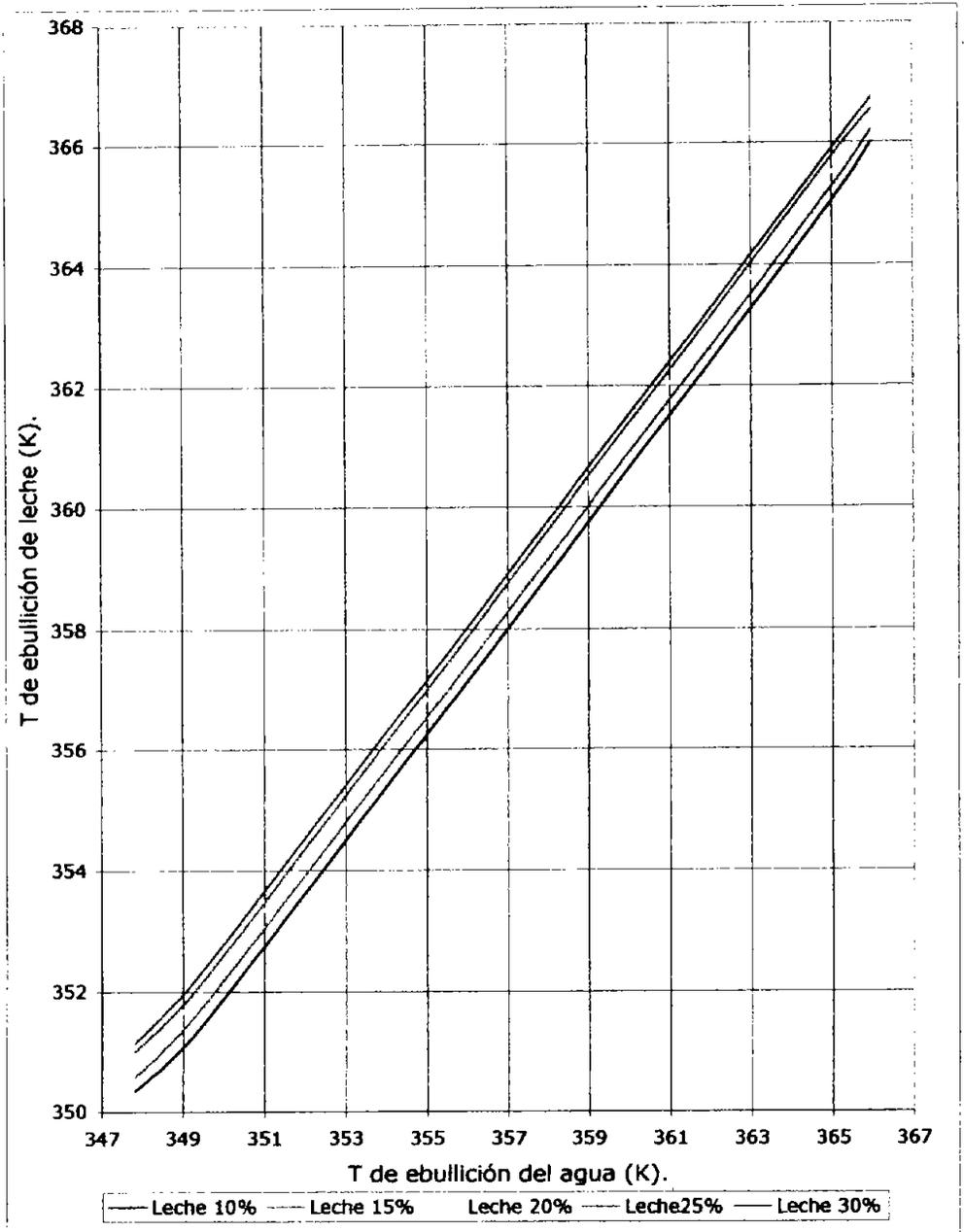


Figura 5.4. Grafico de Dühring para leche en K.

En la Figura 5.4 se observa que la temperatura de ebullición de la leche depende de la concentración de sólidos presentes en solución.

En el caso de la recta que es la indicada por la concentración de leche al 10% de sólidos, observamos que aunque en el intervalo de temperatura de 347.15 - 361.15 (74 - 88 °C), el aumento en la temperatura de ebullición se muestra más significativo, obteniendo un  $\Delta T_{\text{máx}}$  de 2 K cuando el agua ebulle a 349.15 K (76 °C) la leche ebulle a 351.15 K (78 °C), también podemos observar como este  $\Delta$  de temperaturas disminuye conforme se aumenta la presión absoluta, obteniendo de esta manera un  $\Delta T$  bastante pequeño, observando que la temperatura de ebullición de la leche es muy parecida a la temperatura de ebullición del agua pura, de esta manera al ver el gráfico observamos que cuando la leche con 10% de sólidos ebulle a 363.25 K (90.1 °C) el agua ebulle a 363.15 (90°C).

Analizando las siguientes rectas de temperatura de ebullición de la leche, podemos decir que de igual manera existe un aumento en la temperatura de ebullición de la leche en el primer intervalo de temperaturas de 347.15 a 361.15 K (74 a 88 °C), y a medida que aumenta la presión del sistema el  $\Delta T$  disminuye de igual forma que en la concentración del 10% de sólidos, sólo que en este caso como existe un aumento en la concentración de sólidos, se alcanza a percibir aunque pequeño un  $\Delta T = 0.2$  K en la recta que contiene 15% de sólidos, mas que la temperatura de ebullición del agua a 363.15 (90°C), este aumento de temperatura de 0.2 K se hace constante en las siguientes concentraciones de leche 20, 25 y 30% de sólidos hasta llegar a una temperatura de ebullición de 363.95 (90.8 °C) en la leche con una concentración de sólidos de 30%.

Esto como se había mencionado anteriormente, no influye en gran medida el obtener temperaturas de ebullición bastante cercanas a la temperatura de ebullición del agua en un intervalo de temperaturas de 363.15 366.15 K (90 a 93 °C), debido a que generalmente en la industria láctea se utilizan presiones de operación reducidas, esto se realiza con el fin de evitar cualquier daño que pudiera presentarse durante el proceso de evaporación, por efecto del calentamiento si se llegasen a utilizar altas presiones de operación o cercanas a la presión atmosférica.

## **5.5. EVALUACIÓN DE LA TEMPERATURA DE EBULLICIÓN POR MEDIO DE LA LEYES DE DALTON Y DE RAOULT.**

Como se ha mencionado anteriormente, existen tres métodos para evaluar el aumento en la temperatura de ebullición. Dentro de los cuales se encuentra el método para la evaluación de la temperatura de ebullición por medio de relaciones termodinámicas, las cuales incluyen la leyes de Dalton y de Raoult.

Considerando que es un método frecuentemente utilizado para evaluar el aumento en la temperatura de ebullición de un líquido, se pretende evaluar de igual forma el APE por medio de estas relaciones termodinámicas y realizar una comparación de los datos que se obtuvieron experimentalmente los cuales se utilizaron para realizar las rectas de Dühring correspondientes a leche, con los datos que se obtienen con las relaciones termodinámicas, y de esta manera comprobar que la evaluación por medio de un análisis termodinámico sólo es aplicable en ciertos intervalos de presión.

Para poder realizar el cálculo termodinámico, empezamos por calcular la masa molecular de la leche, por medio una de las propiedades coligativas, la cual es el aumento en la temperatura de ebullición.

Para la evaluación del peso molecular de la leche tenemos los siguientes datos. De acuerdo a la tabla 1.1, el porcentaje promedio de sólidos es de 13.4 % y 86.6 % de agua, la temperatura de ebullición promedio a 1 atmósfera es de 373.31 K (100.16 °C).

El agua ebulle a 1 atmósfera a 373.15 K (100°C), considerando que el aumento en la temperatura de ebullición es de 0.16 K, se calcula la masa molar del soluto.

5.19

$$\text{Molaridad} = \frac{\Delta T}{K_{pe}} = \frac{0.16 \text{ K}}{0.512 \text{ K/m}} = 0.3125$$

Donde:

$\Delta T$  = es la diferencia de temperaturas entre los dos medios en este caso agua y leche, sus unidades están en K.

$K_{pe}$  = es una constante de elevación del punto de ebullición y depende de las propiedades del disolvente, sus unidades están en K/m.

De acuerdo a la ecuación 5.19 la solución contiene = 0.3125 moles de soluto por kilogramo de disolvente. La leche contiene 13.4 g de soluto y 86.6 g de disolvente ( considerando que 1ml ~ 1 g). El número de gramos de soluto en un kilogramo de disolvente es entonces:

5.20

$$\frac{\text{Gramos de soluto}}{\text{Kg de } H_2O} = \frac{13.4 \text{ g de soluto}}{86.6 \text{ g de } H_2O} \left( \frac{1000 \text{ g } H_2O}{1 \text{ Kg } H_2O} \right) = 154.7344$$

Vemos que un kilogramo de disolvente contiene 154.7344 g de soluto lo que, por la medición de  $\Delta T_{pe}$ , equivale a 0.3125 moles.

Por tanto para calcular la masa molecular:

5.21

$$\text{Masa molar} = \frac{154.7344 \text{ g de soluto}}{0.3125 \text{ moles}} = 495.1500 \text{ g/mol}$$

Una vez que obtuvimos la masa molecular de la leche, procedemos a calcular la fracción de A ( $X_A$ ), la cual se calcula de la siguiente manera:

5.22

$$X_A = \frac{\frac{C_A}{PM_A}}{\frac{C_A}{PM_A} + \frac{C_B}{PM_B}}$$

Donde:

$C_B$  = concentración final de la solución

$C_A$  = concentración final del agua

$PM_B$  = peso molecular de la solución

$PM_A$  = peso molecular del agua

Considerando la relaciones termodinámicas tenemos la siguiente expresión que se conoce como la ley de Dalton.

5.23

$$P = P_A + P_B$$

Considerando un soluto no volátil y no electrolito utilizamos la ley de Raoult.

5.24

$$P = P_A X_A + P_B X_B$$

Como el soluto es no volátil, no presentan presión de vapor, se elimina el segundo término de la ecuación obteniendo la siguiente expresión.

5.25

$$P = P_A X_A$$

donde  $X_A$  es la fracción mol del disolvente en la solución.

Si conocemos el valor de la presión total ejercida en el sistema ( $P_{\text{abs}} = P_{\text{atm}} - P_{\text{vacío}}$ ), podemos despejar la presión de vapor de la solución.

5.26

$$P = \frac{P_T}{X_A}$$

de esta manera al conocer la presión de vapor de la solución, podemos obtener la temperatura de ebullición de la solución, con la utilización de las tablas de vapor, se realiza una diferencia de temperaturas y se conoce el aumento en la temperatura de ebullición.

De esta manera para la evaluación del aumento en el punto de ebullición para una concentración del 10% de sólidos presentes en la leche se utiliza la expresión 5.22, obteniendo la fracción de A:

5.27

$$X_A = \frac{\frac{0.9}{18 \text{ g/mol}}}{\frac{0.9}{18 \text{ g/mol}} + \frac{0.1}{495.1500 \text{ g/mol}}} = 0.998$$

De acuerdo con la ecuación 5.26 para obtener la presión de vapor del componente A, se divide la presión total que existe en el sistema, entre la fracción mol de A, de esta manera la presión de vapor de A es igual a:

5.28

$$P = \frac{P_T}{X_A} = \frac{5.8977}{0.998}$$

De esta manera se puede calcular la presión de vapor de A, para cada presión absoluta que se utilizó para realizar el gráfico de Dühring.

En la tabla 5.15 se muestran los datos que se obtuvieron por medio de las relaciones termodinámicas, considerando ocho presiones absolutas, se calcula la presión de vapor para cada una de ellas, y se obtiene la temperatura de ebullición con la ayuda de las tablas de vapor, donde se localiza cada presión de vapor y se calcula la temperatura de ebullición del líquido en caso de que la presión de vapor no sea la que se muestra en la tabla, esto se realiza por interpolación de los datos.

Tabla 5.15. Obtención de temperaturas de ebullición por medio de relaciones termodinámicas.

Presión absoluta (lb/in <sup>2</sup> )	Presión de vapor ( $P = P_T/X_A$ ) (KPa)	Temperatura de ebullición (K)
40.663	40.144	349.51
45.996	46.087	352.447
51.324	51.427	355.167
56.660	56.773	357.698
61.994	62.118	360.031
67.327	67.462	362.1465
72.656	72.801	364.148
77.993	78.144	366.032

En la tabla 5.16 los datos obtenidos indican que las temperaturas de ebullición que se obtuvieron por medio de la ley de Raoult no varían significativamente con las temperaturas de ebullición de agua, existiendo un pequeño aumento de temperatura de tan solo 0.05 K para cada presión absoluta (KPa) para realizar el cálculo.

Tabla 5.16. Comparación de resultados de agua, de datos experimentales y datos obtenidos por medio de relaciones termodinámicas.

Temperatura de ebullición del agua (°C).	Temperatura de ebullición de la leche calculado (°C).	Temperatura de ebullición de la leche experimental (°C).	C.V entre las dos T de ebullición, experimental y calculada.
349.465	349.51	351.431	1.142
352.398	352.447	353.465	0.637
355.117	355.167	355.917	0.455
357.648	357.698	357.848	0.088
359.979	360.031	360.012	0.0109
362.096	362.1465	362.096	0.028
364.098	364.148	364.198	0.027
365.983	366.032	366.013	0.102

Observando la Figura 5.5 donde se muestran las temperaturas que se obtuvieron por medio de las leyes anteriormente descritas, y las temperaturas de ebullición que se obtuvieron experimentalmente podemos decir que existe un aumento significativo en la temperatura de ebullición que se obtuvo experimentalmente en comparación con la que se obtuvo por el método termodinámico en la presión 40.663 KPa existiendo una diferencia de 1.921 K, aunque después se observa que esta diferencia de temperaturas disminuye hasta que los valores son relativamente iguales, por ejemplo la temperatura de ebullición por el método es de 366.032 K y  $T_{\text{experimental}} = 366.013$  K a la presión de 77.993 KPa.

De acuerdo a lo anterior podemos decir que para utilizar el método termodinámico para la predicción del aumento en el punto de ebullición es necesario que la solución no tenga una concentración alta de sólidos, y que de igual manera sólo se puede aplicar en un intervalo de presión de 61.994 a 77.993 KPa. Por lo tanto no es conveniente utilizar este método para la evaluación en el aumento en el punto de ebullición debido a que no refleja los valores adecuados de temperatura de ebullición, solo indica una aproximación.

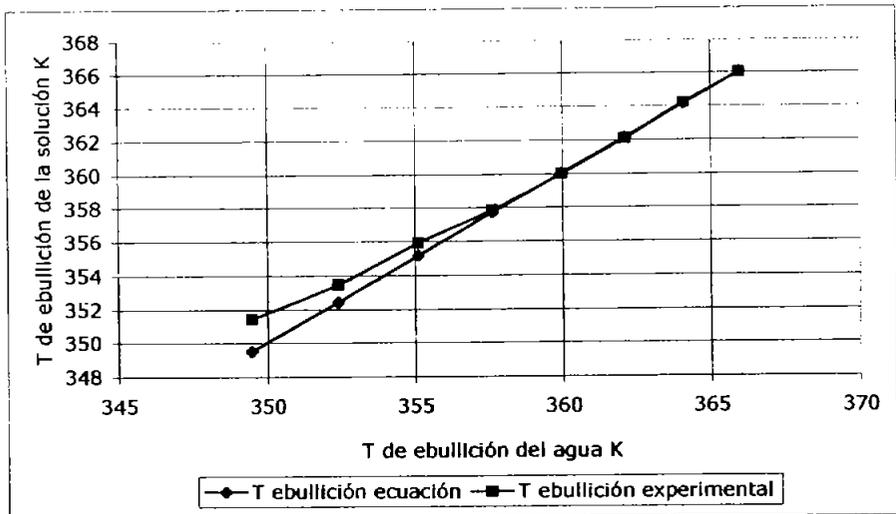


Figura. 5.5 Comparación de temperaturas de ebullición de la leche por medio del método termodinámico y experimental.

De acuerdo a la Figura 5.5, las temperaturas de ebullición que se obtuvieron por medio matemático presentan una tendencia lineal que solo se presenta en soluciones ideales, en comparación con la recta que representa las temperaturas de ebullición experimentales, la cual muestra una tendencia de una línea recta, mostrando un aumento en la temperatura de ebullición mas definido, esto era de esperarse puesto que muchos alimentos, en este caso leche no se comportan como una solución ideal debido a la complejidad de sus componentes.

Este aumento de la temperatura de ebullición, aunque al principio se muestra claramente mas elevado en un intervalo de presión de (40.663 – 61.994 KPa), y después se asemeja a la temperatura del agua a la misma presión, se debe a que posiblemente, la leche sufre algunos cambios en su estructura molecular por efecto del calentamiento a altas temperaturas, el cual podría ser una posible desnaturalización de las proteínas, este cambio ocurre por encima de los 333.15 K, lo que impide observar un aumento en el punto de ebullición significativo en los últimos intervalos de presión (61.944 – 77.993 KPa).

Esto de alguna manera no nos afecta, debido a que en los procesos industriales de concentración de leche, no se utilizan elevadas temperaturas de ebullición para la evaporación del agua presente en los alimentos.

## CONCLUSIONES.

Con el montaje experimental que se utilizó para la experimentación, fue posible obtener las temperaturas de ebullición de la leche en varios intervalos de presión, para cada concentración de sólidos establecida inicialmente. De acuerdo con esto se pudo comprobar que existe una relación lineal entre la concentración de sólidos presentes en solución y la temperatura de ebullición.

Con los datos obtenidos de temperatura, fue posible realizar el gráfico de Dühring, para leche, cumpliendo con el tercer objetivo. Con la obtención de este gráfico, se hace posible determinar el aumento en el punto de ebullición en la leche de una manera rápida y sencilla.

Generalmente en el proceso de evaporación, no es frecuente utilizar soluciones diluidas que se puedan considerar sus propiedades térmicas como las del agua pura tomando los datos de las tablas de vapor.

La evaluación del aumento en la temperatura de ebullición de leche se realizó por que en la mayoría de los casos, se trabaja con soluciones concentradas en las cuales cambian sus propiedades térmicas, tales como calor específico, calor latente de vaporización y el punto de ebullición en comparación con los del agua pura a las mismas condiciones de temperatura durante el proceso de evaporación. Debido a esto es importante poder contar con datos reales de temperatura y de calor específico para la evaluación de distintos parámetros durante el proceso de evaporación.

El efecto del aumento en el punto de ebullición adquiere relevancia, al evaluar los distintos parámetros durante el proceso de evaporación; por ejemplo al realizar un balance de materia y energía en un evaporador de simple efecto podemos observar que la capacidad de evaporación disminuye, así como la capacidad de transferencia de calor cuando se considera el aumento en el punto de ebullición, esto se debe a que cuando se va concentrando la solución es más difícil evaporar el agua de la solución puesto que sus componentes se encuentran más ligados, disminuyendo de esta manera la velocidad de transferencia de calor.

Este efecto sobre la capacidad de evaporación, es más visible en un proceso de evaporación de múltiple efecto, debido a que durante el proceso, la temperatura de ebullición aumenta de un efecto a otro, a medida que se eleva la concentración. Esto provoca un menor  $\Delta T$  disponible, ya que la diferencia de temperaturas entre el vapor y el producto disminuye conforme aumenta la temperatura de ebullición por efecto de la concentración en cada efecto, esta disminución de  $\Delta T$  disponible provoca que disminuya a su vez la velocidad de transmisión de calor entre el vapor y el producto.

Si realizamos un balance de materia y energía en un evaporador de múltiple efecto podemos observar que al considerar el aumento en la temperatura de ebullición de un alimento, podemos obtener los datos reales de masa de vapor utilizada durante el proceso, y obtener de esta manera los costos efectivos de la operación.

**BIBLIOGRAFIA.**

- 1.- Alais Charles, 1998, Ciencia de la leche, Ed. Continental, México.
- 2.- Badger Walter, 1985, Introducción a la Ingeniería Química, Ed. Mc Graw – Hill, México.
- 3.- Badui Salvador 1993, Química de los alimentos, Ed. Prentice Hall, 3ra ed, México.
- 4.- Belitz H.D, Grosch W, 1997, Química de los alimentos, Ed. Acibia, 2da ed, Zaragoza España.
- 5.- Brennan J.G, Butters, 1980, Las Operaciones de la Ingeniería de los Alimentos, Ed. Acibia, 2ª ed, Zaragoza España.
- 6.- Brown Theodore L, 1993, Química la ciencia central, Ed. Prentice Hall, 5ª ed, México.
- 7.- Castelan Robert W, 1976, Fisicoquímica, Ed. Fondo Educativo Interamericano, México.
- 8.- Chang Raymon, 2002, Química 7ª ed. Ed., Mc Graw –Hill, México
- 9.- Chavarria Burgueño Elvia, Delgado Cortes Rubén, 2000, Obtención de ecuaciones empíricas para la estimación de la elevación de la temperatura de ebullición y presión de vapor en jugos de mango, manzana y pina. Cuatitlan izcalli, México

- 
- 10.- Earle, 1998, Ingeniería de los Alimentos, Ed. Acribia, 2da ed, Zaragoza España.
  - 11.- Fellows Peter, 1994, Tecnología del procesado de los alimentos, Ed. Acribia, Zaragoza España.
  - 12.- Fennema Owen R, 2000, Química de los alimentos, Ed. Acribia, 2ª ed. Zaragoza España.
  - 13.- Foust Alan, 1960, Principles of Unit Operations, Ed. John Wiley, New York.
  - 14.- Geankopolis Christie, 1982, Procesos de transporte y operaciones unitarias, Compañía editorial continental, México.
  - 15.- Harnett Donald –Murphy James, 1987, Introducción al análisis estadístico, Ed. SITESA, Addison-Wesley Iberoamericana, México.
  - 16.- Heldman Dennis, 1981, Food Process Engineering, Ed. Avi publishing company, 2da ed, USA.
  - 17.- Laidler Keith, Meiser John, 1998, Fisicoquímica, 1ª ed, Ed. Compañía editorial continental, México.
  - 18.- Miller Irwin, Freund John E., Johnson Richard A., 1992 Probabilidad y estadística para ingenieros, 4ª ed, Ed. Prentice Hall., México.
  - 19.- Mendenhall William, Sinich Ferry, 1997, Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias, 4ª ed., Ed. Prentice May Hispanoamericana, México.

- 20.- Silberbeg Martin S,2002, Química General, Ed Mc Graw –Hill Mexico.
- 21.- Singh Paul, 1998, Introducción a la Ingeniería de Alimentos Ed. Acribia, Zaragoza España.
- 22.- Umland Jean B,2000 Química general,Ed. Internacional Thompson editores, 3a ed. México.
- 23.- Varnam Alan, 1995, Leche y productos lácteos, Ed. Acribia, Zaragoza España.
- 24.- Wark Kenneth,1990, Termodinámica, Ed. Mc Graw – Hill, 5ta ed, México.
- 25.- Weimer Richard, 1999, Estadística, compañía editorial continental, 1ª ed, México.
- 26.- Wolfe Drew. H,1996, Química general, mecánica y biológica, 2ª ed.,Ed. Mc Graw- Hill, México

Páginas electrónicas.

- 1.- [www.consumer.es/web/es/nutricion](http://www.consumer.es/web/es/nutricion)
- 2.- [www.servisalud.com/elpena/nutricion](http://www.servisalud.com/elpena/nutricion)