

13  
2eje.



**UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTONOMA DE MEXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
CUAUTITLAN**



**TRANSPORTE POR BOMBEO DEL YOGUR CON FRUTAS, SU  
RELACION CON LA CONSISTENCIA FINAL DEL PRODUCTO**

**T E S I S**  
**Que para obtener el Título de**  
**INGENIERO EN ALIMENTOS**  
**p r e s e n t a**

**JERONIMO LOPEZ HERNANDEZ**

**Asesora: Dra. Laura Patricia Martínez Padilla**

**Cuahtitlán Izcalli, Edo. de Méx.**

**1994**

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



## **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 está 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.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVENIDA DE  
MEXICO

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

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

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS



Departamento de  
Exámenes Profesionales

DR. JAIME KELLER TORRES  
DIRECTOR DE LA FEG-CUAUTITLAN  
P R E S E N T E .

AT'N: Ing. Rafael Rodríguez Ceballos  
Jefe del Departamento de Exámenes  
Profesionales de la F.E.S. - C.

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la TESIS TITULADA:  
"TRANSPORTE POR BOMBEO DEL YOGUR CON FPUTAS, SU RELACION CON LA  
CONSISTENCIA FINAL DEL PRODUCTO"

que presenta el pasante: JERONIMO LOPEZ HERNANDEZ  
con número de cuenta: 8419095-4 para obtener el TITULO de:  
INGENIERO EN ALIMENTOS

Considerando que dicha tesis reúne los requisitos necesarios para ser discutida en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

A T E N T A M E N T E .  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"  
Cuautitlán Izcalli, Edo. de Méx., a 8 de Junio de 1994

PRESIDENTE M.C. ROSA M. ARRIAGA ORIHUELA

VOCAL DRA. LAURA PATRICIA MARTINEZ PADILLA

SECRETARIO M.C. MA. ELENA VARGAS UGALDE

PRIMER SUPLENTE I.A. LAURA M. CORTAZAR FIGUEROA

SEGUNDO SUPLENTE ING. LETICIA FIGUEROA VILLARREAL

*[Firma de Rosa M. Arriaga Orihuela]*  
*[Firma de Laura Patricia Martínez Padilla]*  
*[Firma de Ma. Elena Vargas Ugalde]*  
*[Firma de Laura M. Cortazar Figueroa]*  
*[Firma de Ing. Leticia Figueroa Villarreal]*

**A mi madre, ya que es la persona que siempre me ha impulsado a lo largo de mi vida siendo este trabajo sólo una pequeña muestra de tan grande e incondicional apoyo que he recibido por parte de ella.**

**A mi novia Ana, pues estoy seguro que sin su ayuda no estaría cumpliendo con la culminación de esta meta, gracias nena.**

**A la Dra. Laura Patricia Martínez Padilla, te agradezco la confianza que me tuviste para el desarrollo del presente trabajo, sin dejar de pasar por alto la dirección y asesoría del mismo.**

**A la I.A. Carmen García Rosales, por el apoyo recibido para el desarrollo de esta tesis.**

**Al jurado asignado para la revisión de esta tesis, y en particular para la I.A. Laura M. Cortazar.**

**Un agradecimiento especial para el I.A. Fco. Javier López Martínez, ya que colaboramos juntos para el desarrollo de este proyecto.**

**A mis amigos, gracias.....**

Indice.....	1
Resumen.....	11
Introducción.....	13
Objetivos.....	18
CAPITULO I ANTECEDENTES	
1.1 Introducción a la fabricación de yogur.....	20
1.2 Fundamentos del proceso de elaboración del yogur.....	26
1.3 Instalaciones y equipos para la fabricación de yogur.....	29
A.-Recepción almacenamiento y manipula- ción de la leche	
B.-Tratamiento preliminar de la mezcla base	
C.-Homogenización	
D.-Tratamiento térmico	
E.-Equipos de fermentación e incubación	
F.-Enfriamiento	
G.-Maquinaria para la mezcla de frutas	
H.-Equipos para el envasado	
I.-Bombas utilizadas en la industria de yogur	
J.-Accesorios en la línea de procesado	
1.4 Reología, conceptos básicos. ....	55
1.5 Comportamiento reológico de los diferentes fluidos alimenticios.....	55

1.6 Reología del yogur.....	64
-----------------------------	----

## CAPITULO II DESARROLLO EXPERIMENTAL

Introducción al desarrollo experimental.....	70
Cuadro metodológico etapa experimental.....	72
2.1 Evaluación de la pérdida de consistencia que sufre el yogur con frutas durante su proceso de elaboración.....	78
2.1.1 Evaluación propiedades fisicoquímicas del yogur con frutas y temperaturas de operación en su proceso de elaboración.....	78
2.1.2 Comportamiento reológico del yogur con frutas.....	80
2.1.3 Evaluación de la viscosidad aparente como medida de consistencia.....	84
2.1.4 Ubicación de los puntos críticos del proceso de elaboración del yogur con frutas....	87
2.2 Determinación de la relación existente entre las condiciones de operación del sistema de bombeo (r.p.m) y la pérdida de consistencia del producto durante su transporte.....	89
2.3 Obtención de un sistema modelo elaborado a base de hidrocoloides que presente comportamiento reológico análogo al yogur con frutas.....	91

2.4 Evaluación de la pérdida de consistencia del sistema modelo en diferentes tipos de bombas de desplazamiento positivo.....	93
2.5 Comparación del daño causado a la consistencia de la base de yogur por dos diferentes bombas de desplazamiento positivo.....	98
<b>CAPITULO III ANALISIS DE RESULTADOS</b>	
3.1 Evaluación de la pérdida de consistencia que sufre el yogur con frutas durante su proceso de elaboración.....	99
3.1.1 Evaluación propiedades fisicoquímicas del yogur con frutas y temperaturas de operación en su proceso de elaboración.....	99
3.1.2 Comportamiento reológico del yogur con frutas.....	102
3.1.3 Evaluación de la viscosidad aparente como medida de consistencia.....	108
3.1.4 Ubicación de los puntos críticos del proceso de elaboración del yogur con frutas....	111
3.2 Obtención de la relación existente entre las las condiciones de operación del sistema de bombeo (r.p.m) y la pérdida de consistencia del producto durante su transporte.....	115
3.3 Obtención de un sistema modelo elaborado a base de hidrocoloides que presente comportamiento reológico análogo al yogur con frutas.....	117

3.4 Evaluación de la pérdida de consistencia del sistema modelo en diferentes tipos de bombas de desplazamiento positivo.....	121
3.5 Comparación del daño causado a la consistencia de la base de yogur por dos diferentes bombas de desplazamiento positivo.....	124
CONCLUSIONES.....	127
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	130
ANEXOS:	
1.- Viscosímetro Rheomat, modelo 108.....	134
2.- Horno de Microondas, modelo AVC-80.....	138
3.- Consideraciones para la instalación, operación y mantenimiento de las bombas de sistema de flujo.....	141



## INDICE DE TABLAS

Página

Tabla 1. Relación de algunos tipos de yogur y productos similares de Oriente Medio.....	22
Tabla 2. Constantes Reológicas.....	67
Tabla 3. Intervalo de aceptación para las propiedades fisicoquímicas del yogur con frutas.....	100
Tabla 4. Intervalo de aceptación para las temperaturas de operación del proceso de elaboración del yogur con frutas.....	100
Tabla 5. Parámetros reológicos en el equilibrio para la base de yogur y yogur con frutas.....	106
Tabla 6. Evaluación de la viscosidad aparente de la base de yogur.....	108
Tabla 7. Porcentaje de pérdida de viscosidad en los diferentes puntos del proceso de elaboración de yogur con frutas.....	114
Tabla 8. Porcentaje de viscosidad pérdida en el bombeo de la base de yogur. ....	116
Tabla 9. Comparación del comportamiento reológico entre la base de yogur y el sistema modelo .....	120
Tabla 10. Condiciones de operación de la bomba SINE, y porcentaje de pérdida de consistencia del sistema modelo ocasionado por el sistema de bombeo.....	121
Tabla 11. Condiciones de operación de la bomba WILDEN y porcentaje de pérdida de consistencia del sistema modelo ocasionado por el sistema de	

bombeo.....	122
Tabla 12. Porcentaje de pérdida de consistencia de la base de yogur en la bomba sinusoidal.....	124

## INDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Esquema general del método tradicional de elaboración de yogur.....	27
Figura 2. Esquema actual del proceso de elaboración del yogur con frutas.....	28
Figura 3. Diagrama típico de la fabricación de yogur con frutas.....	29
Figura 4. Esquema de normalización de la leche.....	30
Figura 5. Los dos posibles puntos de instalación de la unidad embudo-tolva para la reconstitución de la leche en polvo.....	33
Figura 6. Esquema de flujo del producto a través de un homogenizador APV Gowlin.....	35
Figura 7. Esquema de un tanque multiuso para la fabricación de yogur.....	38
Figura 8. Esquema de un intercambiador de calor .....	41
Figura 9. Mezclador Estático.....	43
Figura 10. Dispensador automático de envases y bandejas para 8 recipientes de una envasadora Weserhutte.....	45
Figura 11. Bombas desplazamiento positivo de aleta doble.....	48
Figura 12. Esquema de flujo de yogur en una bomba de desplazamiento positivo.....	48
Figura 13. Bomba de tornillo sinfin.....	49
Figura 14. Relación entre la viscosidad y tratamiento mecánico (fuerza de cizalla).....	50

Figura 15. (a) Representación gráfica del esfuerzo cortante ( $\tau$ ) en función de la intensidad de la velocidad de cizallamiento ( $\dot{\gamma}$ ). (b) Representación del coeficiente de viscosidad ( $\mu$ ) en función de $\dot{\gamma}$ .....	56
Figura 16. Curva de comportamiento reológico.....	57
Figura 17. Fluidos dependientes del tiempo de cizallamiento.....	59
Figura 18. Esquema de diversos dispositivos utilizados para examinar las características físicas de yogur.....	62
Figura 19. Uno de los sistemas de embudo empleados para determinar la consistencia de yogur batido.....	63
Figura 20. Reograma del yogur batido, modelo pseudo-plástico.....	66
Figura 21. Reograma de yogur batido, modelo Herschel-Bulkley.....	66
Figura 22 Comparación de la viscosidad aparente del yogur con frutas elaborado con leche ultrapasteurizada y leche con tratamiento térmico inferior, evaluaciones realizadas en un viscosímetro Haake Rotovisco.....	69
Figura 23. Cuadro metodológico de la etapa experimental.....	72
Figura 24. Sistema de flujo a nivel piloto.....	95

Figura 25. Formación del bucle de histéresis de la base de yogur.....	102
Figura 26. Comportamiento de la viscosidad con respecto al tiempo de cizallamiento de la base de yogur.....	103
Figura 27. Caracterización de la base de yogur llevada al equilibrio.....	104
Figura 28. Bucle de histéresis formado cuando el fluido es dependiente del tiempo de cizallamiento, yogur con frutas.....	104
Figura 29. Gráfica de comportamiento viscosidad con respecto al tiempo de cizallamiento, yogur con frutas.....	105
Figura 30. Reograma característico de un yogur con frutas.....	106
Figura 31. Esquema del proceso de elaboración del yogur con frutas donde se muestran los puntos críticos del proceso.....	111
Figura 32. Evaluación de la viscosidad aparente en diferentes puntos del proceso de elaboración del yogur con frutas.....	112
Figura 33. Gráfica de la relación existente entre el porcentaje de pérdida de viscosidad del yogur con frutas y rpm de operación de la bomba.....	115
Figura 34. Comparación de la viscosidad aparente con respecto al tiempo de la base de yogur	

	y modelo reológico.....	118
Figura 35.	Comparación reológica entre la base de yogur y modelo reológico.....	119
Figura 36.	Pérdida de consistencia en función del flujo volumétrico de las bombas sinusoidal y de diafragma.....	122
Figura 37.	Pérdida de consistencia en función del flujo volumétrico para las bombas sinusoidal y de tornillo.....	125

## RESUMEN

El presente trabajo consiste en la formulación de propuestas relacionadas con el transporte del yogur durante su proceso de elaboración, en donde dichas propuestas se refieren al sistema de bombeo y flujo volumétrico a utilizar en la fabricación del yogur con frutas para que éste pierda el menor porcentaje de consistencia posible.

Se determinó a nivel industrial las causas que provocan que el yogur pierda consistencia durante su elaboración, así mismo se identificó el punto del proceso considerado crítico por la degradación que ocasiona el sistema de bombeo a la consistencia del yogur.

Para tener la certeza de que los datos obtenidos son representativos de las condiciones estándar de producción para el yogur, se fijaron intervalos de trabajo de las propiedades fisicoquímicas de dicho producto, porcentaje de sólidos totales, °Brix, pH.

Fue necesario realizar a nivel piloto la evaluación de la pérdida de consistencia, en dos diferentes bombas de desplazamiento positivo; aplicando un método que permita la evaluación de la misma. Las bombas evaluadas fueron: una de rotor de tipo sinusoidal, y otra de diafragma.

A nivel piloto se trabajó con un fluido de comportamiento reológico análogo a la base de yogur, dicho fluido fué una dispersión de polisacáridos.

Una vez obtenidos los resultados a nivel piloto de la bomba que ocasiona el menor daño a la consistencia del modelo reológico, se

procedió a utilizar base de yogur para evaluar la consistencia de este producto al paso por la bomba seleccionada, para posteriormente comparar estos resultados con los obtenidos a nivel industrial cuando se utiliza una bomba de tornillo (MOYNO).

Finalmente se formularon propuestas para el transporte del yogur con frutas en cuanto a tipo de bomba y gasto volúmetrico a utilizar a nivel industrial, las cuales se obtuvieron mediante los datos a nivel planta piloto.



## INTRODUCCION

Se cree que la tradición de elaborar yogur data de un poco más de 4000 años, por ejemplo, las culturas Persas y Búlgaras creían que el yogur causaba un estado de buena salud, además de contribuir al aumento de la longevidad de las personas. (Tamime, 1990)

La supervivencia de este proceso a lo largo de los años puede atribuirse a que la producción se efectuaba a muy pequeña escala, por lo que el "arte" era transmitido de generación en generación.

La comercialización de la producción de yogur aumentó rápidamente en Europa a partir del año 1920 y en Estados Unidos en 1940, su consumo se popularizó al pensar que prolongaba la vida por eliminar los microorganismos lácticos a las bacterias de la putrefacción intestinal. Generalmente debido a la acidez típica del yogur los consumidores suelen inclinarse a ingerir otros productos lácteos fermentados por ejemplo, el queso; en 1960 una industria Suiza introduce al mercado el yogur edulcorado y con sabor a fruta, aumentando su consumo de forma definitiva debido a la preferencia de los consumidores occidentales por los sabores dulces; el yogur con frutas se toma habitualmente como postre, siendo de gran aceptabilidad para los niños. (Solorza, 1991)

En las últimas décadas este proceso ha evolucionado mucho, principalmente debido a los descubrimientos y avances en diversas disciplinas, como por ejemplo, microbiología, enzimología, física e ingeniería, química y bioquímica pero incluso con la actual tecnología industrial, el proceso de elaboración continúa siendo una compleja combinación de "ciencia" y "arte".

En estos tiempos de avances tecnológicos continuos se emplean métodos modernos de tratamientos a la materia prima, así como condiciones establecidas de fermentación y almacenamiento; las cepas microbianas son rigurosamente seleccionadas (*Lactobacillus bulgaricus* y *Streptococcus termophilus*), con el fin de obtener un producto de la mejor calidad, no obstante podemos encontrar innumerables variantes en la fabricación de este producto, y por lo mismo diferente calidad entre los fabricantes de yogur; en la actualidad se cuenta en el mercado nacional con una infinidad de marcas comerciales, entre ellas la disputa por el mercado de este producto se acentúa día con día, lo cual las obliga a la superación constante encaminados a la optimización de procesos, o investigación de nuevos productos, lo anterior con la finalidad de estar a la vanguardia en ventas.

Las estadísticas señalan que en México, el consumo nacional de yogur en 1980 fué de 15 mil toneladas, lo que represento el 8% del total de derivados lácteos producidos en el país. En 1985 el consumo se elevó a 32 mil toneladas (incremento mayor del 100%), representando el 13% de los derivados lácteos producidos; para 1990 se estimó un consumo de unas 49 mil toneladas, indicando un aumento creciente en la demanda. (Solorza, 1991)

Las cifras antes citadas se deben en mucho al valor nutricional del yogur, el cual está relacionado no sólo con la presencia de los componentes de la leche, sino también a su transformación como resultado de la fermentación causada por los microorganismos. Si el yogur natural, suministra un adecuado aporte nutricional, es de esperarse que la adición de preparaciones de frutas, jugos u otros derivados confieren al

producto otras propiedades nutricionales y sensoriales adicionales además de las resultantes por la presencia de compuestos originados del metabolismo de las cepas microbianas utilizadas. Pero aún hace falta realizar un mayor número de experimentos que pongan en evidencia la serie de beneficios que se dice trae consigo la ingestión periódica de los yogures.

El yogur es un producto cuya estructura interna es compleja, formada fundamentalmente por un gel de caseína ligeramente proteolizada; su consistencia puede estar influida por largas cadenas de polisacáridos formados por ciertas cepas de *Lactobacillus bulgaricus*.

En cuanto a sus características reológicas, este producto ha sido clasificado como un fluido tixotrópico (De Hombre, 1982), por tanto el estudio de sus propiedades reológicas no puede realizarse por cualquier método simple. La viscosidad aparente (consistencia, firmeza, espesamiento) es, junto con el sabor, la apariencia y el aroma, uno de los factores más importantes que determinan la calidad del yogur; se conoce que para tener un yogur de alta calidad se requiere un producto de una firmeza adecuada.

Entre los métodos instrumentales para evaluar la calidad del yogur, posiblemente uno de los más complicados e importantes es el relacionado con la consistencia o viscosidad. Las técnicas viscosimétricas seleccionadas, dependen de los objetivos que se persigan y las posibilidades materiales de que se disponga.

Al igual que las propiedades sensoriales, la textura de un alimento depende en gran parte, del observador, la palabra textura designa al efecto que se percibe o a veces se mide

indirectamente, de los elementos estructurales presentes en los alimentos, cuando se les somete a deformaciones mecánicas.

Frecuentemente, el consumidor condiciona la aceptación o rechazo del alimento a la textura. Sin embargo, en este caso, no se trata de una evaluación analítica y sistemática de la textura, ya que la evaluación analítica exige, o bien grupos de degustación (degustadores entrenados) o el empleo de instrumentos de medidas físicas (viscosímetros, penetrómetros).

Uno de los defectos que se puede encontrar en un yogur, es el de baja consistencia, y como ya se mencionó anteriormente, dependerá de este parámetro la aceptación del producto por parte del consumidor; pues es de esperarse encontrar en un yogur un cuerpo firme, con textura fina y suave. El defecto antes mencionado es ocasionado en gran parte por el sistema de bombeo utilizado para transportar al yogur de una etapa a otra durante su proceso de elaboración, dando como resultado una pérdida de dicho parámetro a través de los diferentes puntos del proceso, obteniendo un producto final con menor consistencia.

Por lo que en el presente estudio se pretende establecer alternativas y/o recomendaciones relacionadas con la velocidad de transporte y tipo de bomba a utilizar para el manejo del yogur sobre su línea de proceso, dichas recomendaciones están basadas en la utilización de un sistema de flujo a nivel planta piloto, así como de un modelo a base de hidrocoloides, el cual presente parámetros reológicos análogos al yogur con frutas.

Para este trabajo se plantea una experimentación en la cual se trabaje con una gama de velocidades de transporte, en cada una de ellas se evalúa la pérdida de consistencia debida al transporte

en la tubería, así como las pérdidas ocasionadas por las bombas del sistema. Esta gama está basada en aquellas velocidades con que se trabaje a nivel industrial, es decir valores mínimos y máximos que permitan una cadencia adecuada en el proceso de elaboración del yogur con frutas.

El presente trabajo culmina con una serie de recomendaciones generales, tanto de la velocidad óptima de transporte, como del tipo de bomba a utilizar para el proceso de elaboración del yogur con frutas.

## OBJETIVOS

### OBJETIVO GENERAL:

Determinar experimentalmente en un sistema de flujo a nivel planta piloto, las condiciones más adecuadas en cuanto a velocidad de transporte y tipo de bomba a utilizar para el proceso de elaboración de un yogur con frutas, mediante la utilización de un modelo reológico elaborado a base de hidrocoloides.

### OBJETIVOS PARTICULARES:

- 1) Evaluación de las propiedades fisicoquímicas de un yogur con frutas a lo largo de su proceso de elaboración.
- 2) Evaluación del comportamiento reológico del yogur con frutas a lo largo de su proceso de elaboración.
- 3) Aplicación de un método de evaluación de la consistencia del yogur en función de la viscosidad aparente del mismo.
- 4) Determinación de los puntos críticos del proceso de yogur donde es afectada notablemente la consistencia del mismo.
- 5) Obtener experimentalmente la relación que existe entre la pérdida de consistencia del producto y las r.p.m. de operación del sistema de bombeo, durante el proceso de elaboración del yogur con frutas.
- 6) Elaboración de un modelo a base de hidrocoloides, que presente un comportamiento reológico análogo al yogur con frutas, en el punto crítico de su proceso de elaboración.
- 7) Utilizando el sistema de flujo a nivel planta piloto y el modelo a base de hidrocoloides, evaluar la pérdida de consistencia de dicho modelo en diferentes tipos de bombas de desplazamiento positivo.

8) Evaluación del daño causado a la consistencia de la base de yogur cuando se utilizan para su transporte una bomba de rotor sinusoidal y una de tornillo sinfin.

9) Establecimiento de propuestas y/o alternativas en cuanto a las velocidades de transporte (flujo volumétrico) y tipo de bomba para trabajar a nivel industrial en el proceso de elaboración de un yogur con frutas.

# CAPITULO 1

## ANTECEDENTES

*1.1 Introducción a la fabricación del yogur*

*1.2 Fundamentos del proceso de elaboración del yogur*

*1.3 Instalaciones y equipos para la fabricación del yogur*

*1.4 Reología, conceptos básicos*

*1.5 Comportamiento reológico de los diferentes fluidos alimenticios.*

*1.6 Reología del yogur*



## 1.1 INTRODUCCION A LA FABRICACION DEL YOGUR

Aunque no se dispone de ningún documento en el que se contemple el origen del yogur, durante mucho tiempo diversas civilizaciones han creído en sus efectos benéficos sobre la salud y la nutrición humana.

Sin embargo, el yogur es probablemente originario del medio Oriente, y la evolución de este producto fermentado a lo largo de los años se puede atribuir a las habilidades culinarias de los pueblos nómadas de esta parte del mundo.

La producción de leche en los países de Oriente Medio ha sido siempre estacional, estando normalmente limitada a unos pocos meses del año. La razón principal de esta estacionalidad es la disponibilidad de leche, pues estos pueblos no han tenido nunca una producción animal intensiva, ya que, como en los primeros tiempos, la cría de los animales está en manos de los nómadas, que se desplazan de unas regiones a otras buscando pastos. Este tipo de vida los obliga a permanecer durante meses en zonas desérticas, lejos de ciudades y pueblos en los que puedan vender los productos obtenidos de los animales.

Otra razón esencial es el clima subtropical de Oriente Medio, en donde se pueden alcanzar fácilmente temperaturas de 40 grados centígrados durante el verano. En un clima de estas características la leche se acidifica y coagula poco tiempo después del ordeño, especialmente cuando las condiciones de producción son rudimentarias, ya que el ordeño se realiza manualmente y no es posible refrigerar la leche obtenida, por lo que el riesgo de contaminación microbiana a partir del aire, de los propios animales, de los piensos o de los ordeñadores es

especialmente elevado. En estas condiciones no resulta factible el transporte ni el almacenamiento de la leche por un período de tiempo prolongado, por lo que la mayor parte de la población sólo consume leche en algunas ocasiones, e incluso los propios nómadas tienen que consumirla al mismo ritmo en que se produce.

Sin embargo, desde los primeros tiempos resultó evidente que el agriado de la leche no es en modo alguno un proceso uniforme. La fermentación debida a las bacterias no lácticas da lugar a un producto insípido y desagradable, que presenta un coágulo irregular, con gas y una notable tendencia a la sinéresis. Por el contrario, la acción de las bacterias lácticas sobre la leche da lugar a un producto fermentado de aroma y sabor agradable que se puede comer o beber, siendo denominado en este último caso "leche fermentada acidificada".

Los pueblos de Oriente Medio han criado vacas, ovejas, cabras, camellos y, poco a poco, las tribus nómadas fueron desarrollando un proceso de fermentación que les ha permitido el control de la acidificación de la leche de estas especies. La característica principal de esta estandarización es el calentamiento de la leche en calderas abiertas, el cual:

- a) Permite cierta concentración de la leche, lo que proporciona al coágulo final la viscosidad adecuada.
- b) Modifica las propiedades de la caseína, mejorando la calidad del producto final.
- c) Asegura una selección gradual de las bacterias ácido lácticas, capaces de tolerar elevadas concentraciones de ácido láctico y responsables del desarrollo del característico sabor del

producto.

d) Destruye los microorganismos patógenos en la leche.

e) Permite la fermentación de la leche a una temperatura ligeramente superior y el predominio de cepas termófilas de bacterias ácido lácticas.

Aunque la evolución de este proceso de fermentación ha sido estrictamente intuitiva, la producción de leche acidificada se convirtió rápidamente en una forma de conservación de la leche. Poco a poco, nuevas comunidades aprendieron este sencillo tratamiento de conservación y uno de los productos obtenidos se denominó "yogur", vocablo del término turco "Jugurt". A lo largo de los años han aparecido numerosas variantes de este término, algunas de las cuales son las siguientes:

TABLA 1. RELACION DE ALCUNOS TIPOS DE YOGUR Y PRODUCTOS SIMILARES DE ORIENTE MEDIO.

DEMOMINACION TRADICIONAL	ORIGEN
Jugurt	Turquia
Busa	Turquestan
Kissel Mleka	Bulcanes
Leban-Leban	Libano y algunos países
Arabas	
Zabady	Egipto y Sudan
Mast-Dough	Iran y Afganistan
Robs	Iraq
Dahi-Dahes	India
Tiaourtí	Grecia
Ciaddu	Italia
Iogurta	Brasil y Portugal
Gruzovina	Yugoslavia
Donakaya	Rusia
Yoghurt-Yogurt-Yaort-Yourt	Resto del mundo, La Y es
Yaourtí-Yahourth-Yogur	sustituida por la J en algunos países.

Fuente: Tamime, 1990.

Sin embargo, aunque el yogur posee muchas propiedades positivas, puede alterarse en unos días, especialmente si se mantiene a una temperatura ambiente, por lo que en Oriente Medio

ha existido una clara tendencia hacia la búsqueda de técnicas sencillas que permitan conservar la calidad del producto durante más tiempo.

El primer paso en este sentido resultó sencillo y fué consecuencia de la utilización por los nómadas de recipientes hechos a partir de pieles de animales para la elaboración del yogur. En condiciones normales el yogur se consumía bastante pronto pero si se dejaba algún tiempo en los odres la naturaleza del producto se modificaba notablemente. A medida que el suero rezumaba a través de la piel y se evaporaba, el contenido en sólidos totales aumentaba, así como la acidez, dando como resultado un yogur concentrado o condensado, con una acidez superior al 2% de ácido láctico y un contenido en extracto seco total de aproximadamente un 25%, partiendo de un yogur con una acidez de 1.5% de ácido láctico y un 12-13% de extracto seco total. Para los nómadas, cuya principal fuente de alimentación y salud son los animales que crían y la leche de ellos obtenida, la resistencia de este tipo de yogur "condensado" a la alteración presentó un gran atractivo. (Tamime, 1990)

De cualquier forma, la amplia difusión de la refrigeración ha determinado una disminución del interés por estos productos tradicionales, excepto en determinados pueblos de Oriente Medio, apareciendo una "nueva generación" de tipos de yogur. Actualmente la producción tiende a concentrarse en grandes y modernas industrias lácteas y el éxito del producto en el mercado depende de la existencia de una red de comercios minoristas que dispongan de sistemas de almacenamiento que permitan la conservación del producto a temperaturas inferiores a 7°C. En principio, sólo se

producía "yogur natural" y el mercado del mismo se limitaba en gran medida a consumidores que consideraban al yogur como un alimento sano, pero poco a poco la concepción del yogur cambió y la introducción de los yogures de frutas en los años 60 supuso una nueva imagen del producto, dejando de ser exclusiva del mercado de productos dietéticos, para convertirse en un alimento o un postre popular, siendo las cifras de producción una clara muestra de la expansión en el mercado.

No obstante, el fundamento del método de elaboración del yogur ha cambiado poco a lo largo de los años y, aunque se han introducido algunas mejoras, especialmente en relación con las bacterias acidolácticas responsables de la fermentación, los pasos básicos del proceso continúan siendo los mismos, incluyendo:

- 1) Aumento del contenido en extracto seco total de la leche hasta valores del 14-16%.
- 2) Calentamiento de la leche, preferiblemente por un método que permita el mantenimiento de la misma a temperaturas elevadas durante 10-30 minutos, dependiendo del tiempo exacto de la temperatura elegida.
- 3) Siembra de la leche con un cultivo bacteriano en el que *Lactobacillus bulgaricus* y *Streptococcus thermophilus* sean los microorganismos predominantes.
- 4) Incubación de la leche sembrada, a granel o en los envases de comercialización en condiciones adecuadas para la formación de un coágulo suave y viscoso con el sabor deseado.
- 5) Refrigeración y, en su caso, tratamientos adicionales, como

por ejemplo: la adición de frutas u otros ingredientes, pasteurización o concentración.

#### 6) Envasado para la distribución en refrigeración.

El hecho de que todos los procesos comerciales compartan este núcleo común ha determinado que el término "yogur" se aplique a una amplia variedad de productos. La inclusión de todas estas variedades bajo la denominación de yogur no es aceptada por muchas personas, ya que el yogur propiamente dicho debe, por razón del proceso de elaboración, contener un elevado número de microorganismos viables del cultivo iniciador. Sin embargo, la costumbre parece haber determinado que siempre que en el envase se indique la naturaleza del proceso final, por ejemplo "yogur pasteurizado" se acepte esa denominación, al no quedar duda alguna sobre la verdadera naturaleza del producto básico.

Este planteamiento implica también que la elaboración del yogur debe incluir siempre una fase de fermentación, es decir, que si el coágulo se forma por adición directa de ácido láctico el producto no puede ser denominado en ningún caso yogur, ni siquiera "sucedáneo del yogur". Las variaciones en la composición de los microorganismos del cultivo iniciador y la falta de regulación de la temperatura de incubación, junto con otra serie de variables del proceso, pueden dar lugar a un producto final de calidad deficiente y sólo el conocimiento de la fermentación puede servir para prevenir y reducir el riesgo de presentación de fallos en la producción del yogur.

## 1.2 FUNDAMENTOS DEL PROCESO DE ELABORACION DEL YOGUR

Para comprender los principios básicos del proceso de elaboración del yogur resulta de gran utilidad estudiar independientemente las distintas etapas del mismo y sus efectos sobre la calidad del producto final.

A continuación se esquematiza el método tradicional de elaboración de yogur, pudiendo comprobarse que este presenta varios inconvenientes, como lo son:

a) Las repetidas siembras del cultivo iniciador tienden a estabilizar la relación entre *Streptococcus thermophilus* y *Lactobacillus bulgaricus* o pueden dar lugar a mutaciones.

b) La baja temperatura de incubación, o temperatura ambiente, determina una lenta acidificación de la leche (18 horas o más) en comparación con las 2.5 horas en las que este proceso tiene lugar en condiciones óptimas a temperatura de 40-45°C.

c) La lenta acidificación puede tener efectos secundarios no deseables, como por ejemplo una exudación de suero, los cuales pueden influir negativamente sobre la calidad de yogur.

d) El proceso tradicional no permite controlar la concentración de ácido láctico producida durante la fermentación

No obstante a pesar de sus inconvenientes, es obvio que el proceso tradicional ha sido la base fundamental para la actual industria del yogur. Las modificaciones básicas se basan principalmente en:

a) La pureza de los cultivos iniciadores del yogur obtenidos a partir de casas comerciales, de "bancos" de iniciadores, o de centros de investigación.

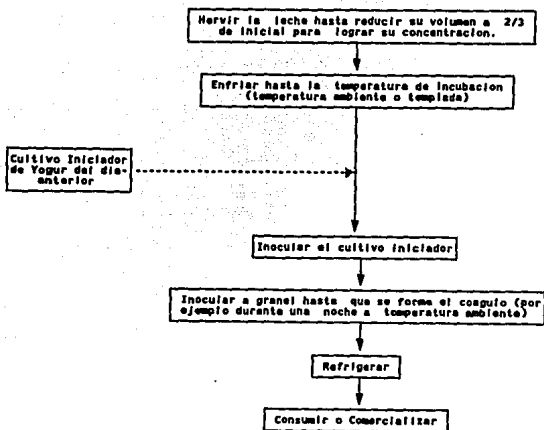


Figura 1. Esquema general del método tradicional de elaboración del yogur. (Tamime 1990)

b) La capacidad de las personas que trabajan en las industrias lácteas para sembrar la leche esterilizada con estos cultivos en condiciones asépticas, consiguiendo así cultivos iniciadores realmente activos.

c) La posibilidad de controlar con precisión la temperatura de incubación, pudiendo prever con anterioridad la velocidad de la acidificación y la duración del proceso.

d) La posibilidad de refrigerar rápidamente el yogur una vez alcanzada la acidez requerida, permitiendo una mayor uniformidad en la calidad del producto final.



e) La disponibilidad de métodos sencillos, para determinar el desarrollo de la acidez en la leche, que permitan controlar el proceso e incluso por operarios poco preparados.

A continuación se muestra el siguiente esquema, en donde podemos observar las diferentes etapas del proceso de elaboración del yogur con frutas:

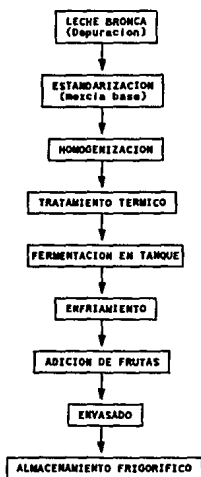


Figura 2. Esquema actual del proceso de elaboración del yogur con frutas. (Alfa-Laval, boletín informativo 1990)

### 1.3 INSTALACIONES Y EQUIPOS PARA LA FABRICACION DE YOGUR

Durante los últimos 20 años se ha desarrollado una tecnología muy sofisticada que ha permitido importantes mejoras en la mecanización y automatización de las industrias. La diversidad de estas tecnologías puede estudiarse más fácilmente en relación con:

- El tipo de yogur elaborado: tradicional o batido.
- El efecto de la mecanización sobre la calidad de yogur.

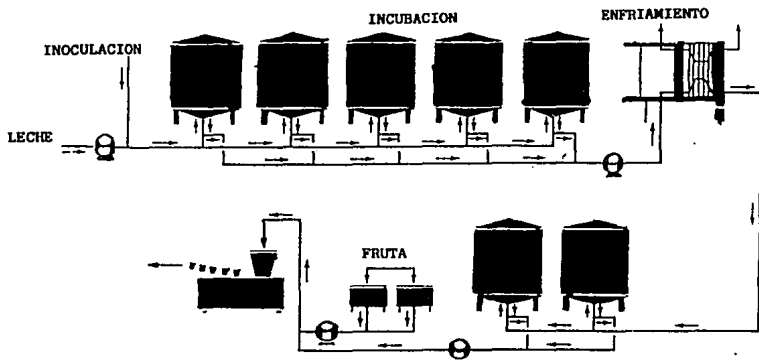


Figura 3. Diagrama típico de la fabricación de un yogur con frutas.

#### A) RECEPCION, ALMACENAMIENTO Y MANIPULACION DE LA LECHE

La recogida de la leche procedente de las granjas se efectúa a granel utilizando normalmente camiones cisterna, aunque también se pueden utilizar vagones cisterna. En el caso de que el transporte se realice en camiones o vagones cisterna, la leche recibida se mide o pesa en el muelle de recepción, tras tomar una

muestra para efectuar los análisis químicos y/o microbiológicos, la práctica más común es refrigerar la leche a temperaturas inferiores a 5°C antes de su almacenamiento en los silos, utilizando intercambiadores de calor de placas. En esta etapa un tratamiento adicional posible consiste en la instalación de un separador en la línea de recepción para clarificar la leche antes de la refrigeración. Además se toma una muestra representativa de cada proveedor para determinar la calidad química y bacteriológica de la leche procedente de las distintas granjas.

#### B) TRATAMIENTO PRELIMINAR DE LA MEZCLA BASE

##### B.1) Estandarización o normalización de la leche.

Los principios teóricos de la normalización de la leche se pueden esquematizar en la figura 4 del modo siguiente:

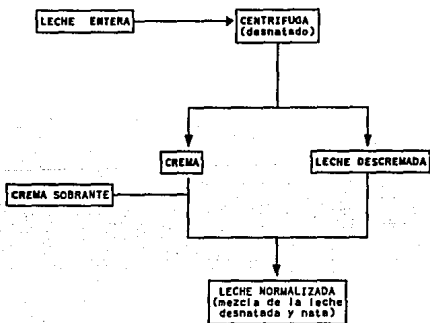


Figura 4. Esquema de normalización de la leche. (Tamime 1990)

La precisión del proceso depende de factores como:

- a) El tipo de equipo utilizado y el rendimiento del desnatado.

b) El sistema de control utilizado.

La eficacia del proceso de desnatado ha mejorado notablemente a lo largo de los años, de modo que la cantidad de grasa residual presente en la leche oscila normalmente entre 0.05-0.07%.

La normalización de la leche puede realizarse por distintos sistemas, cuya eficacia depende de su capacidad para garantizar:

1) Que la presión de la leche desnatada en la tubería de salida sea inferior a la presión que existe en el tanque en el que se mezcla la nata y la leche desnatada.

2) Que el contenido en grasa de la nata permanezca constante. La cantidad de nata que debe mezclarse con la leche desnatada se puede establecer fácilmente si estos dos parámetros se mantienen constantes, es decir, que la mezcla proporcional controla el contenido de grasa final de la leche destinada a la fabricación de yogur.

La aplicación de estos sistemas para la fabricación de yogur puede considerarse teniendo en cuenta las siguientes condiciones:

a) Si el contenido en extracto seco total de la leche se incrementa mediante el empleo de un evaporador, es necesario normalizar el contenido en grasa antes de llevar a cabo la concentración.

b) La leche desnatada puede concentrarse por evaporación y antes de proceder a otros tratamientos debe normalizarse mediante la adición de nata.

c) La leche concentrada desnatada debe normalizarse con nata.

B.2) Aumento del extracto seco de la leche

Para el enriquecimiento de la leche desnatada destinada a la elaboración de yogur se pueden emplear distintos tipos de leche en polvo, siendo la leche en polvo desnatada la más utilizada,

los ingredientes deshidratados se añaden a la fase acuosa, que puede ser leche entera, leche desnatada o agua y los equipos están diseñados para permitir:

- Una dispersión completa de los ingredientes deshidratados en la fase acuosa.
- Una hidratación completa de las partículas deshidratadas sin dar lugar a grumos residuales.
- Una mínima incorporación de aire para reducir los problemas de formación de espuma.
- Una fase de limpieza y desinfección de la unidad.

Los equipos para el manejo de los ingredientes deshidratados que se encuentran en las industrias lácteas dependen de la producción y del sistema de distribución, básicamente la leche en polvo se empaqueta en unidades de pequeña capacidad (sacos de papel de 25-50 kg. También existen distintos tipos de equipos para la adición de estos componentes deshidratados a la mezcla base, de modo que mientras los sacos (pequeñas cantidades) pueden vaciarse directamente en las unidades de reconstitución cuando se manipulan cantidades mayores se emplean tamices. Con el objeto de aprovechar todas las partículas de los ingredientes deshidratados se utilizan filtros, especialmente en plantas de gran producción.

A continuación se describe la unidad más empleada para la adición y mezcla de la leche en polvo. (Tamime, 1990)

Embudo/tolva de mezcla.

La reconstitución de los ingredientes deshidratados se lleva a cabo en lotes, siendo necesario un circuito cerrado constituido por un tanque, tuberías de conexión, una bomba centrífuga y el embudo/tolva. Normalmente, el tanque se llena con la fase acuosa

a una temperatura de 40-50°C y comienza la circulación. La posición de la tolva con respecto a la bomba es importante, existiendo dos posibilidades:

a) Si la tolva se monta sobre el lado de succión de la bomba centrífuga, se produce una rápida dispersión y una adecuada disolución de los ingredientes deshidratados gracias a la acción de la bomba, el inconveniente de esta posición son los frecuentes bloqueos de la bomba que suelen producirse.

b) Si la tolva se instala a la salida de la bomba centrífuga, directamente detrás de la unidad venturi especialmente diseñada, se soluciona el problema del bloqueo, pero la dispersión total es más lenta, ya que la unidad venturi crea un vacío en el interior de la tubería, provocando la succión del polvo hacia la solución recirculante.

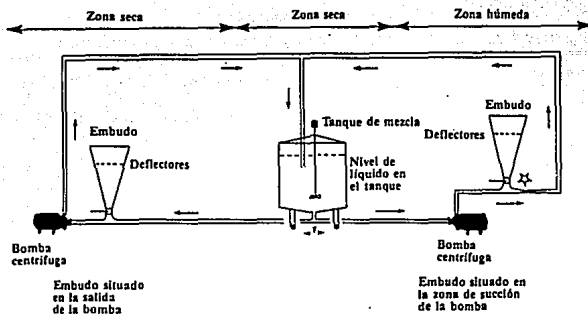


Figura 5. Esquema de los dos posibles puntos de instalación de la unidad embudo-tolva para la reconstitución de la leche en polvo. (Tamime, 1990)

Para la elaboración de yogur se instalan tanques de mezcla en paralelo (semejantes a un pasteurizador discontinuo pero sin un adecuado sistema de agitación) para preparar la mezcla base, de modo que mientras unos se vacían, los otros se llenan, pudiendo conseguirse un flujo continuo de leche a los tanque de incubación.

Cuando se lleva a cabo la reconstitución de leche en polvo es preciso controlar dos condiciones de la leche reconstituída.

1) No todas las partículas de leche se disuelven durante el proceso de reconstitución, quizás debido a la utilización de leches en polvo de escasa calidad, o la ineficiencia de los equipos de mezcla , todas las partículas no disueltas deben eliminarse del modo siguiente:

-Mediante mallas de acero inoxidable o mallas mixtas constituidas por un tamiz de acero inoxidable y un filtro nylon.

-Mediante centrifugas.

Las centrifugas resultan excelentes para la eliminación de cualquier partícula no disuelta o extraña, pero por razones de comodidad son más utilizados los filtros, la eliminación de estas partículas resulta imprescindible, ya que su presencia puede producir averías en los homogenizadores y/o incrementar la cantidad de leche depositada en las superficies de los intercambiadores de calor.

2) La hidratación completa de la leche en polvo requiere unos 5 minutos, ya que de otro modo se presentan problemas de hidratación.

### C) HOMOGENIZACION

Una unidad de homogenización consiste simplemente en:

- 1) Una bomba de presión.
- 2) Una cabeza o válvula de homogenización.

La bomba de presión consta normalmente de tres o cinco pistones accionados por un motor eléctrico de elevada potencia.

La presión de homogenización, indicada normalmente por un manómetro, se ajusta manualmente por una palanca de presión. El flujo del producto por el homogenizador tiene lugar del modo siguiente:

- Como consecuencia del desplazamiento de succión del pistón la leche entra en el cilindro a través de la válvula de succión del paso inferior mientras la válvula de salida permanece cerrada.
- Cuando el pistón se desplaza hacia adelante la válvula de succión se cierra y la leche es pasa a través de la válvula de salida por la conducción superior hacia la cabeza o válvula de homogenización.
- La homogenización puede hacerse en una o en dos fases.

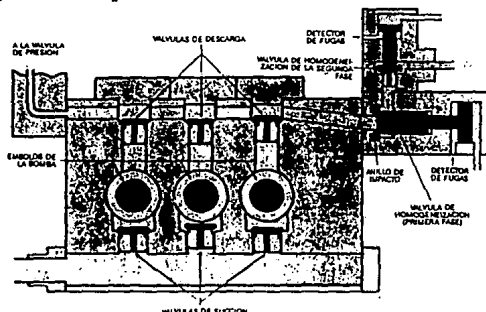


Figura 6. Esquema del flujo del producto a través de un homogenizador APV Gaulin. (Tamime, 1990)



Además, normalmente los pistones presentan juntas especiales para evitar cualquier contaminación de la leche por el aceite. La eficacia de la homogenización depende principalmente del diseño de la cabeza de homogenización y de la presión aplicada durante el proceso.

En principio la sección de cualquier cabeza de homogenización consta de:

1) Soporte de válvula o junta exterior.

2) Anillo de homogenización o impacto.

3) Válvula.

4) Espacio para el paso del producto. El paso de la leche por la cabeza de homogenización tiene lugar del modo siguiente:

-La leche entra en el homogenizador a elevada presión y el primer impacto fuerza la apertura de la válvula ajustable.

-La caída de presión originada da lugar a un efecto de cizalla y a la formación de burbujas por cavitación, lo que determina una ligera reducción del tamaño de glóbulos grasos.

-La leche continúa fluyendo a gran velocidad y el impacto contra el anillo de homogenización (2), da lugar a un cambio en la dirección del flujo que a su vez da lugar a un mayor efecto de cizalla como consecuencia del impacto y de la explosión de las burbujas de aire.

-El efecto de la homogenización puede incrementarse haciendo pasar el producto a través de una segunda cabeza de homogenización, la cual deberá trabajar a una presión inferior a la de la primera fase.

-La presión de la segunda fase de homogenización puede ajustarse para lograr el grado de homogenización deseado.

#### **D) TRATAMIENTO TERMICO**

El calentamiento de la leche y el enfriamiento del coágulo se basan en la transmisión de calor que tiene lugar de un medio caliente a otro más frío y, cuanto mayor es la diferencia entre la temperatura de ambos medios, mayor es el flujo de calor. El tratamiento térmico aplicado puede ser directo o indirecto, siendo más utilizado por razones prácticas el segundo. De este modo, en vez de inyectar vapor en la leche durante el calentamiento en la industrias de fabricación de yogur, normalmente, la leche no entra en contacto con el medio calefactor, por lo que la composición química no se modifica durante el tratamiento térmico. Así mismo, también la refrigeración se efectúa por métodos indirectos.

Los equipos para el tratamiento térmico de la leche incluyen:

Pasteurizadores discontinuos o tanques multiusos, en los que la leche se puede calentar por inyección directa de vapor o por métodos indirectos (inyección de vapor en la camisa del equipo).

Equipos para el procesado continuo (intercambiadores de calor de placas, de tubos), en los que la leche se calienta por un método indirecto utilizando vapor a baja presión, o agua caliente en la sección de calentamiento de los intercambiadores de calor.

##### **1) Tanques discontinuos o multiuso.**

Estos tanques normalmente, disponen de una camisa de agua, durante la fase de calentamiento se inyecta vapor en el agua de la camisa y durante la fase de refrigeración del coágulo se hace circular por la misma agua fría.

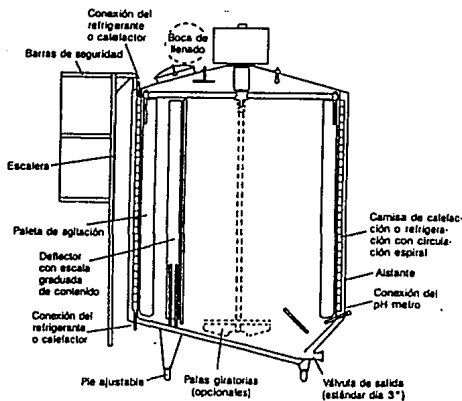


Figura 7. Esquema de un tanque multiuso para la fabricación de yogur.

## 2) Proceso continuo.

Los tipos de intercambiador de calor más utilizados en las industrias lácteas son los intercambiadores de calor de placas.

Estos intercambiadores de calor pueden ser considerados como unidades de doble canal en las que el medio calefactor (agua caliente) fluye en uno de los canales, y por el lado contrario de la placa fluye la leche.

La leche se procesa de modo continuo, las ventajas de estos intercambiadores de calor frente a los discontinuos son:

- 1) Ocupan menos espacio.
- 2) Necesitan menos energía debido a la mayor eficacia de la transmisión y recuperación de calor.
- 3) Permiten incrementar la productividad al posibilitar la

utilización de los tanque de fermentación más de una vez al día.

4) El sistema de operación es más vérsatil, por ejemplo, la leche puede retirarse a una determinada temperatura para ser homogenizada.

Un intercambiador de calor de placas es un equipo consistente en una serie de placas corrugadas de acero inoxidable mantenidas juntas en un armazón. A lo largo del borde de las placas se dispone de juntas de goma para evitar cualquier fuga o mezcla del agua y la leche. El corrugado de las placas aumenta la turbulencia del líquido y la superficie de intercambio, aumentando así la eficacia de la transmisión de calor. El grosor de las juntas determina el espacio existente entre las placas. Para el calentamiento de la leche son aconsejables placas muy juntas, mientras que para el enfriamiento del yogur es preciso utilizar mayor separación. En el primer caso, la leche fluye formando una fina lámina a lo ancho de la placa, lo que permite un rápido intercambio de calor, pero para el enfriamiento del yogur ya coagulado es necesario utilizar una mayor separación entre las placas para evitar una disminución excesiva de la viscosidad del producto.

Un intercambiador de calor consta de varias secciones en las que tienen lugar los distintos tratamientos de la leche, es decir, precalentamiento, regeneración, calentamiento, mantenimiento y refrigeración, cuando es necesario. El medio calefactor es normalmente agua, pero si se precisa calentar la leche a temperaturas superiores a 100°C se utiliza vapor a baja presión. El medio refrigerante puede ser agua fría o una

salmuera, dependiendo de la temperatura final deseada. (López, 1992)

#### **E) EQUIPOS DE FERMENTACION E INCUBACION**

En esta fase del proceso de fabricación del yogur la leche procesada (es decir enriquecida, estandarizada, homogenizada y sometida a tratamiento térmico) se enfría hasta la temperatura de incubación, que debe ser del orden de 40-45°C para la fermentación rápida (2.5 horas).

A diferencia del yogur tradicional, el coágulo de yogur batido se produce a granel, procediéndose a la ruptura de la estructura del gel antes o durante la fase de refrigeración y envasado, siendo el tanque multiuso el equipo utilizado para esta finalidad.

Este tipo de tanque esta diseñado como una unidad de múltiples aplicaciones es decir, para el tratamiento térmico de la leche y la fermentación, para estas mismas finalidades y además de refrigeración o para fermentación y refrigeración únicamente.

#### **F) ENFRIAMIENTO.**

Una vez alcanzada la acidez deseada del producto debe comenzar la refrigeración del coágulo para reducir la temperatura de 40-45° a 20°C , o incluso a valores inferiores a 10°C. El objetivo básico es reducir la actividad metabólica del cultivo iniciador ya que si la refrigeración se retrasa, el yogur puede hacerse inaceptable debido a una acidez excesiva. Dependiendo del tipo de equipo utilizado para el enfriamiento del yogur y de la duración de esta etapa, se aconseja comenzar el enfriamiento a valores de acidez de 0.8-1.0% de ácido láctico, con objeto de conseguir en el producto final concentraciones de 1.2-1.4% del mismo.

En la práctica es común utilizar refrigeradores continuos, entre estos podemos mencionar al intercambiador de calor de placas pues permite un enfriamiento más rápido. El flujo del yogur a través de un intercambiador de calor se esquematiza en la figura 8; y está generalmente aceptado que la entrada de yogur por unidad de tiempo en un intercambiador de calor de placas debe de ser de aproximadamente el doble de la capacidad de la planta de procesado, es decir, para una planta que procesa 3500 a 4000 litros/hora la capacidad de los refrigeradores debe ser del orden de 8000 litros.

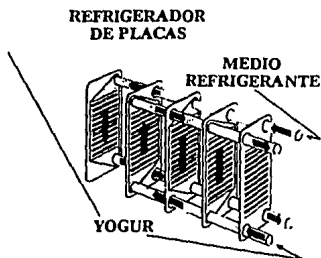


Figura 8. Esquema de un intercambiador de calor.

Un refrigerador de placas presenta un diseño similar a un intercambiador de calor de placas convencional, ya descrito anteriormente, excepto que presenta una separación de las placas mucho mayor, minimizando el riesgo de producir alteraciones en la estructura del coágulo. Además, debido a la tendencia a la generación de una presión en la parte posterior de los refrigeradores de placas es necesario limitar el flujo de yogur o aumentar progresivamente la separación entre las placas. (López, 1992)

### **G). MAQUINARIA PARA LA MEZCLA DE FRUTAS.**

El yogur frío (a 20°C) o refrigerado ( a 10°C) se transfiere a un tanque intermedio de almacenamiento antes de proceder a su procesado posterior, es decir, a la adición y mezcla de frutas y envasado. El yogur puede mantenerse en estos tanques un corto período de tiempo o durante toda una noche, siendo la finalidad primaria de estos tanques la siguiente:

- 1) Mantener la temperatura deseada del yogur, ya que se trata de tanques aislados.
- 2) Actuar como depósitos de reserva en caso de producirse la ruptura de alguna de las secciones de la fábrica.
- 3) Mantener una suficiente reserva de yogur, gracias al almacenamiento en estos tanques.

Las frutas procesadas utilizadas en la fabricación de yogur se presentan normalmente envasadas en recipientes metálicos.

La adición de frutas al yogur se realiza por medio del método de mezcla continua, esto se realiza por medio de un mezclador continuo de frutas y yogur el cual consta de tres unidades distintas, la primera, es un dispositivo de medición de flujo para dosificar la cantidad correcta de fruta en la conducción de yogur, la segunda, de un dispositivo de medida para conocer la cantidad correcta de yogur, y la tercera, de un dispositivo de mezcla que permita una distribución homogénea de la fruta. En el mercado existen distintos tipos de mezcladores continuos, los cuales deben cumplir los siguientes requisitos:

- Permitir una adecuada mezcla de la fruta y el yogur.
- Ocasionar la mínima alteración del coágulo.
- Disponer de un dispositivo preciso de medida de la fruta que

permita la mezcla de las distintas frutas en las proporciones deseadas.

- Ser fácilmente desmontable para permitir su limpieza o disponer de un sistema de limpieza C.I.P.

- Todas las superficies que entren en contacto con el producto deben ser de acero inoxidable de buena calidad. (López, 1992)

1) Mezcladores estáticos en línea (fig. 9). Este tipo de mezcladores consta de una tubería de acero inoxidable con una serie de cuchillas helicoidales. En la práctica es posible su utilización montándolos verticalmente, en forma de T en el fondo hacia la que se bombea el yogur y la fruta desde los tanques.

El flujo de yogur y fruta a través de las cuchillas helicoidales en el mezclador garantiza una distribución uniforme de la fruta en el seno del coágulo. Las especificaciones de estos son:

-Flujo 500-1000 litros/hora.

-Diámetro de las conducciones de hasta 6.35 cm.

-Número de cuchillas 10.

-Longitud 75 a 115 cm.

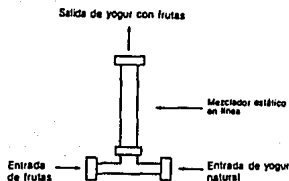


Figura 9. Mezclador estático. (Tamime, 1992)

2) Mezclador Gasti y bomba de alimentación. Este sistema consta de dos unidades de succión que extraen el yogur y la fruta de sus



respectivos tanques. La bomba de succión de yogur mantiene un flujo constante, la de succión de fruta permite infinitas variaciones de la relación yogur-fruta que pueden ser del orden 1:5 ó de 1:20. La mezcla de los dos ingredientes tiene lugar en una tubería de presión común, y los flujos de yogur y fruta pueden transformarse en un flujo continuo.

#### **H) EQUIPOS PARA EL ENVASADO DE YOGUR.**

Existen en el mercado distintos tipos de envasadoras de alta velocidad y, aunque su costo es uno de los principales factores condicionales de la elección de una determinada pieza o equipo, desde el punto de vista técnico existen ciertas especificaciones que deben tenerse en cuenta:

- Método de llenado y cierre.
- Tipo de envase utilizado.
- Grado de automatización.
- Necesidad de asegurar un alto grado de higiene (todas las superficies de contacto deben ser de acero inoxidable y accesibles para su limpieza y desinfección).
- Tiempo necesario para cambiar de sabor o volumen.
- Precisión del llenado y eliminación de goteo entre envases.
- Disponibilidad de sistemas de marcado de fecha.
- Forma de separar y ordenar los envases.
- Medidas de seguridad (que no quede ningún envase sin llenar, ni se vierta producto fuera de los envases).

Resulta importante conocer los diferentes tipos de envasadoras disponibles para yogur, pero es casi universal el empleo de una bomba de desplazamiento positivo o de pistón y de medidores de volumen. Además la mayoría de las envasadoras disponen de

sistemas de marcado de fechas y de unidades de etiquetado, a continuación se exponen las características de algunas máquinas de envasado de yogur.

1) Máquinas Colunio (8,000 envases/hora).

Las especificaciones de esta envasadora son:

- El dispensador de envases consta de cuatro rodillos giratorios que separan los envases antes de dejarlos caer en sus soportes.
- La cabeza de llenado permite envasar yogur de frutas, en envases con capacidades de 85-285 ml.

La máquina está equipada con cuatro líneas de llenado, siendo posible el envasado simultáneo de envases de distinta calidad.

Los envases una vez llenos y cerrados, se extraen de su soporte o se depositan sobre la cinta transportadora ordenadamente.

2) Máquinas Weserhutte de pistas múltiples. Este equipo permite envasar hasta 48000 envases/hora, en la figura 10, se presenta el dispensador automático de los recipientes de plástico preformados, la cabeza de llenado y la unidad de termosellado. Los envases se transfieren automáticamente a unas bandejas especiales y se apilan para su posterior introducción en las cámaras frigoríficas.

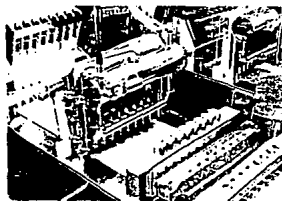


Figura 10. Dispensador automático de envases y bandejas para 8 recipientes de una envasadora Weserhutte. (Tamime, 1992)

## **I) BOMBAS UTILIZADAS EN LA INDUSTRIA DEL YOGUR.**

En las industrias lácteas se utilizan distintos tipos de bombas, en función del uso al que se destinen. Para simplificar las líneas de producción se pueden dividir en las siguientes secciones:

- Sección de manejo y procesado de la leche líquida.
- Sección de obtención y manejo del coágulo.
- Sección de adición/mezcla de frutas y envasado.

Las características físicas y consistencias de los materiales son distintas en cada una de las secciones, por lo que resulta de vital importancia la correcta elección de las bombas, esto resulta especialmente cierto tras la formación del coágulo, ya que cualquier tratamiento mecánico inadecuado puede afectar de forma definitiva a la viscosidad del producto.

### **1) Bombas centrífugas.**

Estas bombas constan básicamente de un motor eléctrico, un rotor encerrado en un compartimiento y una cámara de distribución, el fluido entra en el compartimiento del rotor y se acelera centrífugamente hasta pasar a través de la boquilla del mismo. Como resultado de ello es descargado en la cámara de distribución y sale al exterior de la bomba a través de una boquilla.

Todas las bombas centrífugas se basan en el mismo principio, pero el diseño del rotor puede variar de unas a otras, debiendo tenerse en cuenta distintos factores, principalmente:

- La presión de descarga de la bomba.
- El flujo o velocidad del líquido.
- El grado de cavitación.

- La viscosidad del producto puede determinar pérdidas de presión en la bomba, estas pérdidas son mayores cuanto mayor es la viscosidad de los productos, debido a la mayor fricción de los mismos.

- Si estas pérdidas de presión se manifiestan en la línea de procesado, la velocidad del fluido se puede controlar instalando válvulas de regulación.

La acción centrífuga de estas bombas da lugar a fuerzas de cizalla en el líquido bombeado, por lo que su aplicación se limita al manejo de la leche y el bombeo de agua fría o caliente a través del intercambiador de calor. (Tamime, 1992)

## 2) Bombas de desplazamiento positivo.

Las bombas de desplazamiento positivo se clasifican en tres grupos:

2.1) Bombas de pistones recíprocos

2.2) Bombas con desplazamiento rotatorio

2.3) Otras

Una bomba del primer tipo es efectivamente una bomba de pistones de baja presión y, aunque no se utiliza para el manejo directo del coágulo del yogur, la mayoría de las envasadoras incorporan este diseño básico, de este modo aunque este tipo de bombas puede dar lugar a un ligero efecto de cizalla, la alteración del coágulo es mínima debido a:

-El breve tiempo de contacto del yogur con la bomba.

-La baja temperatura, 10-15°C o menos.

-La ausencia de una presión de empuje.

La bomba de desplazamiento rotatorio es la más utilizada en la fabricación de yogur, el producto se desplaza a través de una cavidad giratoria entre dos rotores entre una pared fija y un rotor. En la figura 11 se presenta una bomba de este tipo. Los dos rotores de cuchillas son adecuados para yogur con partículas sólidas, por ejemplo el de frutas. En la figura 12 se esquematiza el flujo a través de estas bombas, el fluido entra en la bomba por gravedad o por gradiente de presión y, debido a la acción rotatoria de los lóbulos, una porción del yogur queda atrapada entre el lóbulo y la pared de la bomba, siendo transferido lentamente hasta el otro lado.

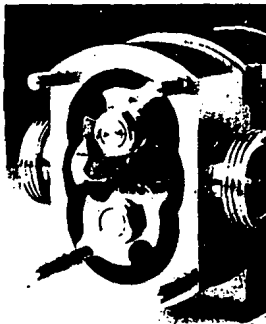


Figura 11. Bomba de desplazamiento positivo de aleta doble. (Tamime, 1990)

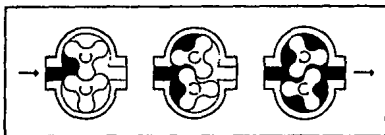


Figura 12 . Esquema del flujo del yogur en una bomba de desplazamiento positivo. (Tamime, 1990)

Las ventajas de estas bombas de desplazamiento positivo son:

- El motor es más barato.
- Pueden trabajar a velocidades altas, aunque no es aconsejable pues esto condiciona la viscosidad del yogur.
- Provocan modificaciones mínimas del flujo.
- Son adecuadas para dispensar grandes volúmenes.
- Son apropiadas para bombear producto muy viscosos.

Una objeción que se hace a este tipo de bombas es que las juntas a presentan fugas, se tienen que las juntas entre las zonas de presión y succión no son tan eficaces como las de las bombas recíprocas, las juntas entre los engranajes rotatorios y la placa también pueden presentar fugas; no obstante una inspección regular de las juntas reduce al mínimo este tipo de problemas.

Otro tipo de bombas de desplazamiento positivo son las bombas de tornillo sinfin (fig. 13), muy utilizada para el bombeo de yogur con frutas, éstas constan de un rotor helicoidal que gira en el interior del estator. El yogur con las frutas avanza a través de la espiral sin experimentar variaciones de volúmen, de esta forma el tratamiento recibido por el yogur resulta mínimo y las partículas de frutas quedan no se afectan gravemente.

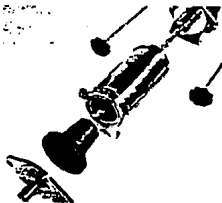


Figura 13. Bomba de tornillo sinfin. (Tamime, 1990)

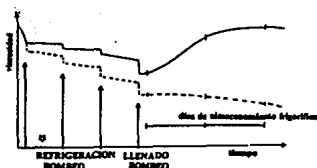


Figura 14. Relación entre la viscosidad aparente y el tratamiento mecánico (fuerza de cizalla). (Tamime, 1990)

Existen pocos estudios que cuantifiquen la pérdida de consistencia debido al paso por los diferentes equipos de proceso, sistemas impulsores y velocidades de flujo. Steenbergen (1971) estudió el efecto del bombeo en la viscosidad aparente (evaluada empíricamente en el embudo de Posthumus) en cuatro bombas de desplazamiento positivo incluyendo rotatorias y de tornillo sin fin; reportó una dependencia de la viscosidad inversamente proporcional a la velocidad de bombeo, concluyendo que en el intervalo de operación de 100-400 rpm se observa una alteración mayor de la estructura del coágulo, sin embargo, estas velocidades no son comunes para los flujos volumétricos industriales, recomendando, emplear bombas de mayor capacidad a menores rpm, lo que implica una inversión inicial mayor. (López, 1992)

### 3) Otros tipos de bombas.

En las líneas de procesado se pueden instalar distintos tipos de bombas para cumplir determinadas funciones por ejemplo:

- La adición "en línea" del cultivo iniciador a la leche para la fabricación del yogur tradicional y/o batido.
- La adición de colorantes y/o aromatizantes líquidos, esencias

naturales o aromatizantes sintéticos a la leche para la fabricación de yogur.

Algunos ejemplos son los siguientes:

### 3.1 Bomba de diafragma.

Este tipo de bomba suele instalarse sobre el tanque que contiene el material a bombear, siendo adecuado para la adición de colorantes o aromatizantes a la leche o al coágulo ya formado, el volúmen dispensado se puede controlar ajustando la frecuencia del bombeo.

Puede comprobarse que existen distintos tipos de bombas que se utilizan en las líneas de fabricación de yogur, dependiendo la elección de la bomba, la cual será ocupada para una determinada función de una serie de factores interrelacionados.

Entre las consideraciones prácticas que es preciso tener presente destacan:

3.1.1) La longitud y diámetro de las conducciones utilizadas en los lados de succión y descarga de la bomba.

3.1.2) El número y tipos de accesorios instalados, por ejemplo, codos piezas en forma de "T", y tipos de válvulas.

3.1.3) El tipo de instrumentos de medida y mezcla utilizados.

3.1.4) Las especificaciones de los fabricantes de los intercambiadores de calor de placas para la refrigeración del coágulo.

3.1.5) Las limitaciones de la línea de procesado, por ejemplo, mezcladores estáticos en la línea, filtros o estructuradores.

3.1.6) Variaciones debidas al propio producto, entre las que se incluyen:

-Concentración de extracto seco total de la leche o yogur.



- Efecto de la cizalla sobre el producto.
- Viscosidad final del yogur.
- Capacidad del producto para soportar elevadas presiones de bombeo.
- Tipo de flujo en el sistema, laminar.
- Pérdidas de presión en el sistema.

Independientemente de las precauciones adoptadas, la manipulación del coágulo siempre determina una disminución de su viscosidad incluyéndose entre las precauciones recomendadas las siguientes: (López, 1992)

- Enriquecer la leche destinada a la fabricación del yogur para obtener un elevado extracto seco total.
- Adicionar estabilizantes (si bien esta prohibido en algunos países).
- Utilizar cultivos iniciadores de buena calidad.
- Recurrir a tanques que no precisen agitación del coágulo.
- Utilizar tanques que no precisen bombas entre el tanque de fermentación y la envasadora, en este tanque la transferencia del coágulo se logra mediante la inyección de aire comprimido en el tanque de fermentación.

### 3.2 BOMBA DE ROTOR SINUSOIDAL

Esta bomba se encuentra clasificada dentro de las llamadas de desplazamiento positivo, consta de un rotor de tipo sinusoidal, construido generalmente en acero inoxidable, combina las ventajas de la bomba de lobulos y cavidades, eliminando los problemas de pulsaciones, el desplazamiento volumétrico es constante y se puede transportar alimentos con sólidos en suspensión.

El rotor de la bomba es un impulsor con dos curvas sinusoidales, que crean cuatro cavidades de flujo simétricamente iguales; el rotor de la bomba se mueve dentro de una cámara, éste se mueve como resultado del desplazamiento de un perno guía colocado sobre un deslizador, dando como resultado el desplazamiento positivo del fluido desde la succión hasta la descarga. El cuerpo del deslizador evita que el fluido que se encuentra del lado de la descarga de la bomba regrese al lado de la succión de la bomba. Todas las partes del rotor se encuentran en contacto, ya sea con la cámara o con el cuerpo del deslizador, asegurando el desplazamiento completo del fluido. Las cavidades de la bomba nunca cambian de tamaño, ni de volumen, eliminando la compresión dentro de la bomba y algún posible daño sobre las partículas. El área volumétrica en la succión siempre es la misma y se tiene una alimentación simultánea en ambos lados del rotor, no existen pulsaciones y el efecto de la viscosidad es despreciable. (López, 1992)

#### **J. ACCESORIOS EN LA LINEA DE PROCESADO**

Los distintos elementos de la línea de procesado de yogur están conectados entre sí por una serie de tuberías y accesorios (codos, "Ts", juntas), válvulas y, a veces, filtros, pudiendo causar al paso por estos elementos alteraciones de la estructura del coágulo del yogur. Estas alteraciones pueden ser consecuencia de: (López, 1992)

##### **1. Tuberías**

Se puede suponer que si el yogur es bombeado a bajas rpm, el flujo por las tuberías será laminar; no obstante el tipo de flujo depende de otros factores, entre los que destacan:

- La longitud y diámetro de las tuberías.
- El número de accesorios.
- La rugosidad de la superficie interna de las tuberías.
- Las variaciones en la velocidad del fluido.

## 2. Accesorios.

La presencia de distintas uniones, válvulas u otros accesorios en la línea de procesado puede modificar el tipo de flujo del yogur y afectar a la viscosidad del producto, las alteraciones de la estructura más importantes tienen lugar en los elementos que determinan una disminución del diámetro de las tuberías, lográndose una mínima alteración de la viscosidad evitando este tipo de piezas.

## 3. Tamices o filtros.

Un defecto que puede presentarse en la elaboración de yogur batido es la aparición de partículas no dispersables, conocidas como "grumos", gránulos, nódulos, cuya naturaleza y origen no se conoce perfectamente. Aunque este defecto puede evitarse llevando a cabo la fermentación de la leche a 42°C exactamente y no alterando el coágulo en absoluto durante la fase de coagulación, también pueden eliminarse los grumos bombeando el coágulo a través de una malla de acero inoxidable. Este tipo de "obstáculo" en la conducción afecta a la viscosidad del yogur pero presenta la ventaja de dar lugar a una estructura suave sin grumos.

#### 1.4 REOLOGIA, CONCEPTOS BASICOS

La reología es la ciencia que estudia los fenómenos de deformación de sólidos y fluidos, bajo la influencia de fuerzas mecánicas, frecuentemente estos fenómenos determinan las propiedades funcionales de los alimentos que intervienen durante los tratamientos (comportamiento mecánico), almacenamiento (estabilidad física) e incluso al momento del consumo (textura). (Skelland, 1967).

Algunos conceptos necesarios para la comprensión de este trabajo son los siguientes.

**Tensión de cizalladura (esfuerzo cortante):** Se define como la relación fuerza/Área, es la fuerza que aplicada a un área determinada del fluido, le causa a este alguna deformación.

**Deformación:** Efecto causado sobre un cuerpo o fluido cuando sobre este actúa una fuerza.

**Velocidad de cizallamiento:** Es la magnitud de la deformación dividida por el tiempo en que tarda en producirse.

#### 1.5 COMPORTAMIENTO REOLOGICO DE LOS DIFERENTES FLUIDOS ALIMENTICIOS. (Sherman, 1988; Tanner, 1985)

##### A) Fluido Newtoniano

El fluido Newtoniano se define como aquel en que la representación de la tensión de cizalladura (esfuerzo cortante) en función de la velocidad de cizallamiento es una línea recta. A la constante de proporcionalidad se le denomina coeficiente de viscosidad y se define como: La resistencia friccional que un fluido en movimiento opone a un esfuerzo cortante.

El flujo de un líquido Newtoniano suele ilustrarse gráficamente representado por  $\tau_{01}$ , o el coeficiente de viscosidad  $\mu$ , en función

de la velocidad de cizallamiento (intensidad de cizalladura).

Como se observa en la figura 15 la pendiente de las rectas así obtenidas dependen de la viscosidad del fluido en estudio; de la representación de la figura 15 se deduce que la viscosidad es una constante. Para saber si un líquido es, o no, Newtoniano basta con observar si al duplicarse el esfuerzo cortante se duplica también la velocidad de cizallamiento; si esto no sucede, el fluido no es Newtoniano.

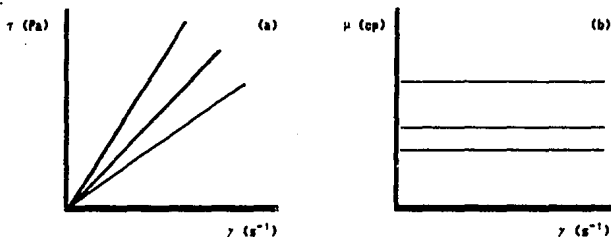


Figura 15. a) Representación gráfica del esfuerzo cortante ( $\tau$ ) en función de la velocidad de cizallamiento ( $\dot{\gamma}$ ).  
b) Representación del coeficiente de viscosidad ( $\mu$ ) en función de  $\dot{\gamma}$ .

Así mismo el coeficiente de viscosidad depende siempre de la temperatura, por lo que al expresar algún valor de éste coeficiente deberá hacerse referencia de la temperatura a la cual se realizó dicha evaluación.

#### B) Fluidos No Newtonianos

Cuando no hay proporcionalidad entre la velocidad cizallamiento y el esfuerzo cortante, estamos hablando de fluidos no

Newtonianos.

Los fluidos no-Newtonianos se pueden clasificar en independientes o dependientes del tiempo de cizallamiento.

Fluidos independientes del tiempo (Glicksman, 1969)

Un fluido no-Newtoniano es independiente del tiempo de cizallamiento, si el esfuerzo de cizalla a cualquier velocidad de cizalla es constante con el tiempo, es decir, las propiedades del fluido dependen únicamente de la magnitud del esfuerzo cortante impuesto o a la velocidad de cizallamiento y no de la duración de la deformación. El tipo de comportamiento de fluidos independientes del tiempo se muestran en la figura 16.

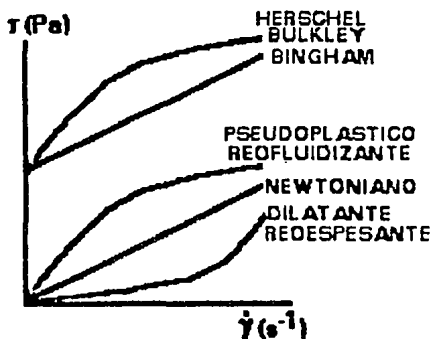


Figura 16. Curva de comportamiento reológico.

Estos fluidos se clasifican en:

Fluidos sin punto de cedencia

a) Pseudoplásticos (reofluidizantes), son aquellos en que la viscosidad disminuye de manera logarítmica al incrementarse la

velocidad de cizalla, la disminución de la viscosidad ocurre como resultado del alineamiento molecular en el interior del fluido.

Las mediciones de viscosidad aparente para éste tipo de fluidos son reproducibles y sólo dependen de la velocidad de cizalla y la temperatura.

b) Dilatantes (reoespesantes), en estos tipos de fluidos la viscosidad aparente aumenta al incrementarse la velocidad de cizalla, debido a que el medio dispersante no es lo suficiente para cubrir todas las partículas.

Fluidos con punto de cedencia (Glicksman, 1969)

Aquellos que obedecen al modelo de Herschel Bulkley, que presenta un punto de cedencia y después del cual presenta un comportamiento similar al del fluido pseudoplástico, es decir que la relación entre el esfuerzo cortante y la velocidad de cizalla es de tipo logarítmica.

Otro modelo es el plástico de Bingham, que después del punto de cedencia presenta una relación lineal entre el esfuerzo cortante y la velocidad de cizalla, como en los fluidos Newtonianos.

Fluidos dependientes del tiempo

Un fluido no-Newtoniano dependiente del tiempo de cizallamiento, es aquel en el cual el esfuerzo de cizalla cambia con el tiempo de cizallamiento, es otras palabras, la viscosidad aparente depende de la magnitud de la deformación del líquido y del tiempo que dure la deformación.

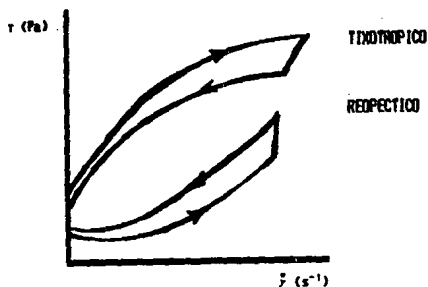


Figura 17. Fluidos dependientes del tiempo de cizallamiento.

Estos fluidos se clasifican en dos grupos:

**Tixotrópicos.**- La tixotropía se caracteriza por la disminución de la viscosidad aparente con respecto al tiempo, a una velocidad de cizalla dada, la viscosidad aparente inicial solamente se restaura después de un período de recuperación.

**Reopécticos.**- En estos fluidos la viscosidad aparente se incrementa con el tiempo de cizallamiento, a una velocidad de cizalla dada, bajo condiciones isotérmicas.

#### C) **Medidas reológicas** (Sestak, 1988)

En la evaluación de las propiedades reológicas del yogur, se pueden realizar dos clases de medidas reológicas:

1) **Medidas fundamentales**, que consisten en determinar las



magnitudes definidas, como lo son, propiedades viscoelásticas, coeficientes de viscosidad, umbral de esfuerzo cortante, tiempo de relajación.

2) Medidas indirectas de evaluación de consistencia, sin significancia física fundamental.

#### C.1) Medidas Fundamentales.

Se han utilizado:

Viscosímetros de tipo tubo capilar.

En estos instrumentos se mide la velocidad de flujo de líquidos en régimen laminar en un tubo de diámetro pequeño. Aquí el esfuerzo cortante depende del gradiente de presión y de las características del tubo, y la velocidad de cizallamiento se mide a partir de la velocidad de flujo.

Viscosímetros a rotacionales.

Estos viscosímetros también han sido muy empleando en la caracterización del yogur. Usualmente, estos viscosímetros a rotación están formados por dos cilindros coaxiales; el fluido a estudiar se coloca entre ambos, se deja fijo el cilindro externo y se hace girar el interno; se mide la resistencia que ofrece al motor. Como siempre, las medidas deben efectuarse en régimen laminar y con una regulación muy exacta de la temperatura. A parte de estos resultados se obtiene la curva de flujo, la cual al modelizar se obtienen los parámetros reológicos que lo definen.

Algunos viscosímetros rotacionales son muy precisos y permiten además estudiar los fluidos no Newtonianos.

## C.2) Medidas empíricas.

A continuación se muestran los instrumentos utilizados en la evaluación de la consistencia del yogur:

### Penetrómetros.

Se puede mencionar una gran variedad de penetrómetros, provistos de diversos punzones que trabajan a peso y velocidad constantes, por ejemplo; un dinamómetro da una medida de la resistencia que ofrece el yogur a la penetración de punzones, láminas, parrillas, es decir a fuerzas de compresión y cizallamiento o corte.

### Consistómetros.

Se ha propuesto la determinación de la consistencia en función del tiempo que tarda una muestra de volumen conocido en fluir por un plano inclinado, como por ejemplo el "plummet" (fig. 18 (a)).

Otro método aplicable es la determinación de la velocidad con que fluye el yogur a través de embudos con un orificio de un determinado tamaño; con el embudo simple de Posthumus (que también se esquematiza en la figura 18 (c)) la consistencia del producto se determina en función del tiempo que tarda la superficie del yogur en pasar entre los puntos de partida y la aguja central.

Otra técnica consiste en la determinación del tiempo necesario para que una esfera metálica de tamaño estándar descienda una cierta profundidad en el seno de un volumen dado de yogur, en la figura 19 se muestra el esquema de un aparato basado en este principio.

En Suecia las Asociaciones lecheras jugaron un papel esencial en el desarrollo del aparato que se muestra en la figura 19.

En el embudo propuesto, se llena hasta el borde con la salida cerrada, a continuación se determina el tiempo que tarda el líquido en alcanzar la marca del orificio de descarga. Para el yogur batido se recomienda un orificio de salida de 3 mm.

Una de las dificultades de estas determinaciones surge por la complejidad de la textura de los alimentos. Sin embargo, es común encontrar una buena correlación entre estas medidas y los resultados de los equipos de degustación lo que confirma el interés de las medidas empíricas rápidas.

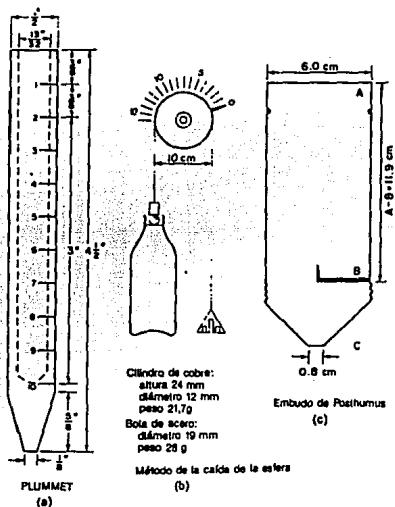


Figura 18. Esquema de diversos dispositivos para examinar las características físicas del yogur.

a) El PLUMMET para la determinación del cuerpo de las cremas fermentadas, puede ser también utilizado para el yogur.

b) Esquema de un "viscosímetro de bola" utilizado para determinar la firmeza del yogur.

c) Embudo de Posthumus.

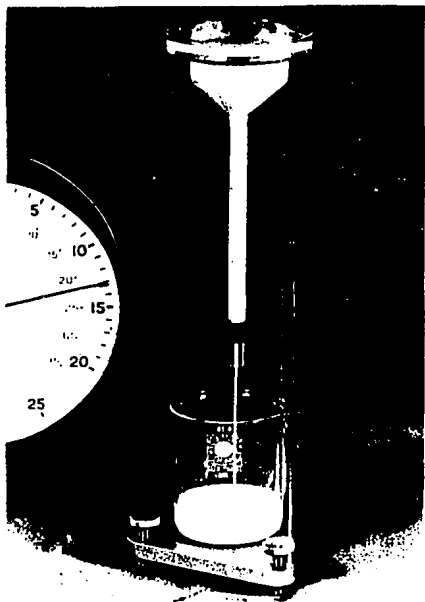


Figura 19. Uno de los sistemas de embudo empleados para determinar la consistencia de yogur batido.

## 1.6 REOLOGIA DEL YOGUR

El yogur es un producto que posee una estructura molecular muy compleja, ya que esta formada básicamente por un gel de caseína ligeramente proteolisada, su consistencia puede estar influida por largas cadenas de polisacáridos formados por las cepas de *Lactobacillus bulgaricus*.

Los yogures exhiben un comportamiento reológico complejo cuando son sometidos al cizallamiento, son fluidos dependientes del tiempo, y por lo tanto los parámetros reológicos no son nada fáciles de obtener, y su evaluación no puede realizarse por cualquier método simple.

Existen varios trabajos de investigación relacionados con los factores que pueden influir sobre las propiedades reológicas del yogur; en cada uno de ellos se han utilizado diferentes técnicas y se han evaluado distintos parámetros, tales como: viscosidad aparente, rigidez del coágulo, firmeza, textura y consistencia.

La viscosidad o consistencia representa para el yogur una variable crítica de control que es necesario tener en cuenta y que el consumidor puede apreciar con facilidad, por lo que a nivel industrial se necesita contar con una técnica sencilla, que ofrezca resultados rápidos, precisos y confiables, siendo la determinación de la viscosidad aparente la respuesta a esta necesidad, ésta se puede evaluar mediante diferentes viscosímetros, teniendo como limitantes que todas las evaluaciones se realicen mediante un estricto control de:

- Temperatura
- Tiempo que se somete el producto al cizallamiento
- Velocidad de cizallamiento a la cual se realiza esta

determinación.

El comportamiento reológico del yogur varia significativamente pues la obtención de los parámetros reológicos está condicionada a su proceso de elaboración, entre éstas variables encontramos al porcentaje de sólidos totales, acidez, pH y porcentaje de grasa presente en el producto. (De Hombre, 1982)

Inclusive los parámetros reológicos varían con la calidad de la materia prima y por consiguiente con el día de elaboración, así mismo encontramos distintos procesos de elaboración para el yogur con frutas dependiendo de las diferentes marcas en el mercado.

El comportamiento del yogur se ha descrito por algunos modelos reológicos tales como:

**Pseudoplásticos:**

Con un valor del índice de comportamiento al flujo ( $n$ ) menor a la unidad (0.33-0.40), y un valor del índice de consistencia ( $k$ ) de (11.1-20.1 dinas  $\text{sn}/\text{cm}^2$ ), utilizando viscosímetros de cilindros concéntricos Haake Rotovisco RV1, con intervalos de velocidad de deformación entre 0-1000 1/seg, todo esto a una temperatura de 25°C. (De Hombre, 1982)

Es importante remarcar que para la evaluación de las constantes reológicas el yogur se sometió a un tratamiento mecánico que provocó el paso de semisólido a líquido, por lo que líquido no presentó dependencia al tiempo de cizallamiento ya que en estas condiciones la velocidad de destrucción de estructura fué similar a la velocidad de reestructuración.

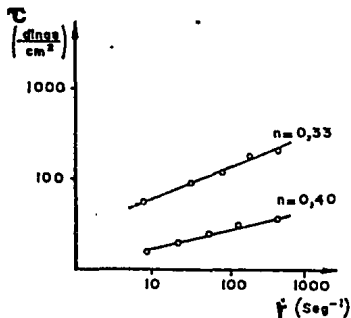


Figura 20. Reogramas del yogur batido, modelo pseudoplástico.

Herschel Bulkley:

Con valores del índice de comportamiento al flujo ( $n$ ) entre 0.201-0.531, valores del índice de consistencia ( $k$ ) entre 1.43-14.6 (dinas  $\text{sn} / \text{cm}^2$ ), valores de esfuerzo cortante inicial entre 6.94-11.9 (Pa), utilizando un viscosímetro Rotovisco-Haake operado a una velocidad de deformación entre 0-500 1/seg, todo esto fue evaluado a una temperatura de 10°C. (Ramaswamy, 1991)

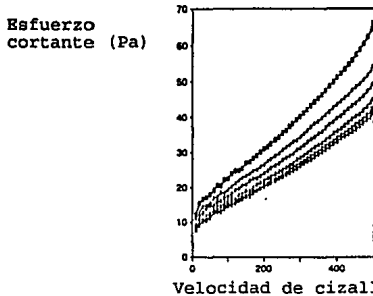


Figura 21. Reograma del yogur batido, modelo Herschel Bulkley.

Como ya se mencionó también la influencia de la temperatura sobre los parámetros reológicos es muy significativa, de aquí que para cualquier reporte de la evaluación reológica de algún fluido deba indicarse la temperatura a la cual se realizó la evaluación, lo anterior se puede comprobar mediante algunas experimentaciones realizadas al respecto, por ejemplo, en la tabla siguiente se muestran las constantes reológicas de un yogur comercial, evaluadas a diferentes temperaturas, utilizando un Rotovisco Haake con velocidades de cizallamiento constantes, el tratamiento matemático se aplicó a los datos obtenidos después de que la muestra ya no presentó tixotropía.

TABLA 2. CONSTANTES REOLOGICAS

Temperatura (°C)	Pto de cedencia (Pa)	Indices		
		Consistencia (dinas s <sup>M</sup> /cm <sup>2</sup> )	Comportamiento al flujo	Constante de regresion
10	11.9	14.6	0.207	0.98
15	7.6	9.6	0.265	0.98
20	4.9	5.5	0.335	0.98
25	3.5	3.0	0.400	0.96

Fuente: Ramaswamy, 1998.

En la tabla anterior se observan las relaciones que presenta la temperatura con respecto a distintas constantes reológicas; los valores del esfuerzo cortante inicial (punto de cedencia) y de la consistencia del yogur son inversamente proporcionales a la temperatura a que estos son evaluados, en cambio el índice de comportamiento al flujo es directamente proporcional a la temperatura de su evaluación.

En 1984 de Labropoulos determinó la viscosidad aparente en yogures elaborados con leche sometida a diferentes tratamientos



térmicos, controlando estrictamente las condiciones de homogenización de la leche.

Los métodos estudiados fueron:

- a) método continuo con un tubo helicoidal con un tiempo de residencia de 2.2 a 3.3 segundos, la temperatura en este tratamiento fue de 149°C, (UHT).
- b) método discontinuo, a temperatura de 63 y 82°C durante 30 minutos.

En ambos métodos la concentración del cultivo iniciador fué del 3%, la temperatura de inoculación 42°C, y la acidez final de la fermentación 0.93 % de ácido láctico, ambas muestras se guardaron en refrigeración (4°C) de 12 a 48 horas, después de este almacenamiento se evaluaron, se utilizó un Haake Rotovisco, modelo RV-3 para la evaluación de la viscosidad aparente, a una velocidad de cizallamiento igual a 29.4 1/segundos, la temperatura de evaluación fué de 4°C.

Para las muestras tratada a 149°C durante 2.2 y 3.3 segundos, el valor de viscosidad aparente fue de 2.3 y 2.7 cP respectivamente.

Para la muestra tratada a 63 y 82°C durante 30 minutos el valor de viscosidad aparente fue de 1.9 y 2.0 cP respectivamente.

La viscosidad aparente de leche no tratada fue de 1.7 cP.

La viscosidad del agua es de 1.3 cP.

Los resultados anteriores podemos observarlos en la siguiente figura:

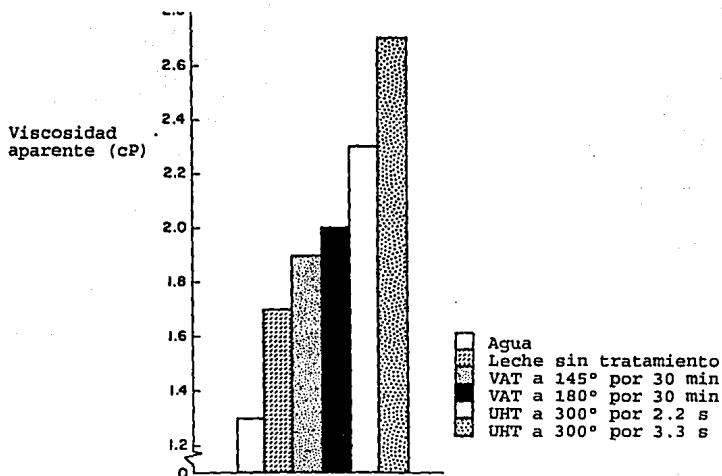


Figura 22. Comparación de viscosidad aparente del yogur con frutas elaborado con leche ultrapasteurizada y leche con un tratamiento térmico inferior, evaluaciones realizadas a una velocidad de cizallamiento de 29.4 1/seg y a una temperatura de 4°C.

Fuente: Labropoulos, 1984

# CAPITULO 2

## DESARROLLO EXPERIMENTAL

- 2.1 Evaluación de la pérdida de consistencia que sufre el yogur con frutas durante su proceso de elaboración*
- 2.2 Determinación de la relación existente entre las condiciones de operación del sistema de bombeo (r.p.m.) y la pérdida de consistencia del producto durante su transporte*
- 2.3 Obtención de un sistema modelo elaborado a base de hidrocoloides que presente un comportamiento reológico análogo al yogur con frutas*
- 2.4 Evaluación de la pérdida de consistencia del sistema modelo en diferentes bombas de desplazamiento positivo*
- 2.5 Comparación del daño causado a la consistencia de la base de yogur por dos diferentes bombas de desplazamiento positivo*

## DESARROLLO EXPERIMENTAL

Este estudio se dividió en cinco etapas que se describen a continuación:

Etapla 1. Evaluación de las propiedades fisicoquímicas del yogur con el propósito de verificar que se encuentran dentro del estándar de calidad comercial.

Evaluación de los parámetros reológicos del yogur con frutas durante su proceso de elaboración, con lo cual se pretendió adquirir un conocimiento real de las condiciones de proceso de este producto, e identificarlo reológicamente, ya que en etapas posteriores fueron de utilidad los resultados aquí obtenidos

Identificación de los puntos críticos de dicho proceso, en donde la consistencia del yogur se ve disminuida drásticamente, para ésto fué necesario la utilización de un método que permitiera evaluar la pérdida de consistencia del yogur con frutas.

Etapla 2. Determinación de la relación existente entre el porcentaje de pérdida de consistencia y las condiciones de operación del sistema de bombeo.

Etapla 3. Obtención de un sistema modelo empírico a base de hidrocoloides, el cual presentó un comportamiento reológico análogo al yogur con frutas.

Etapla 4. Evaluación de la pérdida de consistencia del sistema modelo en diferentes bombas de desplazamiento positivo, utilizando el sistema de flujo a nivel planta piloto.

Etapla 5. Comparación de la bomba que a nivel piloto causa el menor daño a la consistencia del modelo y la utilizada a nivel industrial, además en esta experimentación se contrastaron los resultados con yogur, para conocer la veracidad de los resultados

obtenidos.

Con los datos obtenidos en esta última etapa se realizaron propuestas relacionadas con las condiciones de transporte y sistema de bombeo para utilizarse en el proceso de elaboración de un yogur con frutas a nivel industrial.

En la siguiente figura se presenta el cuadro metodológico en donde se relacionan todas las etapas por medio de conectores.

## CUADRO METODOLOGICO

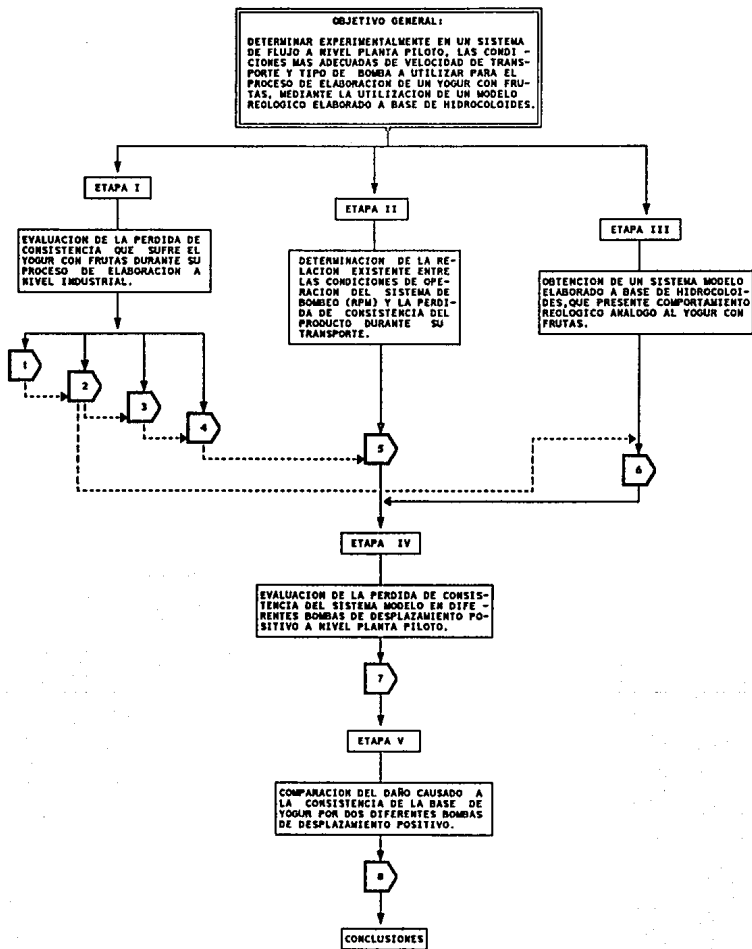
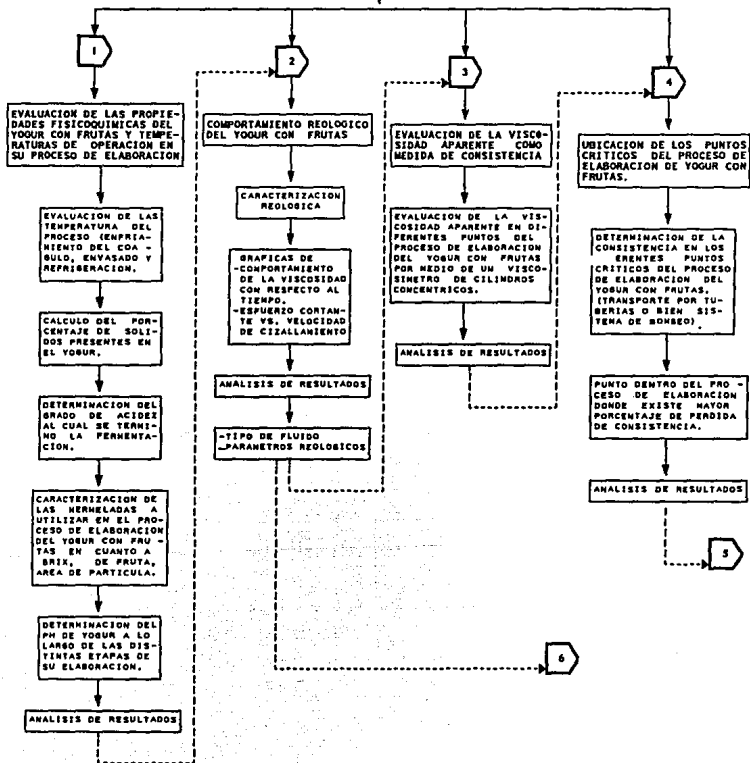
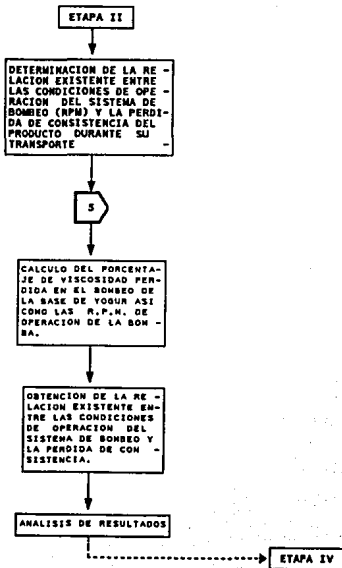


FIGURA 23. CUADRO METODOLOGICO

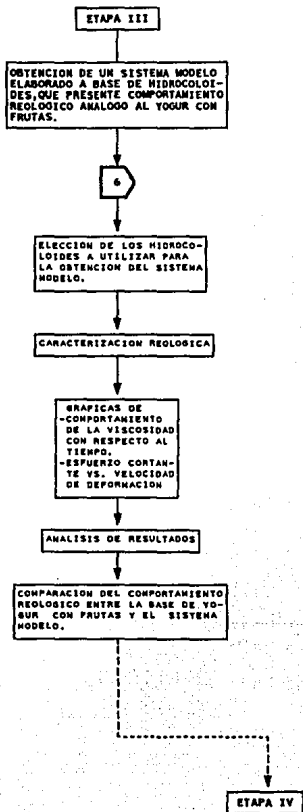
ETAPA I

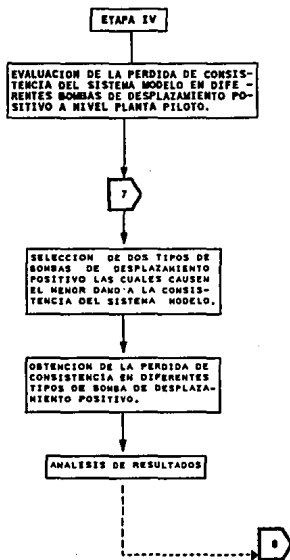
EVALUACION DE LA PERDIDA DE CONSISTENCIA QUE SUFRE EL YOGUR CON FRUTAS DURANTE SU PROCESO DE ELABORACION A NIVEL INDUSTRIAL.

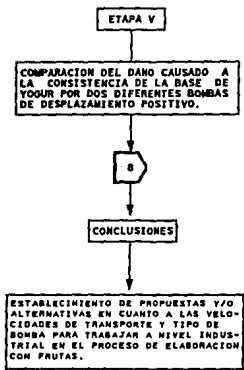












## ETAPA 1

### 2.1 EVALUACION DE LA PERDIDA DE CONSISTENCIA QUE SUFRE EL YOGUR CON FRUTAS DURANTE SU PROCESO DE ELABORACION A NIVEL INDUSTRIAL.

#### 2.1.1 EVALUACION DE LAS PROPIEDADES FISICOQUIMICAS DEL YOGUR CON FRUTAS Y TEMPERATURAS DE OPERACION EN SU PROCESO DE ELABORACION.

##### OBJETIVO

Evaluación de las propiedades fisicoquímicas de un yogur con frutas a lo largo de su proceso de elaboración.

##### JUSTIFICACION

Para llevar a cabo la experimentación es necesario fijar un intervalo de trabajo de las propiedades fisicoquímicas del yogur a nivel industrial, el cual refleje las condiciones normales de fabricación para este producto, con esto tendrá la certeza de que cualquier cambio de consistencia del yogur sea debida únicamente al transporte por las tuberías o al efecto de las bombas y no por la influencia de algunos de los siguientes factores: temperaturas de proceso, sólidos totales, acidez total valorable, pH, características fisicoquímicas de las mermeladas.

##### MATERIALES Y METODOS

###### Temperaturas de proceso

Estas temperaturas se determinaron directamente en cada uno de los puntos mencionados, su medición se realizó con un termómetro digital.

###### Sólidos totales

Esta determinación se realizó con un horno de microondas Marca CEM Mod. Avc 80 operado a un nivel de potencia de 50 y en un intervalo de tiempo de 5 minutos.

###### Acidez valorable total

Se llevó a cabo mediante la titulación de una muestra de yogur utilizando NaOH 0.11 N, con la finalidad de neutralizar el ácido láctico presente en la muestra a evaluar, utilizándose

fenoftaleína como indicador.

#### Características fisicoquímicas de las mermeladas

La determinación del área de los trozos de fruta y porcentaje de fruta presente en las mermeladas se llevarón a cabo vertiendo una cantidad de muestra conocida, previamente pesada sobre un tamiz malla 35; se lavó la muestra con agua corriente a temperatura ambiente hasta eliminar totalmente el jarabe, dejando únicamente los trozos de fruta; se procedió a pesar la fracción de fruta contenida en la mermelada y se calculó el porcentaje de fruta presente en la muestra evaluada. Esta misma fruta se colocó en una mesa, se extendió la muestra y se procedió a realizar la determinación del área de partícula midiendo con una regla cada uno de los trozos de fruta de la muestra analizada.

#### °Brix

La determinación de °Brix se realizó con un refractómetro, el cual fue previamente limpiado con agua para después colocar la muestra y finalmente registrar la lectura indicada por el equipo.

#### pH

Se realizó la determinación con un potenciómetro Beckman M-1, el cual se calibró previamente con soluciones buffer de pH 4 y pH 7, posteriormente la muestra a evaluar se puso en contacto con el electrodo del equipo y se esperó hasta que la lectura se estabilizara para tener la certeza de que ésta lectura fuera la indicada.

ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA

## 2.1.2 COMPORTAMIENTO REOLOGICO DEL YOGUR CON FRUTAS.

### OBJETIVO

Evaluación del comportamiento reológico del yogur con frutas a lo largo de su proceso de elaboración.

### JUSTIFICACION

Siendo uno de los objetivos fundamentales de este trabajo el evaluar la pérdida de consistencia que sufre el yogur con frutas durante su transporte, fué necesario determinar las propiedades y el comportamiento reológico de este fluido en los diferentes puntos de su proceso de elaboración.

### FLUIDO

Base para yogur  
Yogur con frutas

### VARIABLES

Variable independiente= Velocidad de cizalla (17 a 355 1/seg)  
Variable dependiente= Esfuerzo cortante

#### Parámetros constantes:

Temperatura de medición  
Volumen de la muestra  
Cilindro de medición

Total de muestras analizadas 15.

### MATERIALES Y METODOS

Debido a que el viscosímetro es una herramienta fundamental para el desarrollo experimental de este trabajo fué necesario presentar una metodología para la obtención de los distintos parámetros reológicos a partir de una caracterización reológica, se describe la realizada en un viscosímetro de cilindros concéntricos (Rheomat 108), el cual se empleó en el presente trabajo.

#### Caracterización reológica en viscosímetro Rheomat.

Viscosímetro de cilindros concéntricos, Contravés modelo 108, con 8 velocidades de cizallamiento que abarcan de 17 hasta 355 1/seg.

1) Selección en la carátula del equipo del parámetro de viscosidad, cuerpo de medición y cilindro externo.

2) Colocación de la muestra en el equipo.

3) Registrar los valores de esfuerzo cortante en función de la velocidad de cizallamiento, con la finalidad de determinar si el fluido es o no dependiente del tiempo de cizallamiento, se deben registrar los valores del esfuerzo cortante cuando se incrementa la velocidad de cizallamiento de la 1 hasta la 8 y cuando disminuye de la velocidad 8 hasta la velocidad 1.

4) Trazar una gráfica de los datos de esfuerzo cortante en función de la velocidad de cizallamiento de las curvas de ascenso y descenso, si se forma un bucle de histéresis, se dice que el fluido es dependiente del tiempo de cizallamiento, si no es así, si ambas curvas coinciden y se sobreponen, entonces el fluido es independiente del tiempo de cizallamiento. Cuando el fluido presenta una dependencia con respecto al tiempo de cizallamiento, este se somete a una velocidad de cizallamiento constante registrándose los valores de viscosidad a intervalos de tiempo bien definidos, hasta alcanzar el equilibrio entre el grado de degradación que sufre el fluido y el nivel de recuperación del mismo, es decir hasta que la viscosidad aparente sea una constante; con estos datos se traza una grafica en coordenadas cartesianas del comportamiento de la viscosidad aparente con respecto al tiempo de cizallamiento.

5) Una vez que la viscosidad aparente permanece constante, se procede a registrar los valores de esfuerzo cortante en función de la velocidad de cizallamiento, (para cada una de las 8 velocidades con las que cuenta el equipo); se trazan las gráficas

de los datos en coordenadas cartesianas con la finalidad de determinar si existe o no un punto de cedencia ( $\tau_0$ ), esta gráfica se debe realizar tanto para fluidos independientes del tiempo de cizallamiento, como para los que si dependen del tiempo de cizallamiento, una vez que hayan alcanzado el equilibrio antes mencionado; la pendiente de esta gráfica es la viscosidad aparente, la ordenada al origen representa al esfuerzo cortante inicial, y por último se obtiene el coeficiente de regresión  $r$ .

6) El siguiente tratamiento consiste en iterar los valores de  $\tau_0$ , sustituyéndolos en la fórmula de  $\log(\tau - \tau_0)$ , al resultado de este logaritmo junto con el del logaritmo de la velocidad de cizallamiento, se les aplica una regresión lineal ya que se tienen 8 pares de datos, se calcula el coeficiente de regresión, se suponen otros valores de  $\tau_0$  hasta obtener el coeficiente de regresión más alto, el valor supuesto de  $\tau_0$  en este caso será el que realmente presente el fluido en estudio, de esta misma regresión lineal, la pendiente obtenida representa el índice de comportamiento al flujo ( $n$ ), y el antilogaritmo de la ordenada al origen, representa el índice de consistencia ( $k$ ).

En el caso de que el fluido no presente  $\tau_0$  se traza una gráfica del logaritmo del esfuerzo cortante en función del logaritmo de la velocidad de cizallamiento, la pendiente será el índice de comportamiento al flujo ( $n$ ), el antilogaritmo de la ordenada al origen representa el índice de consistencia, así mismo se calcula el coeficiente de regresión de este tratamiento.

Siendo el valor del coeficiente de regresión el indicativo para elegir el tipo de modelo reológico el cual rige el comportamiento



del fluido evaluado.

a) Si el coeficiente de regresión es mayor al trazar la gráfica del esfuerzo cortante en función de la velocidad de cizallamiento, se trata de un fluido cuyo comportamiento sigue el modelo de Bingham.

b) Si el coeficiente de regresión es mayor cuando se traza la gráfica del logaritmo del esfuerzo cortante en función del logaritmo de la velocidad de cizallamiento, se trata de un fluido cuyo comportamiento es del tipo pseudoplástico.

c) Si el coeficiente de regresión es mayor al trazar la gráfica del logaritmo del esfuerzo cortante menos esfuerzo cortante inicial en función del logaritmo de la velocidad de cizallamiento se dice que el fluido sigue un comportamiento de acuerdo al modelo descrito como Herschel Bulkley.

En el caso de la evaluación de la base de yogur, ésta se tomó directamente de la línea de proceso; el yogur con frutas se evaluó un día después de su elaboración, durante este tiempo se almacenó a 4°C, ya que esta temperatura es la ideal en los sistemas frigoríficos de almacenamiento para este producto. (López 1992).

Para el yogur con frutas se retiraron los trozos de fruta antes de la caracterización reológica.

Las determinaciones de los parámetros reológicos y comportamiento al flujo se realizaron a una temperatura constante de 10°C.

### 2.1.3 EVALUACION DE LA VISCOSIDAD APARENTE COMO MEDIDA DE CONSISTENCIA.

La mayoría de los resultados reportados anteriormente para la evaluación de la consistencia del yogur han sido únicamente de productos sometidos a una deformación previa, con lo cual se induce el rompimiento de la estructura del gel y se inhibe el efecto tixotrópico durante las mediciones reológicas, para llevar a cabo el presente trabajo es importante contar con una la evaluación de la consistencia del yogur que permita ser determinada sin ser necesaria una deformación previa, además de ser repetitiva y confiable, pero que este fundamentada reológica y estadísticamente.

#### OBJETIVO

Aplicación de un método de evaluación de la consistencia del yogur en función de la viscosidad aparente del mismo.

#### JUSTIFICACION

El cálculo de las constantes reológicas se determinó a partir de tratamientos matemáticos, sin tomar en cuenta el tiempo que debemos scmeter al fluido a una deformación de su estructura interna (en el caso de que exista dependencia con respecto al tiempo de cizallamiento) lo cual es sumamente laborioso. La evaluación de la consistencia y el cálculo de las constantes reológicas no puede realizarse por cualquier método simple, ya que el comportamiento reológico del yogur es demasiado complejo, en ambos casos se degrada totalmente la muestra para poder ser evaluadas, lo cual no es recomendable ya que si se pretende determinar el daño que sufre la consistencia del yogur a través de su proceso de elaboración.

En el caso de una caracterización reológica se debe llegar a un equilibrio entre el grado de degradación de la estructura del fluido y el nivel de recuperación del mismo, y en el caso de la determinación de la consistencia por el embudo de Posthumus es poco práctica llevarla a cabo, además de estar sujeta a un sinfín de variables.

Debido a lo anterior surgió la necesidad de poder determinar alguna constante reológica que fuera fácil, rápida, y repetitiva en su evaluación, la cual sirva de control dentro del proceso de elaboración del yogur.

#### MATERIALES Y METODOS

Para que el método de evaluación de la viscosidad aparente haya sido considerado factible para determinar una medida de la consistencia, éste debió de cumplir ciertos requisitos, que debieron estar fundamentados estadísticamente, siendo los siguientes:

- 1) Debe ser un método de evaluación exacto.
- 2) Debe ser un método repetitivo y confiable.

Lo anterior se logró mediante la aplicación de análisis estadísticos, como el de la prueba *t* de Student, así como el cálculo de los valores medios y la desviación estándar de los mismos.

Se utilizó un viscosímetro Rheomat modelo 108, con el cuerpo de medición número 2, durante un tiempo de cizallamiento de 10 seg, la velocidad de cizallamiento fue de 98.16 1/seg, la temperatura de evaluación fué de 10°C.

Las muestras se recolectaron dentro del proceso de elaboración del yogur con frutas y éstas son de base de yogur, es decir el

producto resultante de la fermentación y que no ha sido enviado hacia el mezclado con la fruta; las muestras no sufrieron ninguna clase de almacenamiento ya que fueron evaluadas inmediatamente.

#### 2.1.4 UBICACION DE LOS PUNTOS CRITICOS DEL PROCESO DE ELABORACION DEL YOGUR CON FRUTAS.

Los puntos considerados como críticos en el proceso de elaboración del yogur con frutas son aquellos en los que la consistencia del fluido (viscosidad aparente), ya sea como base del yogur o como producto terminado, se ve alterada.

Los valores de consistencia reportados se obtuvieron mediante la evaluación de la viscosidad aparente.

#### OBJETIVO

Determinación de los puntos críticos del proceso donde se ve afectada notablemente la consistencia del yogur.

#### JUSTIFICACION

Es necesario precisar en que etapa del proceso de elaboración del yogur con frutas se lleva a cabo la degradación de su consistencia (viscosidad aparente), ya que en condiciones normales de elaboración, es decir, control estricto de variables de proceso se obtiene comúnmente un producto con baja consistencia, lo cual hace pensar que la causa de ello debe ser alguna variable de operación; y controlando esta variable es posible obtener un yogur con frutas con mayor consistencia.

#### MATERIALES Y METODOS

Para cumplir con el objetivo planteado fue necesario en primer lugar, realizar un análisis del proceso de elaboración del yogur con frutas, para definir los puntos en donde se vea alterada la consistencia del yogur, ya sea por cambios debidos al mismo proceso o bien al transporte por tuberías y sistema de bombeo.

La evaluación de la consistencia a través de la viscosidad aparente se realizó a cada una de las muestras tomadas en los puntos considerados como críticos a lo largo del proceso de elaboración del yogur con frutas; la muestra obtenida se evaluó

inmediatamente después de haber sido tomada; la toma de muestras se llevó a cabo mediante muestreadores especiales específicamente localizados dentro del proceso.

Los valores de viscosidad aparente fueron evaluados en un viscosímetro de cilindros concéntricos Rheomat modelo 108, utilizando el cilindro de medición # 2, a una temperatura de 10°C, y se logró con un baño térmico Brookfield EX-200; la velocidad de cizallamiento fué de 98.16 1/seg y el tiempo de cizalla de 10 seg.

El porcentaje de viscosidad se obtuvo mediante las diferencias entre los valores de este parámetro en los distintos puntos del proceso.

## ETAPA 2

### 2.2 DETERMINACION DE LA RELACION EXISTENTE ENTRE LAS CONDICIONES DE OPERACION DEL SISTEMA DE BOMBEO (r.p.m.) Y LA PERDIDA DE CONSISTENCIA DEL PRODUCTO DURANTE SU TRANSPORTE.

Debido a que el sistema de bombeo utilizado para el transporte del yogur durante su elaboración afecta notablemente a la consistencia final del producto, es necesario fijar condiciones más adecuadas para este transporte.

#### OBJETIVO

Obtener experimentalmente la relación que existe entre la pérdida de consistencia del producto y las r.p.m. de operación del sistema de bombeo, durante el proceso de elaboración del yogur con frutas.

#### JUSTIFICACION

En este trabajo se tiene planteado la formulación de propuestas y/o alternativas para el sistema de bombeo utilizado en la elaboración del yogur con frutas; por lo que es necesario precisar las limitantes que presenta el proceso actual, con la finalidad de realizar sugerencias viables y fácilmente adaptables a dicho proceso de elaboración.

El daño provocado por el sistema de bombeo a la consistencia del yogur es notable, por lo que es fundamental determinar este factor y su relación que guarda con las condiciones normales de operación del sistema de bombeo en la elaboración del yogur con frutas.

#### MATERIALES. Y METODOS

La evaluación de la consistencia se realizó con la ayuda del viscosímetro Rheomat modelo 108, utilizando el método A citado en la etapa 2.1.3.

La determinación de las r.p.m. de operación de la bomba de tornillo se realizó con un tacómetro digital, justo en el momento en que se tomó la muestra.

El porcentaje de pérdida de viscosidad se determinó mediante la diferencia entre los valores de consistencia obtenidos en la succión y descarga de la bomba del proceso.

Es necesario aclarar que el fluido en este punto del proceso es base de yogur, ya que aún no se ha mezclado con las mermeladas, por lo que su consistencia en este punto no se ve influenciada por la características fisicoquímicas de las mismas.



### ETAPA 3

#### 2.3 OBTENCIÓN DE UN SISTEMA MODELO ELABORADO A BASE DE HIDROCOLOIDES QUE PRESENTE UN COMPORTAMIENTO REOLÓGICO ANALOGO AL YOGUR CON FRUTAS.

##### OBJETIVO

Elaboración de un sistema modelo a base de hidrocoloides que presente parámetros reológicos análogos al yogur con frutas, en el punto crítico de su proceso de elaboración.

##### JUSTIFICACION

En esta etapa del trabajo se realizó la experimentación en el sistema de flujo a nivel planta piloto, con el objetivo de obtener propuestas de velocidades de transporte y tipo de bomba a utilizar en el proceso de elaboración de un yogur con frutas, dichas propuestas fueron las más adecuadas para disminuir las pérdidas de consistencia del producto; por razones económicas no fué posible utilizar yogur para llevar a cabo toda la experimentación citada por lo que fue necesario elaborar un modelo a base de hidrocoloides el cual presentó un comportamiento reológico análogo a la base de yogur con frutas.

##### MATERIALES Y METODOS

Para la elaboración del sistema modelo se necesitó conocer los parámetros reológicos de la base de yogur exactamente en la etapa en donde se lleva a cabo el mayor porcentaje de pérdida de consistencia, por lo que el modelo debió contar con propiedades reológicas específicas antes de ser utilizado para nuestra experimentación.

Entre estas propiedades específicas tenemos:

- 1) Presentar un valor de viscosidad aparente inicial análoga a la que tiene la base de yogur con frutas, evaluadas bajo las mismas condiciones.
- 2) Ser un fluido dependiente del tiempo de cizallamiento,

comportamiento tixotrópico.

3) Presentar un comportamiento análogo a la base de yogur con frutas cuando en esta se evalúa la viscosidad con respecto al tiempo de cizallamiento a diferentes velocidades de cizallamiento.

4) Presentar una viscosidad análoga, es decir lo más cercana posible a la base de yogur con frutas cuando haya alcanzado el equilibrio (valor de viscosidad constante).

#### **Elaboración del sistema modelo**

El modelo se elaboró en base a las propiedades funcionales de dos hidrocoloides:

Carragenina del tipo "kappa" (Fructogel GF 60610) .  
C.M.C. (Cellogen HP-5HS).

La dispersión de los hidrocoloides se realizó con un agitador marca YAMATO, modelo LR 41D

La evaluación se realizó en el viscosímetro de cilindros concéntricos Rheomat, modelo 108, utilizando el cuerpo de medición número 2.

#### ETAPA 4

#### 2.4 EVALUACION DE LA PERDIDA DE CONSISTENCIA DEL SISTEMA MODELO, EN DIFERENTES BOMBAS DE DESPLAZAMIENTO POSITIVO.

##### OBJETIVO

Utilizando el sistema de flujo a nivel planta piloto ubicado en la Nave 2001 del C-4 y el modelo a base de hidrocoloides, evaluar la pérdida de consistencia de dicho modelo en diferentes tipos de bombas de desplazamiento positivo.

##### JUSTIFICACION

Una vez conocida la forma de operación del sistema de flujo se debe proceder a la evaluación de la pérdida de consistencia del sistema modelo en diferentes bombas de desplazamiento positivo, ya que si posteriormente se pretende realizar propuestas para el transporte del yogur (tipo de bomba a utilizar y gasto volumétrico) éstas deben obtenerse mediante una extrapolación de los datos de nivel planta piloto a los utilizados a nivel industrial.

##### VARIABLES:

Independientes: Tipo de bomba y niveles de operación de las mismas.  
Dependientes: Viscosidad aparente.

##### Constantes:

Fluido a utilizar (sistema modelo)  
Temperatura de evaluación.

Niveles de variación: (en cuanto al flujo volumétrico)

Bomba sinusoidal= 0.18 a 2.40 G.P.M.  
Bomba de diafragma= 0.84 a 7.75 G.P.M.

##### MATERIALES Y METODOS

Algunas características del sistema de flujo a utilizar son las siguientes:

El sistema cuenta con:

1) Una bomba de rotor oscilatorio, con carcasa, rotor y buje de flecha en acero inoxidable 316 con acabado sanitario, conexión succión-descarga de 2" X 2" tipo clamp, especial para manejar sólidos de naturaleza frágil con un tamaño máximo de 3/8" ; así como fluidos lácteos y alimentos procesados, esta bomba maneja gastos desde 0 hasta 24 gpm, con una velocidad de rotación de 0 a 750 rpm.

2) Bomba de doble diafragma, cuerpo de polipropileno, diafragmas y partes internas de poliuretano, salida bridada de 1 1/2", ideal para manejar sólidos en suspensión con diámetro de 3/16", opera con presiones de aire de 20 a 110 psig y maneja gastos desde 5 a 70 gpm.

3) La tubería, válvulas y accesorios son de acero inoxidable 316 con terminaciones tipo "clamp" de 2" y 1 1/2".

4) Tanques cilíndricos verticales contruidos en acero inoxidable T-304, con capacidad de 65 y 30 litros, con niple de salida tipo "clamp" de 2" de diámetro, fondo cónico y acabado sanitario.

5) Muestreadores roscados, situados en la succión y descarga de cada una de las bombas, con la finalidad de obtener muestras del fluido con el menor daño posible, los cuales son los mismos que se utilizan a nivel industrial.

A continuación se muestra el esquema del sistema de flujo.

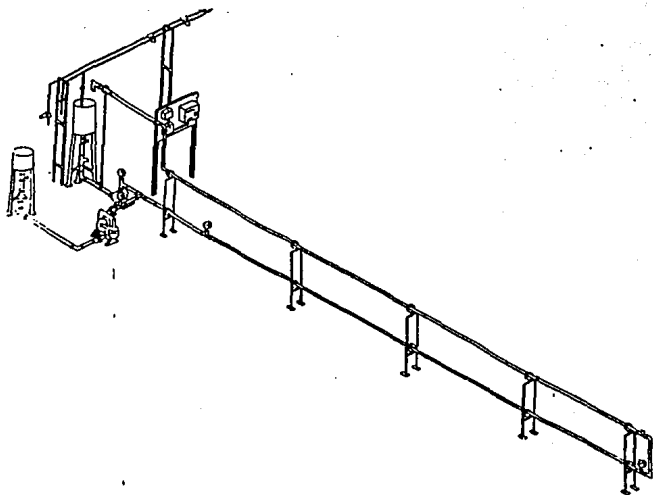


Figura 24. Sistema de flujo a nivel piloto.

Para obtener diferentes niveles de gastos volumétricos en la bomba SINE se contó con un variador de frecuencias, con la finalidad de controlar la velocidades de rotación de esta bomba, se tuvo un nivel de operación del 0 al 100%.

Para obtener diferentes gastos en la bomba de diafragma se tuvo que incrementar el flujo de aire que entra a los diafragmas, con lo que se logra un mayor desplazamiento del fluido y por lo tanto un mayor gasto.

#### Metodología experimental:

Una vez que se dispersó la mezcla de polisacáridos, se colocó el fluido en los tanques contenedores.

#### BOMBA SINUSOIDAL (SINE)

1) Abrir la válvula de mariposa que se encuentran en la parte inferior de este tanque, para permitir que el fluido llene la cavidad de la bomba.

2) Accionar la bomba, mediante el variador de frecuencia para llenar toda la tubería.

3) Una vez que el fluido vuelve al tanque, se selecciona el porcentaje de velocidad al cual se desea trabajar la bomba.

4) Cuando la velocidad permanezca constante se procede a registrar los valores de tiempo en que se recolecta un volumen de 2000ml, así como las revoluciones por minuto de operación de la bomba, esto se realiza con una probeta y tacómetro respectivamente.

5) Por último, también cuando la velocidad es constante se procede a la obtención de muestras a la succión y descarga de la bomba, para la evaluación de la pérdida de consistencia (viscosidad aparente); lo cual se realizó en el viscosímetro de cilindros concéntricos Rheomat, modelo 108, utilizando el método citado en la etapa 2.1.3.

#### BOMBA DE DIAFRAGMA (WILDEN)

1) Abrir la válvula de mariposa que se encuentra en la parte inferior del tanque, para permitir que el fluido llene la cavidad libre de la bomba.

2) Se acciona el sistema de aire comprimido a una determinada presión, con la válvula de aguja, y se se verifica con los manómetros que se encuentran a la succión y a la descarga de esta bomba, la línea de aire comprimido cuenta con filtros para la eliminación de agua y aceite que pudieran estar presentes, ya que de lo contrario pueden dañar los diafragmas de la bomba.

3) Se repite esta operación a las diferentes presiones de trabajo, controlando la válvula reguladora de presión; para cada una de ellas se evalúa la pérdida de consistencia mediante los cambios de viscosidad aparente existentes entre la succión y descarga de la bomba, al igual que en la bomba sinusoidal hay que esperar a que el flujo sea constante para poder recolectar las muestras.

La determinación del gasto volumétrico y del porcentaje de pérdida de consistencia se realizó de la misma forma que en la bomba sinusoidal.

## ETAPA 5

### 2.5 COMPARACION DEL DAÑO CAUSADO A LA CONSISTENCIA DE LA BASE DE YOGUR POR DOS DIFERENTES BOMBAS DE DESPLAZAMIENTO POSITIVO.

#### OBJETIVO

Evaluación del daño causado a la consistencia de la base de yogur cuando se utilizan para su transporte una bomba de rotor sinusoidal y una de tornillo sinfin.

#### JUSTIFICACION

Actualmente en la elaboración del yogur con frutas es comunmente utilizada la bomba de tornillo sinfin, la cual presenta inconvenientes por el daño que ocasiona a la consistencia del producto, por lo que este daño se comparará con el causado por la bomba de rotor sinusoidal cuando ambas bombean base de yogur, con la finalidad de determinar posibles ventajas, así como las limitantes de cada una de ellas para ser utilizadas a nivel industrial.

#### NIVELES DE VARIACION

##### Variables:

- Independientes: Tipo de bomba y niveles de operación de las mismas.
- Dependientes: Viscosidad aparente.

##### Constantes:

- Fluido a utilizar: Base de yogur
- Temperatura de evaluación.

##### Niveles de variación (en cuanto a rpm de operación)

- Bomba sinusoidal (SINE): 185-305
- Bomba de tornillo (MOYNO): 250-410

La metodología experimental es la misma que se siguió en el punto 2.4; sólo se obtuvieron los resultados de la bomba SINE, ya que los de la bomba MOYNO ya fueron obtenidos en el punto 2.2 por lo que sólo serán retomados para su comparación.



# CAPITULO 3

## ANALISIS DE RESULTADOS

***3.1 Evaluación de la pérdida de consistencia que sufre el yogur con frutas durante su proceso de elaboración***

***3.2 Determinación de la relación existente entre las condiciones de operación del sistema de bombeo (r.p.m.) y la pérdida de consistencia del producto durante su transporte***

***3.3 Obtención de un sistema modelo elaborado a base de hidrocoloides que presente un comportamiento reológico análogo al yogur con frutas***

***3.4 Evaluación de la pérdida de consistencia del sistema modelo en diferentes bombas de desplazamiento positivo***

***3.5 Comparación del daño causado a la consistencia de la base de yogur por dos diferentes bombas de desplazamiento positivo***

### 3.1 EVALUACION DE LA PERDIDA DE CONSISTENCIA QUE SUPRE EL YOGUR CON FRUTAS DURANTE SU PROCESO DE ELABORACION A NIVEL INDUSTRIAL.

#### 3.1.1 EVALUACION DE LAS PROPIEDADES FISICOQUIMICAS DEL YOGUR CON FRUTAS Y TEMPERATURAS DE OPERACION EN SU PROCESO DE ELABORACION.

A continuación se presentan los intervalos de aceptación de las propiedades fisicoquímicas del yogur con frutas: porcentaje de sólidos totales, pH, acidez de fermentación, así como las características de las mermeladas utilizadas en este proceso, en donde dichos intervalos fueron fijados en base a los valores de las propiedades fisicoquímicas que se manejan a nivel industrial.

También se muestran las condiciones de operación en cuanto a temperaturas, en diferentes puntos del proceso de elaboración del yogur con frutas.

Los intervalos de aceptación se utilizaron en este trabajo como indicadores de un control de calidad estándar en la elaboración del yogur con frutas.

A los datos obtenidos se les calculó el valor medio ( $\bar{x}$ ), desviación estándar ( $\sigma$ ), y el coeficiente de variación (C.V.), con la finalidad de determinar los intervalos de aceptación para las propiedades fisicoquímicas y condiciones de proceso, tabla 3 y 4, respectivamente.

TABLA 3. INTERVALO DE ACEPTACION PARA LAS PROPIEDADES FISICOQUIMICAS DEL YOGUR CON FRUTAS.

PROPIEDAD FISICOQUIMICA		x	$\sigma$	C.V	INTERVALO
SOLIDOS TOTALES (X)	Mezcla	20.66	0.37	1.79	20.29-21.03
	Prod. Terminado	24.47	0.35	1.43	24.12-24.82
pH	Mezcla	4.49	0.13	2.89	4.36- 4.62
	Prod. Terminado	4.42	0.10	2.26	4.32- 4.52
ACIDEZ DE FERMENTACION ( $^{\circ}$ D)		92.5	7.50	8.10	85 - 100
MERMELADA DE FRESA	$^{\circ}$ BRIX	54.0	0.77	1.42	53.23-54.77
	% FRUTA	22.8	0.77	3.38	21.93-23.57
	AREA DE PARTICULA $mm^2$	71.9	49.0	68.15	22.9-120.9

TABLA 4. INTERVALO DE ACEPTACION PARA LAS TEMPERATURAS DE OPERACION DEL PROCESO DE ELABORACION DEL YOGUR CON FRUTAS.

PUNTO DEL PROCESO	x	$\sigma$	C.V.	INTERVALO DE TEMPERATURA ( $^{\circ}$ C)
FERMENTACION	43.5	1.5	3.44	42 - 45
ENFRIAMIENTO DEL COAGULO	20.5	2.5	12.19	18 - 23
ENVASADO	20.5	2.5	12.19	18 - 23

En lo que se refiere a la acidez de fermentación se tiene un coeficiente de variación relativamente alto, así como un intervalo de aceptación amplio, esto es aceptable, ya que a nivel industrial resulta factible medidas de acidez de esta índole

debido principalmente a la cadencia del proceso, ya que este puede exigir un producto con acidez baja o alta de acuerdo a sus necesidades, es decir, si existe urgencia por el producto en la línea de envasado la acidez requerida para el mismo se terminará en un nivel inferior a 100 °Dornic.

Debido a que los niveles de calidad utilizados en la elaboración de mermeladas no son del todo satisfactorios, se tuvo el inconveniente de que la fruta contenida en dichas mermeladas presentó una distribución de tamaños demasiado amplia por lo que la desviación estándar del área de las partículas presentó un valor bastante grande.

Los intervalos fijados sirvieron para la aceptación de resultados posteriores, ya que si las condiciones de elaboración no son las normales, los datos obtenidos a partir de éstas no son confiables por lo que se eliminaron, con ésto se tuvo una mayor confiabilidad de los resultados obtenidos.

### 3.1.2 PROPIEDADES REOLOGICAS DEL YOGUR CON FRUTAS

A continuación se muestran los resultados de la caracterización reológica, la cual se aplicó a la base del yogur con frutas y al producto terminado, la caracterización está basada en el tratamiento matemático descrito en la página 81, así mismo se presentan las gráficas que muestran el comportamiento al flujo de los fluidos en estudio.

#### BASE PARA YOGUR CON FRUTAS

En el proceso de fabricación del yogur con frutas se entiende como base de yogur al producto fermentado antes de ser mezclado con la fruta.

En la figura 25 se observa la relación que guarda el esfuerzo cortante con la velocidad de cizallamiento (antes del equilibrio), formándose un bucle de histéresis, por lo que se dice que el fluido es dependiente al tiempo de cizallamiento, es decir presenta un comportamiento tixótrópico.

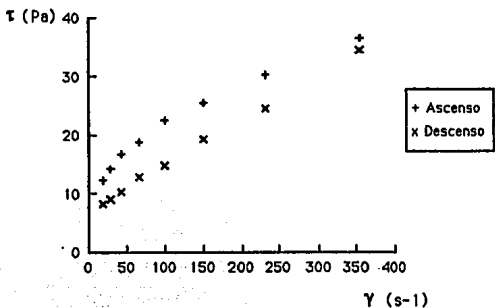


Figura 25. Formación del bucle de histéresis de la base de yogur.

En la figura 26 se puede observar el comportamiento de la viscosidad con respecto al tiempo de cizallamiento para la base del yogur; para un mismo tiempo de evaluación, a mayor velocidad de cizallamiento aplicada, el valor de viscosidad es inferior.

Se observa una disminución notable de la viscosidad en los primeros 100 segundos, viéndose influenciada aún más por la velocidad de cizalla a la cual se lleva a cabo la evaluación.

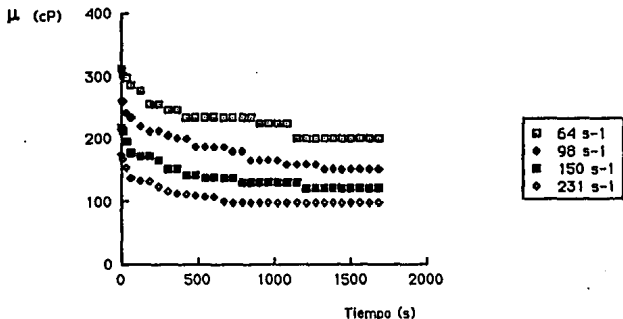


Figura 26. Comportamiento de la viscosidad con respecto al tiempo de cizallamiento de la base de yogur.

En la figura 27 se muestra que la base del yogur presenta en el equilibrio un comportamiento pseudoplástico pero con un esfuerzo cortante inicial ( $\tau_0$ ), los valores de las constantes reológicas están resumidos en la tabla 8.

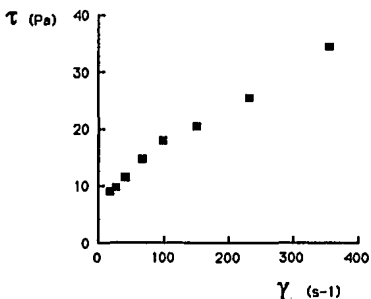


Figura 27. Caracterización de la base de yogur llevada al equilibrio

#### YOGUR CON FRUTAS

En la figura 28 se muestra la curva de flujo característica para el yogur con frutas, la cual presenta un bucle de histéresis formado cuando el fluido es dependiente del tiempo de cizallamiento.

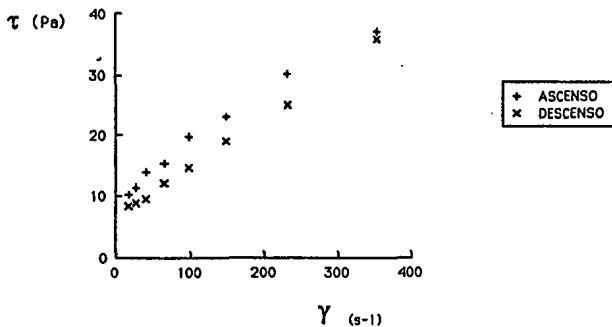


Figura 28. Bucle de histéresis formado cuando el fluido es dependiente del tiempo de cizallamiento, yogur con frutas.

Como se puede observar en la figura 29, existe una disminución notable de la viscosidad con respecto al tiempo de cizallamiento cuando ésta se evaluó en los primeros 180 segundos, y llegando al equilibrio a los 3000 segundos.

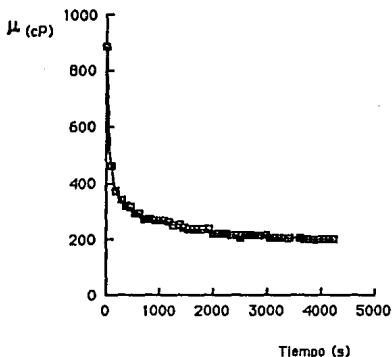


Figura 29. Comportamiento de la viscosidad con respecto al tiempo de cizallamiento, yogur con frutas.

Además en la figura 30 se presenta el comportamiento reológico del yogur con frutas cuando es sometido al ciclo de cizalla, al no existir dependencia con respecto al tiempo de cizallamiento, el yogur con frutas presenta además de un esfuerzo cortante inicial (punto de cedencia), una relación lineal entre el esfuerzo cortante y la velocidad de cizallamiento.



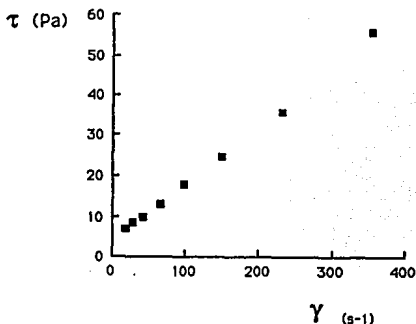


Figura 30. Reograma característico de un yogur con frutas.

Los tratamientos matemáticos y gráficos muestran que los fluidos son dependientes del tiempo de cizallamiento, es decir, no presentan al coeficiente de viscosidad como una constante.

TABLA 5. PARAMETROS REOLOGICOS EN EL EQUILIBRIO PARA LA BASE DE YOGUR Y YOGUR CON FRUTAS.

FLUIDO	MODELO REOLOGICO	
	HERSCHEL BULKLEY	BINGHAM
YOGUR CON FRUTAS	$n = 1$ $k \text{ (Pa}\cdot\text{s}^n) = 0.121$ $t_0 \text{ (Pa)} = 2.984$ $r = 0.998$	$t_0 = 2.96$ $up1 = 0.121$ $r = 0.998$
BASE DE YOGUR	$n = 0.589$ $k \text{ (Pa}\cdot\text{s}^n) = 0.769$ $t_0 \text{ (Pa)} = 2.9$ $r = 0.997$	$t_0 = 7.52$ $up1 = 0.064$ $r = 0.994$

Para el caso del yogur con frutas se tiene en la caracterización reológica una correlación idéntica, utilizando los modelos de Herschel Bulkley y de Bingham, así mismo el esfuerzo cortante inicial es cercano en ambos, pero el índice del

comportamiento al flujo para el modelo de Herschel Bulkley presenta un valor de 1, lo cual confirma un comportamiento lineal entre el esfuerzo cortante y la velocidad de cizalla, características del modelo de Bingham.

En lo que se refiere a la base de yogur, se tiene para el modelo de Herschel Bulkley una correlación mayor en comparación con el modelo de Bingham, además el esfuerzo cortante inicial obtenido en el modelo de Bingham es sumamente grande para este producto, pues éste debe presentar un valor similar al del yogur con frutas; por lo cual se seleccionó el modelo de Herschel Bulkley como representativo del comportamiento reológico de la base de yogur.

La base de yogur con frutas tiene un comportamiento reológico en el equilibrio regido por el modelo de Herschel Bulkley, y el yogur con frutas en el equilibrio sigue el comportamiento reológico de Bingham. Estas diferencias reológicas son debidas a que la base de yogur es el producto obtenido después de la fermentación llevada a cabo en el proceso, sin haber sufrido ningún daño mecánico, ni haber adicionado ningún edulcorante; presentando un comportamiento pseudoplástico pero con un esfuerzo cortante inicial (Herschel Bulkley).

Dentro del mismo proceso esta base tiene que ser enviada hacia el mezclado con frutas, sufriendo un daño en su consistencia durante el transporte, además después se le adiciona mermelada de frutas para finalmente tener un producto terminado con un mayor contenido de azúcares y con una estructura degradada, semejándose al comportamiento Newtoniano, pero prevaleciendo el esfuerzo cortante inicial.

### 3.1.3 EVALUACION DE LA VISCOSIDAD APARENTE COMO MEDIDA DE CONSISTENCIA.

La constante reológica que puede ser considerada como una medida indirecta de la consistencia es la viscosidad aparente, en donde sólo se fijó para su evaluación:

- 1) Características del equipo en donde se llevó a cabo la evaluación.
- 2) El tiempo a que se sometió la muestra al cizallamiento.
- 3) Velocidad de cizallamiento utilizada en la evaluación.
- 4) La temperatura a la cual se realizó la evaluación.

Lo anteriormente citado esta fundamentado en los resultados estadísticos siguientes:

TABLA 6. EVALUACION DE LA VISCOSIDAD APARENTE DE LA BASE DE YOOUR.

REPETICION	VALORES DE VISCOSIDAD APARENTE (CP)
1	190
2	190
3	190
4	193
5	190
6	190
7	190
8	190
9	190
10	190
11	190
12	190
13	190
14	190
15	190

El valor medio de las evaluaciones (15 en total) de la viscosidad aparente realizada a la base de yogur con frutas, fué de 190.2, presentando una desviación estandar de 0.774.

Lo cual nos indica que el método a evaluar se puede considerar como EXACTO ya que los valores obtenidos serán prácticamente iguales a su media, es decir no existe una dispersión de los valores obtenidos con respecto a su valor medio.

Así mismo se tienen los resultados del tratamiento estadístico *t de Student*, los intervalos construídos con un 99% de confianza son 189.60 - 190.72, lo cual nos indica que del total de las evaluaciones realizadas bajo las mismas condiciones se tiene el 93.3 % de seguridad que se repetirán dichos valores obtenidos, considerando a nuestro método de evaluación REPETITIVO.

De igual manera se tiene 99% de confianza en que el valor medio de las evaluaciones realizadas esté entre el intervalo antes citado porque, evaluando la viscosidad aparente de la base de yogur repetidas veces, el 99 por ciento de los valores obtenidos en condiciones semejantes incluirán a la media obtenida, lo cual le proporciona el aspecto CONFIABLE al método aplicado.

Reológicamente existe la factibilidad de considerar a la viscosidad aparente como una medida indirecta de la consistencia, ya que en ambas evaluaciones se cuantifica el grado de oposición que presenta el fluido a ser deformado.

Para fines prácticos a nivel industrial, no es necesario realizar una evaluación de los parámetros reológicos a fondo, pues por razones principalmente de tiempo, ya que se evalúan una gran cantidad de muestras, es imposible realizar un estudio detallado, por lo que la evaluación de la viscosidad aparente es suficiente para ser tomada como medida indicativa del control de calidad en cuanto a consistencia durante la fabricación de yogur.

El método aplicado cumple con los requerimientos citados anteriormente por lo que se utilizó a lo largo de este trabajo, el cual se identificó como Método "A", el cual consistió en:

Utilización de un viscosímetro de cilindros concéntricos, Rheomat modelo 108, utilizando el cuerpo de medición número 2, un

tiempo de cizallamiento de 10 seg, una velocidad de cizalla de 98.16 1/seg, y una temperatura de evaluación de 10°C.

En este caso en particular, se decidió el tiempo se cizalla de 10 segundos, debido a que este lapso permite obtener una estabilidad en la lectura dada por el equipo, así como proporcionar al operador el tiempo necesario para registrarla; de igual manera este tiempo de exposición al cizallamiento permitiendo evaluar una muestra la cual no ha sufrido alguna alteración considerable en su estructura, por lo que los valores de consistencia (viscosidad aparente) en este momento son los más altos que se puedan registrar.

### 3.1.4 UBICACION DE LOS PUNTOS CRITICOS DEL PROCESO DE ELABORACION DEL YOGUR CON FRUTAS.

A continuación se presenta el esquema de la fabricación del yogur con frutas, en éste se observan los puntos críticos dentro del proceso de elaboración del yogur con frutas.

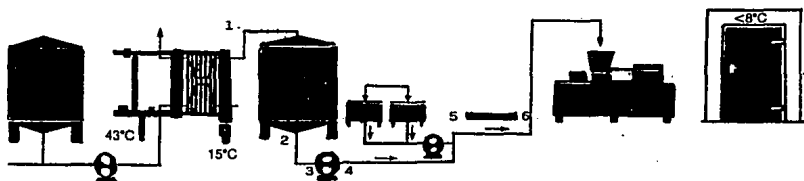


Figura 31. Esquema del proceso de elaboración del yogur con frutas donde se muestran los puntos críticos del proceso.

#### PUNTOS DEL PROCESO:

- 1) ENFRIAMIENTO (SALIDA DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR)
- 2) SALIDA DEL TANQUE DE TAMPON
- 3) SUCCION DE LA BOMBA (QUE ENVIA AL YOGUR HACIA EL MEZCLADO CON FRUTA)
- 4) DESCARGA DE LA BOMBA
- 5) ENTRADA DEL MEZCLADOR ESTATICO
- 6) SALIDA DEL MEZCLADOR ESTATICO
- 7) PRODUCTO TERMINADO DE LINEA

\*La bomba del proceso es de tornillo sin fin.

\*Todas las tuberías son de acero inoxidable, con acabado sanitario.

El yogur evaluado se encontró dentro del intervalo de aceptación de los estándares manejados a nivel industrial para la elaboración de este producto. (tabla 6 y 7)

En la siguiente figura se muestran los valores de la viscosidad aparente en los diferentes puntos del proceso, se puede observar que entre los puntos 4-5 es en donde se tiene la máxima pérdida de este parámetro, posteriormente se tuvo una recuperación en esta viscosidad aparente originada por la adición de mermeladas de frutas, y el almacenamiento en refrigeración.

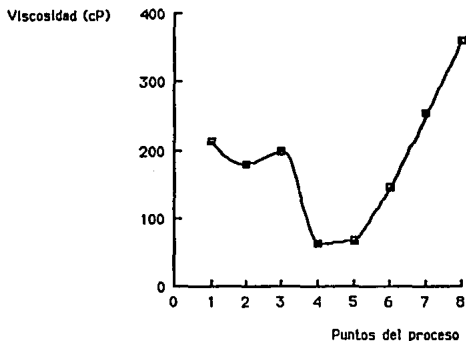


Figura 32. Gráfica de la evaluación de la viscosidad aparente en los diferentes puntos del proceso de elaboración de un yogur con frutas.

De la figura anterior se puede afirmar que el punto dentro del proceso de elaboración del yogur con frutas en donde se perdió la mayor parte de consistencia (viscosidad aparente) es donde interviene directamente el sistema de bombeo.

Existió otra opción dentro del proceso en donde se puede perder consistencia, y es en donde sólo existe el transporte por

tuberías y accesorios.

Se realizó una agrupación de datos, con la finalidad de determinar si en verdad la diferencia de consistencia (viscosidad aparente) entre los puntos en donde sólo existen tuberías y accesorios son considerables ya que pueden afectar drásticamente a la consistencia final del yogur, o si lo que realmente afectó es el sistema de bombeo utilizado, los cuales se encuentran en la tabla 7.

El sistema de bombeo utilizado afectó drásticamente a la consistencia (viscosidad aparente) del mismo, lo anterior se muestra en la tabla 10, los datos obtenidos experimentalmente nos muestran el porcentaje de pérdida de viscosidad entre los puntos en donde interviene el sistema de bombeo, siendo este del 50% en promedio, y en aquellos en donde solo intervienen tuberías y accesorios, es menor al 3% considerándose despreciable para los objetivos del presente trabajo.



TABLA 7. PORCENTAJE DE PERDIDA DE VISCOSIDAD EN LOS DIFERENTES PUNTOS CRITICOS DEL PROCESO DE ELABORACION DE YOGUR CON FRUTAS.

EXPERIMENTACION	SITIO DE LA TOMA DE MUESTRA		
	TRANSPORTE POR TUBERIAS Y ACCESORIOS	PASO POR EL SISTEMA DE BOMBEO	TRANSPORTE POR TUBERIAS Y ACCESORIOS
	(2) SALIDA TANQUE TAMPON	(3) SUCCION DE LA BOMBA	(4) DESCARGA DE LA BOMBA
	(3) SUCCION DE LA BOMBA	(4) DESCARGA DE LA BOMBA	(5) ANTES DEL MEZCLADOR
1	3.3	31.5	0.0
2	7.3	42.5	4.4
3	3.2	27.3	0.0
4	0.0	62.4	3.6
5	4.5	62.4	0.0
6	0.0	37.6	0.0
7	0.0	27.0	0.0
8	3.6	62.0	0.0
9	0.0	63.7	0.0
10	3.2	67.5	7.2
11	0.0	63.5	5.8
X	2.28	50.0	1.90
$\sigma$	2.46	16.5	2.78

Como se puede observar en la tabla 7, existe una desviación estandar considerable (16.5), debido a que la bomba que intervine en el transporte se operó a diferentes r.p.m., trayendo como consecuencia una variable extra cuya influencia repercute directamente en la desviación estandar, pues al no poder controlar la velocidad de operación de la bomba, provocó que el daño mecánico que este sistema ocasiona al yogur no fuera constante.

### 3.2 OBTENCION DE LA RELACION EXISTENTE ENTRE LAS CONDICIONES DE OPERACION DEL SISTEMA DE BOMBEO (r.p.m.) Y LA PERDIDA DE CONSISTENCIA DEL PRODUCTO DURANTE SU TRANSPORTE.

Con base en los resultados reportados en la tabla 11 se obtuvo la relación existente entre las rpm de operación de la bomba y el % de pérdida de consistencia ocasionado en esta etapa.

En la figura 33 se puede observar gráficamente que dicha relación es directamente proporcional, la relación se obtuvo mediante un análisis de regresión, dando un coeficiente de 0.9505.

Cuando la bomba utilizada en el proceso se operó a velocidades altas, el daño ocasionado a la consistencia del producto fue mayor comparado con el daño que se le causa al producto cuando la bomba se operó a bajas velocidades.

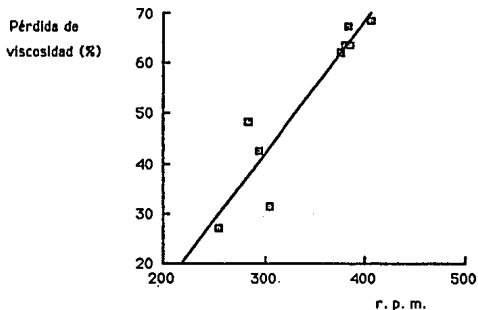


Figura 33. Relación existente entre el porcentaje de pérdida viscosidad del yogur con frutas y las r.p.m. de operación de la bomba de tornillo sin fin.

Con base en los resultados antes presentados se puede afirmar que si se controla el daño mecánico ocasionado por el sistema de

bombeo se puede obtener un producto final con mayor consistencia.

Pero existe una limitante mayor la cual nos puede llevar a pensar que es factible controlar el daño ocasionado por el sistema de bombeo, mediante la operación de las bombas a bajas r.p.m., pero este proceso de elaboración exige una continuidad perfecta, por lo que operarlas a un nivel bajo ocasionaría pérdidas económicas cuantiosas.

TABLA 8. TABULACION DEL PORCENTAJE DE CONSISTENCIA PERDIDA EN EL BOMBEO DE LA BASE DE YOGUR.

EXPERIMENTACION	X DE PERDIDA DE VISCOSIDAD ENTRE LA SUCCION Y DESCARGA DE LA BOMBA	RPM DE OPERACION DE LA BOMBA
1	27.0	250-260
2	27.3	250-260
3	31.5	300-310
4	37.6	290-300
5	42.5	290-300
6	48.3	200-207
7	62.0	370-380
8	62.4	300-390
9	63.5	300-307
10	63.7	300-307
11	67.5	300-307
12	68.5	300-390
13	69.0	400-410

### 3.3 ELABORACION DE UN SISTEMA MODELO A BASE DE HIDROCOLOIDES QUE PRESENTE UN COMPORTAMIENTO REOLOGICO ANALOGO AL A LA BASE DE YOGUR CON FRUTAS.

El modelo se elaboró con base en las propiedades funcionales de dos hidrocoloides:

Carragenina del tipo "kappa" (Fructogel GF, 60610) a una concentración del 0.8 %.

Carboxi-Metil-Celulosa (Cellogen HP-5HS) a una concentración del 0.6%.

La forma en que se elaboró el modelo reológico fué la siguiente:

- a) Se empleó de agua de la red municipal, incrementando su temperatura hasta alcanzar 50°C, manteniéndola constante.
- b) Utilización de un agitador mecánico, marca YAMATO modelo LR 41D, operándolo a una velocidad marcada con el número 5.
- c) En primer lugar se dispersó la goma C.M.C, de tal manera que no se formen grumos, en el caso de que estos llegarán a formarse, esperar a que se disuelvan antes de agregar el resto de la goma, el tiempo aproximado de dispersión es de 5 minutos.
- d) Una vez dispersada toda la goma C.M.C., se procedió a agregar la carragenina, evitando la formación de grumos, el tiempo aproximado de dispersión fue de 10 minutos.
- e) Dejar hidratar la mezcla preparada 24 horas, para posteriormente realizar la evaluación correspondiente.

La evaluación realizada al modelo reológico consistió en:

- 1) Someter al modelo a una velocidad de deformación constante, registrar los valores de viscosidad con respecto al tiempo, hasta que los valores de viscosidad registrados permanecieran constantes, como se puede observar en la figura 34.
- 2) Registro de la viscosidad inicial y final del modelo a evaluar

cuando éste se somete a una velocidad de cizallamiento constante; así como el registro del tiempo en que fué alcanzado el equilibrio entre la velocidad de degradación y la de reestructuración del fluido.

3) Evaluación del esfuerzo cortante que presenta el modelo reológico cuando éste se somete a una velocidad de cizallamiento específica a intervalos de tiempos constantes.

En la gráfica 34 se aprecia que para ambas velocidades de cizallamiento utilizadas el modelo reológico presenta una viscosidad mayor en comparación a la base del yogur, habiendo una disminución notable de este parámetro en los primeros 180 seg de evaluación, por último los valores de viscosidad evaluados a velocidades de cizallamiento altas (231 1/seg) son muy similares.

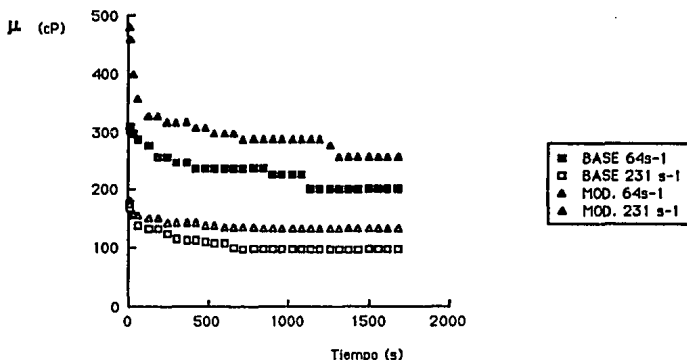


Figura 34. Comparación de la viscosidad aparente con respecto al tiempo de cizallamiento para la base de yogur y modelo reológico.

Así mismo en la gráfica 35 se observa el comportamiento tixótrópico de ambos fluidos los cuales en el intervalo de la velocidad de cizallamiento evaluados pueden ser considerados como análogos.

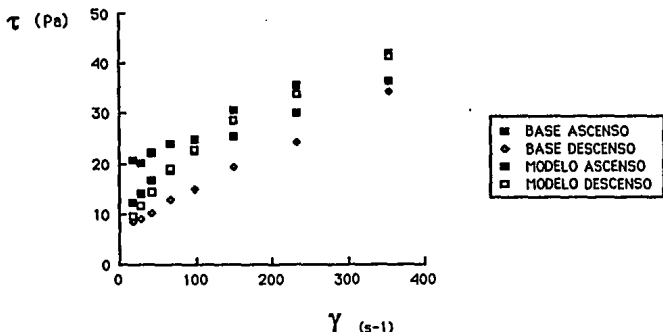


Figura 35. Comparación del comportamiento reológico entre la base de yogur y el modelo reológico.

En vista a lo anteriormente señalado se decidió a utilizar el modelo propuesto para llevar a cabo todo el resto de la experimentación, ya que las diferencias del comportamiento reológico existentes se entienden, ya que el yogur o la base del mismo son un sistema "vivo" difícil de igualar; pues por presentar en su estructura diversos sistemas coloidales, como lo son el de una emulsión y una suspensión, es prácticamente imposible que una mezcla de hidrocoloides iguale estas características; por lo que bastó con que dicho comportamiento fuese análogo al fluido en cuestión; tanto en la tixotropía

presentada así como en los límites de viscosidad.

TABLA 9. COMPARACION DEL COMPORTAMIENTO REOLOGICO ENTRE LA BASE DE YOGUR CON FRUTAS Y EL SISTEMA MODELO.

$\gamma$ ( $63.08 \text{ seg}^{-1}$ )	$\mu_{\text{inicial}}$	$\mu_{\text{final}}$	tiempo en alcanzar el equilibrio (segundos)
SISTEMA MODELO	481	256	1320
BASE PARA YOGUR	310	201	1170
$\gamma$ ( $231.6 \text{ seg}^{-1}$ )	$\mu_{\text{inicial}}$	$\mu_{\text{final}}$	tiempo en alcanzar el equilibrio (segundos)
SISTEMA MODELO	181	133	840
BASE PARA YOGUR	175	99	630

### 3.4 EVALUACION DE LA PERDIDA DE CONSISTENCIA DEL SISTEMA MODELO, EN DIFERENTES BOMBAS DE DESPLAZAMIENTO POSITIVO.

Para el caso de la bomba SINE se determinó el gasto y las r.p.m. en función del porcentaje de frecuencia que maneja el variador de la bomba. El gasto volumétrico se evaluó como el volumen de fluido recolectado en un recipiente entre el tiempo de llenado de dicho recipiente, y las r.p.m. se midieron con un tacómetro digital.

El porcentaje de pérdida de consistencia se determinó mediante la diferencia entre los valores de este parámetro a la succión y descarga de cada una de las bombas.

TABLA 10. CONDICIONES DE OPERACION DE LA BOMBA SINUSOIDAL, Y PORCENTAJE DE PERDIDA DE CONSISTENCIA DEL SISTEMA MODELO OCASIONADO POR EL SISTEMA DE BOMBEO.

FRECUENCIA (X)	RPM	GASTO (OPM)	% DE PERDIDA
60	175	3.4	28
70	205	4.1	26
80	245	4.7	27
100	295	6.0	22

Es preciso indicar que a pesar de que el variador de frecuencia maneja porcentajes menores al 60%, no se llevaron a cabo dichas evaluaciones ya que no existe un enfriamiento adecuado de la bomba a bajas rpm, lo cual produce un sobrecalentamiento de la misma y por consiguiente un mayor desgaste.

Para la bomba de doble diafragma sólo fué posible la evaluación de tres intervalos de presión de aire comprimido debido a la dificultad que se tiene en el accionamiento de la bomba pues la



presión mínima para lograrlo es de 1 kg/cm<sup>2</sup>.

TABLA 11. CONDICIONES DE OPERACION DE LA BOMBA DE DIAFRAGMA, Y PORCENTAJE DE PERDIDA DE CONSISTENCIA DEL SISTEMA MODELO OCASIONADO POR EL SISTEMA DE BOMBEO.

PRESION DE OPERACION (kg/cm <sup>2</sup> )	GASTO (GPM)	% DE PERDIDA
2.0	0.84	36
2.5	2.40	47
3.0	6.90	48

En la gráfica siguiente se observa la relación que existe entre el gasto manejado para cada una de las bombas y el porcentaje de pérdida de consistencia en cada una de ellas.

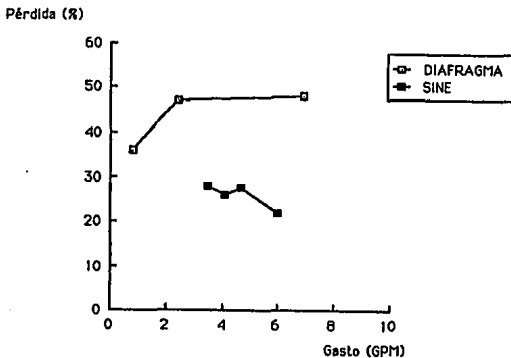


Figura 36. Pérdida de consistencia en función del flujo volumétrico, para la bomba Sinusoidal y la de Diafragma.

En base a los resultados presentados en las tabla 10 y 11 se puede asegurar que la bomba que ocasiona una menor daño a la consistencia del sistema modelo es la de rotor sinusoidal, esto es debido a su mecanismo de operación, dicho porcentaje es alrededor del 26%.

En cambio la bomba de doble diafragma tiene un mecanismo de operación por medio de pulsaciones lo cual ocasiona un daño mayor a la consistencia del sistema modelo, además de existir vibración en las líneas del sistema de flujo, dicho porcentaje se ve incrementado conforme aumente la presión de operación del sistema teniendo como valor mínimo un porcentaje de pérdida de 36 % y un valor máximo de 48 %.

Aunque el porcentaje de pérdida de viscosidad no tiene una marcada diferencia entre ambas bombas si cabe señalar que para la de rotor sinusoidal es prácticamente constante (25.7 %), independientemente de las r.p.m. de operación del sistema de bombeo.

### 3.5 DETERMINACION DE LAS CONDICIONES MAS ADECUADAS PARA EL TRANSPORTE DEL YOGUR CON FRUTAS DURANTE SU PROCESO DE ELABORACION.

Para la bomba de tornillo el porcentaje promedio de pérdida de consistencia en condiciones normales de operación (250-410 rpm) fué de 51%, y cuando se ajustaron a las condiciones ideales de fabricación (300 rpm) el porcentaje fué 33%.

Para el caso de la bomba de rotor sinusoidal, se obtuvieron los siguientes resultados:

TABLA 12. PORCENTAJE DE PERDIDA DE CONSISTENCIA DE LA BASE DE YOGUR EN LA BOMBA SINUSOIDAL.

FRECUENCIA (X)	RPM	GASTO (GPM)	% DE PERDIDA DE CONSISTENCIA
60	185	0.2	22.2
70	213	0.5	24.1
80	245	1.1	31.2
90	275	1.7	24.1
100	302	2.4	31.3

En la figura 37, se observa la comparación entre el porcentaje de pérdida de consistencia y el gasto volumétrico para las dos bombas evaluadas.

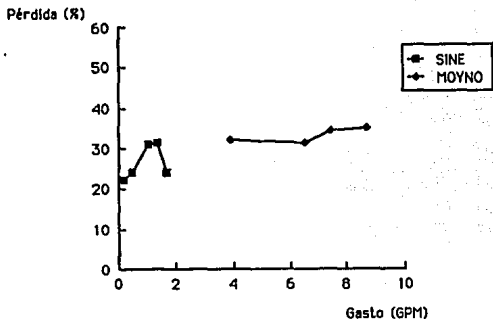


Figura 37. Pérdida de consistencia en función del flujo volumétrico, para la bomba Sinusoidal (SINE) y la de tornillo (MOYNO).

La bomba sinusoidal es la que presenta una pérdida de consistencia promedio menor (26%) en el intervalo estudiado (185-305 rpm), independientemente del gasto volumétrico obtenido, con lo cual se confirman los resultados obtenidos en la etapa anterior para esta misma bomba cuando se transportó el modelo reológico, pues el porcentaje de pérdida promedio es muy semejante al obtenido en esta etapa; por lo que se afirma que este porcentaje del 26% es independiente de la velocidad a la cual opere la bomba, y por lo tanto también del modelo de la misma, ya que el porcentaje de pérdida esta en función del mecanismo de acción de la bomba, y no de las condiciones de trabajo.

En el caso de la bomba de tornillo (MOYNO), el porcentaje de pérdida de viscosidad presenta una dependencia directa con la velocidad de rotación de dicha bomba, por lo que se tiene la gran limitante en el proceso de elaboración de no operar la bomba a

rpm mayores a las recomendadas por el fabricante (300 rpm), sin embargo la cadencia del proceso difícilmente lo permite, y aún cuando se trabaja a esta velocidad de rotación la pérdida es 33%, que es mayor al obtenido para la bomba de rotor sinusoidal.

Con base en los resultados obtenidos se puede afirmar que al utilizar una bomba de rotor sinusoidal para el transporte del yogur durante su proceso de elaboración, el porcentaje de pérdida de consistencia es independiente de la velocidad de flujo y de las rpm de operación de la misma.

## **CONCLUSIONES**

## CONCLUSIONES

Los intervalos de aceptación para las propiedades fisicoquímicas y temperaturas de operación concidieron con los manejados a nivel industrial para la fabricación del yogur con frutas.

El yogur con frutas presenta un comportamiento reológico dependiente del tiempo de cizallamiento, y un comportamiento reológico en el equilibrio del tipo de Plástico de Bingham con una viscosidad plástica de 0.121 Pa y un  $\tau_0$  de 2.95 Pa (evaluados en el intervalo de 17 a 350 1/seg). La base de yogur presentó un comportamiento reológico dependiente del tiempo de cizallamiento, la viscosidad es función de la velocidad y tiempo de cizallamiento, presenta un comportamiento reológico en el equilibrio del tipo Herschel Bulkley, con un índice de comportamiento al flujo de 0.59, un índice de consistencia de 0.77 Pa $\cdot$ s<sup>n</sup> y un  $\tau_0$  de 2.9 Pa.

Se aplicó un método para la evaluación de la viscosidad aparente como medida indirecta de la consistencia, en donde sólo se requiere fijar estrictamente las condiciones como: tipo y características del equipo utilizado, tiempo y velocidad de cizallamiento, y temperatura de evaluación; comprobándose que el método aplicado es confiable, repetitivo y exacto.

Del estudio realizado a nivel industrial se obtuvo que en el proceso de elaboración del yogur con frutas, el punto en donde se pierde el mayor porcentaje de consistencia es en el paso por el sistema de bombeo, en este proceso se utiliza una bomba de tornillo (MOYNO), la cual causa una pérdida del orden del 51% en condiciones normales de operación, y cuando se utiliza en

condiciones ideales de 300 rpm, el daño es del 33%, debido a la cadencia del proceso es difícil que se opere a esta velocidad

El modelo reológico propuesto a base de Carragenina 0.8% y C.M.C. al 0.6%, presentó un comportamiento tixotrópico, y valores viscosidad aparente similares al coágulo del yogur.

A nivel piloto y utilizando el modelo reológico se tiene que la bomba de diafragma ocasiona el mayor daño a la estructura del modelo reológico, 40% en promedio, debido principalmente al flujo pulsante que se presenta y a la vibración en las líneas, la bomba sinusoidal es en la que se pierde menos la estructura del modelo (26%), siendo la diferencia entre ambas muy marcada. Además es importante resaltar que para la de rotor sinusoidal la pérdida es independiente de la velocidad de la bomba, en cambio para la de diafragma es fuertemente dependiente de la presión de trabajo.

Cuando se evaluó el daño que ocasiona la bomba sinusoidal transportando base de yogur (coágulo del mismo), el porcentaje de pérdida de consistencia se mantuvo en el orden del 26%; para el fluido con el cual se trabajó.

Comparando la bomba propuesta (Rotor Sinusoidal) y la que actualmente se ocupa en la elaboración del yogur con frutas (Tornillo sinfin), se tiene para la bomba de tornillo (MOYNO), una dependencia directa entre la velocidad de rotación y el porcentaje de pérdida de consistencia (50 % en promedio), y en operación ideal del proceso (33%), este porcentaje es mayor en un 7% comparado con el que se obtiene al utilizar la bomba de rotor sinusoidal (SINE), pues con esta bomba el porcentaje de pérdida se mantiene en el orden del 26% independientemente del



gasto obtenido en la misma. Por lo que se propone la utilización de la Bomba de rotor sinusoidal (SINE), para el proceso de elaboración del yogur con frutas.

La diferencia del 7% de pérdida de consistencia cuando se utiliza una bomba de rotor sinusoidal es sumamente significativo, debido a que esta ganancia en consistencia puede ayudar a lograr ahorros en materias primas, en el caso concreto en la adición de sólidos totales (leche en polvo), pues existe la factibilidad de una reformulación trayendo como consecuencia ahorros económicos.

A pesar de que los gastos obtenidos en la bomba SINE y MOYNO no son comparables, debido a que en los modelos estudiados la bomba de tornillo maneja flujos mayores, el porcentaje de pérdida de consistencia en la bomba Sine será siempre menor. En el caso de seleccionar un modelo superior de la bomba Sine para obtener flujos mayores, habrá un incremento, debido al diseño de la bomba, del diámetro de salida de la misma; trayendo como consecuencia un flujo volumétrico menor para obtener gastos mayores, por lo que el daño a la consistencia ocasionado por la bomba deberá ser menor al evaluado en este estudio.

## **REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS**

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Cardwell J. (1986). Effect of egg white on acid production and viscosity of yoghurt and certain cheese cultures. *Journal of Dairy Science*. 69 (Suppl. 1):225.

Cesalis J. (1975). Technical gactores affecting the consistency, texture, aroma and flavour of yoghurt. *Industries Alimentaires et Agricoles*. 92 (11) 1253-1262.

Chokyun R. (1978). Rheology of fluid foods. *Food Technology* 32(7) 77-81.

Clark P. (1978). Dough rheolgy in extrusion cooking. *Food Technology* 32(7) 73-75.

Coghill D. (1983). Effect os starter cultures on the viscosity and flavour of yoghurt. *Dairy Products* 11 (1) 14-18.

Cruz R. (1990). Manual de operación del viscosímetro Rheomat. Laboratorio de Investigación y Desarrollo, Danone de México.

Egan H. (1987). Análisis Químico de Alimentos de Pearson. C.E.C.S.A. México, D.F.

Farkas E. (1967). Hodrocolloid rheology in the formulation of convenience foods. *Food Technology* 21 (4) 535.

Glicksman M. (1969). Gum Technology in the Food Industry. Chapter 3. Academic Press, New York.

Guirguis N. (1984). The effect of partial replacement of skim milk powder with whey protein concentrate on the viscosity and syneresis of yoghurt. *The Australian Journal of Dairy Technology*. (4) 33-35.

Halmos, A. (1981). Liquid foodstuffs exhibiting yield stress and shear degradability. *J. Texture Stud.* (12) 39-46.

Hellinga S. (1986). Viscosity of stirred yoghurt: modern techniques useful in analizynig and improved routine measuraments" . *Netherlands Milk Dairy Journal*. (40) 217-240.

Hombre R. (1982). Propiedades reológicas del yugur batido. Comparación de dos métodos de medición de la consistencia. Tecnología Química. (2) 25-28.

Kosikowski V. (1981). Properties of Commercial Flavored Frozen Yogurts. J. of Food Protection 44 (5) 234-237.

Krumel K. (1975). Flow properties of gums useful to the food industry. Food Technology 29 (4) 35-44.

Labropoulos A. (1981). Whey protein denaturation of UHT processed milk and its effect on rheology of yogurt". J. Texture Stud. (12) 265-374.

Labropoulos A. (1981). Apparent Viscosity of Milk and Cultured Yogurt Thermally Treated by UHT and Vat Systems. J. Of Food Protection. 44 (11) 874-876.

Labropoulos A. (1984). Effects of Ultra-High Temperature and Vat Processes on Heat-Induced Rheological Properties of Yogurt. J. Dairy Sci. (67) 405-409.

López H. J. (1992). Evaluación de la pérdida de viscosidad a lo largo de la línea de proceso del yogur con frutas. Laboratorio de Investigación y Desarrollo, Danone de México. Reporte no publicado.

López M. F. J. (1992). Manual de operación del viscosímetro Rheomat, correlación entre lecturas de viscosidad obtenidas en el viscosímetro Brookfield y Rheomat. Laboratorio de Investigación y Desarrollo de Danone de México. Reporte no publicado.

Martens R. (1972). Effect of some variables on consistency and flavour of stirred. Revue de l'Agiculture. 25 (3) 461-480.

Martínez P. (1993). Evaluación de propiedades físicas del yogur con frutas. II Congreso Latinoamericano y del Caribe de Ciencia y Tecnología de Alimentos. Ciudad de México.

Medellín H. (1992). Aplicación de estabilizantes en la fabricación de yogurt. Lacteos Mexicanos. (5) 3-5.

Meiklejohn P. (1977). How yo achieve better yoghurt viscosity. Cultured Dairy Products Journal. 12 (1) 6-7.

Noel Y. (1988). Rheological methods for the examination of yoghurt. Bulletin of International Dairy Federation (227) 127-128.

NOM-F-1990 Alimentos Lacteos - Yoghurt

O'Neil J. (1979). Consistency and Compositional Characteristics of Commercial Yogurts. J. Dairy Sci. (62) 1032-1036.

Parnell E. (1986). Influence of heat treatment of milk on the flow properties of yoghurt. J. Food Sci 51(6) 1459-1462.

Parnell E. (1986). Influence of heat-induced protein changes in milk on the consistency of yoghurt. Journal of Dairy Science. 69 (Suppl. 1): 84.

Prentice J. (1984). Measurements in the rheology of food stuffs. Elsevier applied science, England.

Rao M. (1977). Rheology of liquid foods. J. Text. Stud. (8) 135.

Ramaswamy H. (1991). Rheology of stirred yogurts. J. Texture Stud. (22) 231-241.

Runyon C. (1990). Determining Viscosity of fluids foods by continuous lift. J. of Food Science. 55(4) 1170-1173.

Sasso Y. (1984). Relation on acidity to pH and viscosity of certain yoghurt cultures in UHT milk. Journal of Dairy Science. 67 (Suppl. 1):228

Sassolas I. (1989). Manual de operación del viscosímetro Rheomat para los productos elaborados por Danone de México. Centro de Investigación Daniel Carasso.

Sestak J. (1988). Phenomenological rheology of thixotropic liquids: a contribution to the needs of engineering science. Progress and Trends in Rheology (2) 18-24.

Sherman P. (1988). Rheological evaluation on the textural properties of foods. Progress and Trends in Rheology (2) 44-53.

Skelland, A. (1967) Non-Newtonian Flow and Heat Transfer. John Wiley, New York.

Solorza F. (1991). Papel nutricional del yogurt; posibles efectos benéficos a la salud. Lácteos Mexicanos. (5) 5-8.

Tanner R. (1985). Engineering Rheology. Oxford Science. USA.

Teggatz J. (1990). Changes in the rheology and microstructure of ropy yoghurt during shearing. Food Structure 9 (2) 133-138.

Tamime A. (1990). Yoghurt: Ciencia y Tecnología. Acribia. Zaragoza España.

Tamime A. (1989). Rheology and microstructure of strained yoghurt made from cow's milk by three different methods. Food Microstructure. 8 (1) 125-135.

# **ANEXOS**

- 1.- VISCOSIMETRO RHEOMAT***
- 2.- HORNO DE MICROONDAS***
- 3.- SISTEMA DE FLUJO***

## ANEXO 1

### VISCOSIMETRO RHEOMAT

MARCA: CONTRAVES

MODELO: 108

#### CARACTERISTICAS GENERALES:

Las medidas de viscosidad efectuadas en el viscosímetro Rheomat tienen las siguientes características:

- Son reproductivas, repetitivas
- El esfuerzo cortante y velocidad de cizallamiento se miden directamente, así como la viscosidad aparente la cual esta expresada en milipascal por segundo, si esta lectura se multiplica por mil, nos proporciona valores de centipoise o pascal por segundo.
- Manejo de una amplia gama del gradiente de cizallamiento.
- Las medidas en el realizadas son, comparables con cualquier instrumento, las cuales pueden ser correlacionadas a la apreciación organoléptica del producto.

#### PRINCIPIO DE OPERACION

- 1) Es un viscosímetro de cilindros coaxiales compuestos de un cilindro interno, que gira con una velocidad de rotación constante dentro de un recipiente externo fijo.
- 2) El producto a estudiar se encuentra entre el cilindro de medición y el recipiente externo, el gradiente de cizallamiento, se considera constante como primera aproximación.
- 3) El reporte de la constante de cizallamiento sobre el gradiente de cizallamiento es la viscosidad, la cual se expresa en milipascal o centipoises.
- 4) Las medidas de viscosidad dependen de la temperatura, por lo que los productos deberán estabilizarse a una temperatura de medición, la cual se recomienda que sea de 10° C.
- 5) Entre cada muestra el cilindro y el recipiente externo, se deben desmontar, lavar con agua fría y secar, después de lavados y secados los recipientes de medida, deberán llevarse a la temperatura de medición (10°C).

#### DESCRIPCION DEL VISCOSIMETRO RHEOMAT

##### A) CABEZA DE MEDICION

- 1) Tecla p (paro)
- 2) Tecla p (arranque)
- 3) Botón de ajuste a cero.
- 4) Ficha de salida análoga al cople
- 5) Selector A  
Temperatura (T) [T°C]  
Torque de medición (M) [mNm]



Viscosidad ( $\mu$ ) [mPa\*seg]  
Tensión de cizallamiento ( $t$ ) [Pa]

- 6) Selector B: Número de cuerpo de medición
- 7) Selector C: Velocidad de rotación
- 8) Pantalla digital
- 9) Sonda Pt 100
- 10) Ficha de conexión del cargador
- 11) Fijación del soporte
- 12) Fijación del tubo de medición
- 13) Fijación del cuerpo de medición

**B) SISTEMA DE MEDICION**

- 14) Cuerpo de medición No. 1,2,3.
- 15) Tubo de medición
- 16) Control del nivel de líquido

**C) SOPORTE**

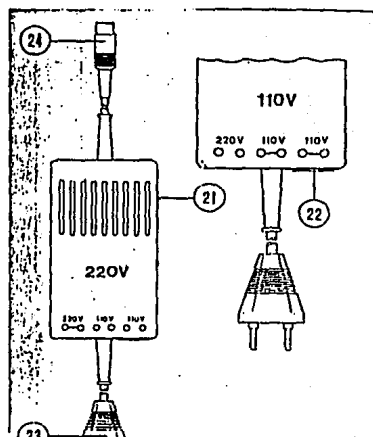
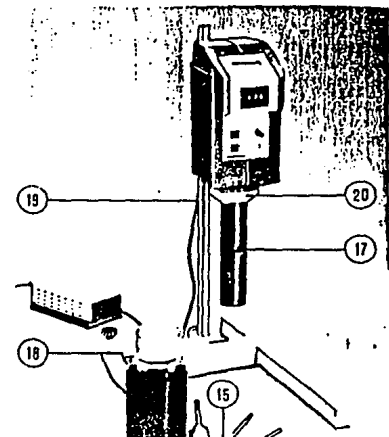
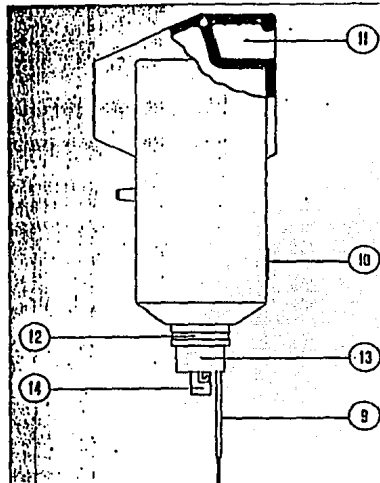
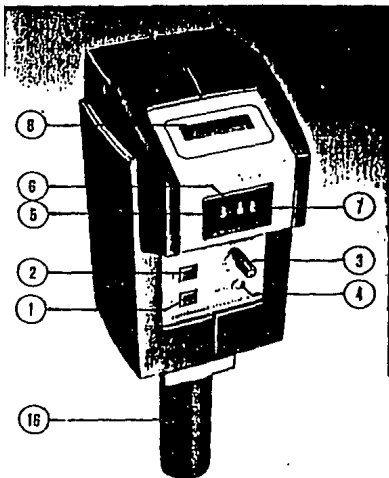
- 17) Base con tornillo de ajuste de nivel
- 18) Eje
- 19) Dispositivo de fijación con tornillo de bloqueo

**D) ADAPTADOR**

- 20) Indicador de control de funcionamiento
- 21) Tensión de la batería
- 22) Conexión de corriente
- 23) Ficha cabeza de media

**E) ACCESORIOS**

- Sistema de medición en acero inoxidable
- Tubos de aluminio a vfa única.



## MODO DE OPERACION

- A.- Conectar el aparato
- B.- Seleccionar el cuerpo de medición y recipiente exterior de acuerdo al producto a analizar.
- C.- Fijar el cuerpo de medición
- D.- Colocar el recipiente externo.
- E.- Ajustar a cero: Seleccionar el "torque" (M) y la velocidad 5 poner en marcha al aparato, hacer el ajuste ayudados por el botón 1 " 0 ". Apagar el equipo.
- F.- Seleccionar el parámetro a evaluar.
- G.- Retirar el recipiente externo, para llenarlo posteriormente hasta el nivel indicado con el producto a evaluar.
- H.- Unir el recipiente externo al aparato.
- I.- Accionar la rotación y efectuar la lectura después del tiempo establecido.

NOTAS: Las medidas de viscosidad son estrictamente dependientes de la temperatura a la cual se evalúa la muestra, la temperatura recomendada para la evaluación de este parámetro en el viscosímetro Rheomat es de 10°C; si la temperatura de medición esta comprendida entre 9 y 11°C, la medición es válida; en cambio si la temperatura es inferior a 9°C o superior a 11°C la medición no es válida, por lo que hay que repetir la medición con una nueva muestra a la temperatura recomendada.

La viscosidad depende de igual manera de la velocidad de cizallamiento, por lo que se debe utilizar siempre la misma velocidad para todas las mediciones que se tengan que comparar entre sí.

La determinación de viscosidad es destructiva, por lo que toda repetición necesita una nueva muestra.

La gama de velocidades de deformación a las que puede operar el equipo se encuentran ya establecidas por el mismo, y son las siguientes:

VELOCIDAD	Equivalencia en 1/segundos
1	17.72
2	27.19
3	41.72
4	63.99
5	98.16
6	150.63
7	231.06
8	354.50

## ANEXO 2

### HORNO DE MICROONDAS UTILIZADO PARA LA DETERMINACION DE SOLIDOS TOTALES.

HORNO: MICROWAVE SOLIDS AND MOISTURE ANALYZER

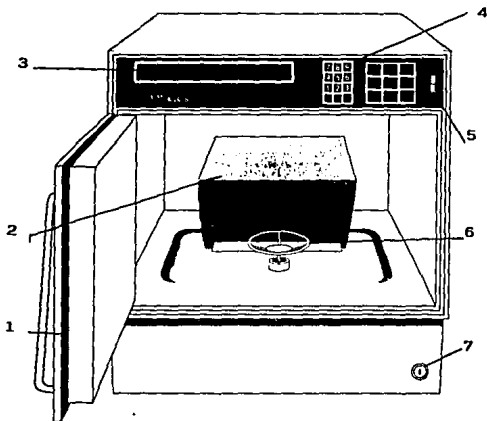
MARCA: CEM

MODELO:AVC-80

#### PRINCIPIO DE OPERACION

La muestra a evaluar se expone a una cantidad de calor y tiempo específicos; y por eliminación de la fracción de agua contenida en la muestra se obtiene el porcentaje de sólidos presente.

#### COMPONENTES OPERACIONALES



1-Puerta de exterior: Esta tiene la función de resguardar a la cavidad interior del medio exterior, aislando el material a evaluar de la humedad del medio ambiente.

2-Protector de la balanza: Previene la entrada de aire sobre la balanza, tiene la función de evitar alguna desviación de las lecturas por dicho flujo de aire.

3-Carátula: En esta pieza se puede observar tanto las instrucciones de operación como los resultados obtenidos en la evaluación de la muestra.

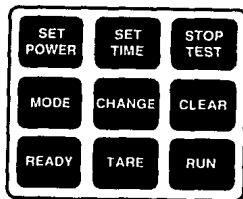
4-Llaves de trabajo: En este sitio se encuentran los controles de operación del horno; nivel de potencia, tiempo, y otros datos que pueden requerirse para la visualización de estos resultados en la carátula.

5-Interruptor de la corriente: encendido y apagado del equipo.

6-Balanza de medición: Es el sitio donde se colocan las muestras para su evaluación.

7-Llave de seguridad: Esta tiene la finalidad de poder restringir el uso del horno, pues solo con esta llave podrá ser accionado el equipo.

\*LLAVES DE TRABAJO:



-Con las teclas del 0 al 9, se puede fijar la potencia y tiempo de trabajo, o bien algunos otros datos numericos requeridos.

- Con la tecla "recall", se puede revisar algunos datos de las muestras recién evaluadas. (humedad inicial, humedad final y diferencia de humedad)
- Con la tecla "Water/Solids" se muestran en la carátula los valores del contenido de agua o sólidos estos datos, los resultados están expresados en porcentaje, teniendo que el porcentaje de sólidos + porcentaje de humedad= 100%
- La tecla "set power" controla el nivel de potencia a que se desea trabajar en el horno.
- La tecla "set time" controla el tiempo que se pretende tener a la muestra dentro del horno para su evaluación.
- La tecla "stop test" es utilizada para interrumpir alguna análisis, o bien volver a mostrar los datos recientemente obtenidos.
- Con la tecla "mode" se puede observar la relación de tiempo-potencia en la cual se está trabajando.
- La tecla "change" se utiliza para limpiar los parámetros de la carátula o bien para introducir un nuevo nivel de trabajo.
- La tecla "clear" se utiliza para limpiar la carátula cuando se introduce una nueva muestra.
- Con la tecla "ready" se puede introducir a la memoria los niveles de potencia y tiempo seleccionados.
- La tecla "tare" se utiliza para tarar la balanza cuando se coloca la muestra a evaluar.
- Con la tecla "run" se acciona el equipo y empieza el análisis de la muestra.

#### MODO DE OPERACION

- 1.-Conectar el aparato
  - 2.-Seleccionar el nivel de potencia y tiempo de exposición (esta combinación está en función del tipo de producto a analizar).
  - 3.-Retirar el protector de la balanza.
  - 4.-Depositar dos piezas de papel sobre la balanza, colocar el protector de la misma y proceder a tarar el equipo.
  - 5.-La muestra a evaluar se coloca de tal manera que ésta quede en medio de ambas piezas (esta operación se realiza fuera del equipo, se coloca la muestra sobre la superficie de un pliego y posteriormente se cubre con el otro), la muestra debe ser distribuirse perfectamente sobre toda la pieza de papel, la cantidad de muestra está en función del estado físico y contenido de agua del producto.
  - 6.-Colocar pliegos y muestra sobre la balanza de medición, colocar el protector de la balanza, cerrar perfectamente la puerta exterior y presionar la tecla "RUN" para empezar el análisis.
  - 7.-Una vez que terminó el análisis presionar la tecla "WATER/SOLIDS" con la finalidad de que los datos de la evaluación de la muestra aparezcan en la carátula.
  - 8.-Oprimir la tecla "CLEAN" para limpiar la memoria, si se requiere realizar otra evaluación empezar desde la indicación número 3.
- NOTA: Las muestras a evaluar deben colocarse en un papel especial llamado "sephadex", pues este presenta la textura y porosidad ideal para facilitar el trabajo del horno durante el análisis de las muestras.

### ANEXO 3

#### CONSIDERACIONES PARA LA INSTALACION, OPERACION Y MANTENIMIENTO DE LAS BOMBAS DE SISTEMA DE FLUJO.

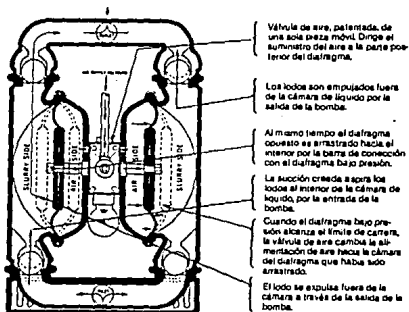
Este sistema cuenta con elementos muy delicados, como lo son las bombas; para no limitar el funcionamiento de éstas y con ello perder veracidad en los resultados obtenidos es necesario conocer su operación y mantenimiento.

En lo que se refiere a forma de trabajo de la bomba de doble diafragma:

El aire comprimido pasa por la cámara hasta el diafragma, el elastomero separa el aire desde la columna de líquido. Esta balanza remueve la tensión desde los diafragmas para permitir presiones muy altas.

El volúmen puede ser controlado por varios tipos de válvulas, desde pocos galones por hora, hasta varios galones por hora con la misma bomba.

No requiere de válvula de alivio debido a que la presión de la bomba nunca excederá la presión de suministro de aire. La bomba puede ser operada en seco sin ningún daño. Con el sistema de doble diafragma, se puede cambiar la velocidad a través de la bomba hasta la mitad de la velocidad de descarga.



Algunas consideraciones para esta bomba son las siguientes:

I) No deben de existir reducciones ni expansiones en la succión o descarga de la bomba, ya que esto ocasiona daños en su diafragma y con ello una disminución en la capacidad de la misma.

II) La bomba cuenta con un pequeño filtro, el cual sólo retiene

parcialmente a las impurezas contenidas en el aire, por lo que el aire a utilizar debe ser de excelente calidad, libre de humedad, basura y aceite, de lo contrario dicho filtro se satura fácilmente y afecta directamente a la válvula de aire adyacente a la bomba.

Existen varias opciones para resolver este problema:

a) En el caso de que el filtro se sature por basura; sumergirlo en algún disolvente, previo desmontaje de la válvula de aire.

b) En el caso de que se sature por agua, soplotearlo y agitarlo con movimientos verticales, de manera que el pistón contenido en el sistema válvula-filtro tenga de nuevo movilidad.

c) En el caso de haber migración de aceite, el problema es más serio, ya que este migrará hacia el material que se bombea, o bien, afecta la lubricación del pistón, provocando anomalías en el sistema válvula-filtro y cuando se presenta este problema, se debe llamar a un técnico especializado.

\*En todos los casos: No golpear externamente al pistón para volver a darle movilidad, pues por ser una pieza sumamente delicada se deteriora en esta operación.

\*Para los incisos 2 y 3; se pueden evitar estos problemas colocando filtros en sitios previos a la succión de la bomba, uno para eliminar el contenido de humedad presente en el aire, y otro para eliminar las partículas de aceite que pudiese contener; con esto se asegura que el filtro contenido en el cuerpo de la bomba no se sature rápidamente.

III) Cambio del pistón interno; la válvula de aire en su interior contiene un pequeño pistón, éste tiene un recubrimiento de aluminio el cual tiene la función de disminuir la fricción ocasionada entre el pistón y el cuerpo externo del mismo (fig. 21), cuando este recubrimiento se deteriora es necesario cambiar en su totalidad la pieza, pues es imposible desmontar-recubrir-montar dicha pieza ya que se dañan los sellos que resguardan la hermeticidad de la misma, pudiendo perderse el acoplamiento, el desgaste del recubrimiento trae como consecuencia la disminución en el gasto obtenido.

IV) Cambio del diafragma ; será necesario un cambio del mismo cuando la bomba haya funcionado aproximadamente 540 horas en condiciones normales de operación; se sabe que ya es tiempo de cambiar los diafragmas si hay una disminución notable en el gasto manejado, o bien por variaciones drásticas en el ritmo de trabajo de la bomba.

V) Desgaste del asiento ; esto se ocasiona cuando no existe compatibilidad entre el material bombeado y el material del cual está fabricada la bomba, o en su defecto, por la actividad normal del sistema, trayendo como consecuencia fugas de producto provenientes del cuerpo de la bomba, pues el asiento y la válvula de bola no tienen un sellado hermético, otra consecuencia del desgaste del asiento, es la disminución en el flujo manejado.



VI) Por la actividad normal de la bomba existe un desgaste de los anillos contenidos en la cavidad de la flecha por lo que es necesario renovarlos, la cavidad antes mencionada alberga a 7 anillos, para quitarlos no importa el orden en que esto se realice, pero para colocarlos si es importante dicho orden, ya que esto facilita la operación, por lo que se deben colocar de afuera hacia adentro, alternando uno por lado, de tal manera que el número 7 sea el de en medio, no sacar ningún anillo de su cavidad, éste se daña y forzosamente hay que renovarlo.

El cambio de anillo lo indica una fuga de aire, o un sonido anormal cuando la bomba este trabajando.

VII) Cuando se lave la bomba (siempre después de utilizarla con material abrasivo), se debe colocar en orden exacto, tanto el diafragma como el protector; así mismo verificar el sentido de la flecha contenida en el eje de la bomba, cuando se monta la bomba la dirección del cuerpo la determina el mismo sistema ya que solo hay una posibilidad de acople de la bomba, la cual es cuando todas las piezas estan en su sitio correcto.

\*Verificar continuamente:

- El estado en que se encuentran los diafragmas, así como los componentes de la válvula de bola (esferas y asientos).

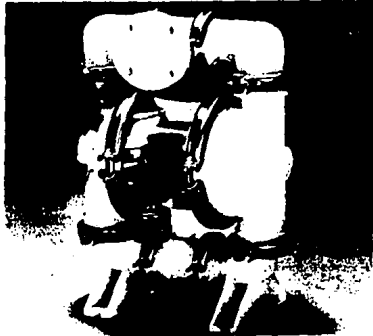
- El funcionamiento en general de la bomba, como lo son posibles fugas, sonidos anormales cuando está operando, y principalmente el gasto obtenido (el cual debe ser constante para cada presión manejada).

Componentes internos y secuencia de armado

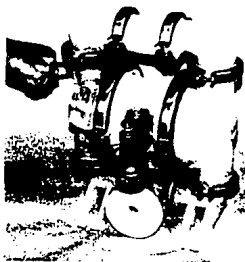
La bomba de doble diafragma consta básicamente de:

- Válvula de aire
- Válvula de bola
- Diafragmas internos

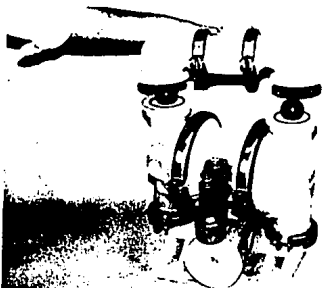
La siguiente figura muestra la bomba de doble diafragma.



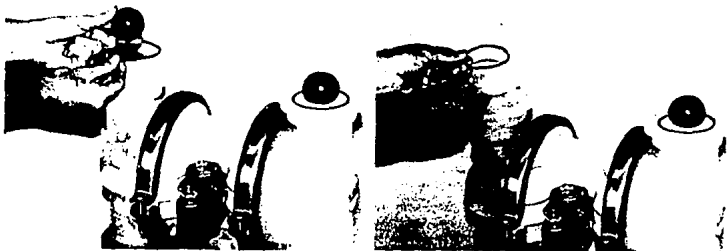
En las siguientes figuras se muestran los componentes internos y secuencia de armado para la limpieza de la bomba de doble diafragma.



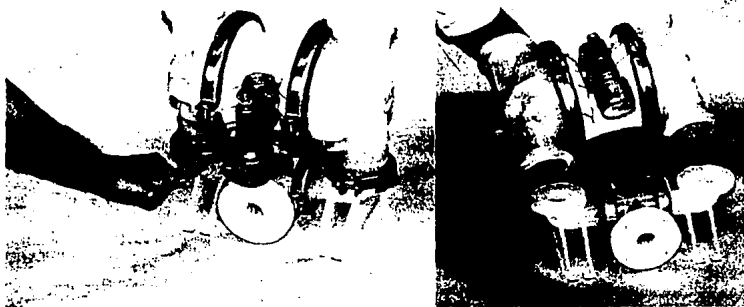
a) Desarmar las abrazaderas de la parte superior del cuerpo de la bomba.



b) Desmontar la parte superior del cuerpo de la bomba.



c) Con mucho cuidado también desmontar la válvula de bola, tomando en cuenta que dicha válvula esta compuesta por tres elementos, los cuales son, esferas, acientos, y empaques.



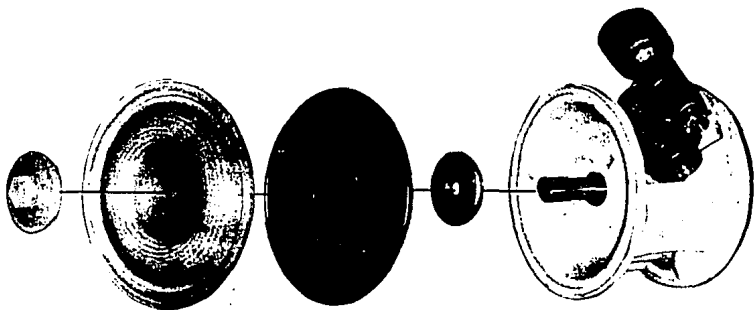
d) Desarmar las abrazaderas de la parte inferior del cuerpo de la bomba, para posteriormente quitar el cuerpo completo de la misma, teniendo cuidado de desprender los empaques que se encuentran en el fondo.



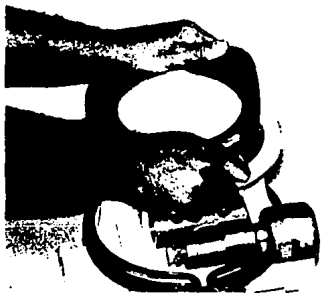
e) Desarmar las abrazaderas del cuerpo central de la bomba, con lo cual se tendrá "desnuda" la bomba.



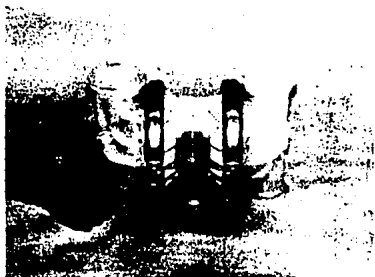
f) Desprender tanto los diafragmas como los soportes de éstos.



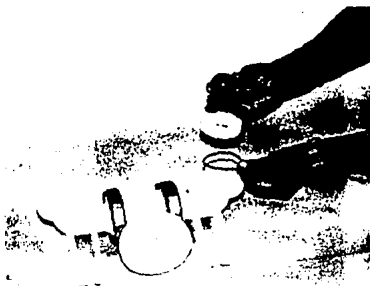
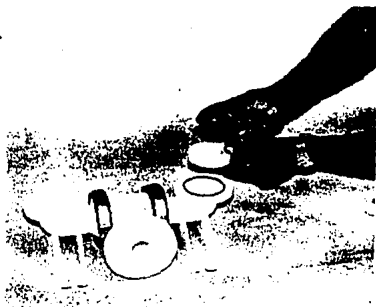
g) Proceder al lavado de estas partes (excepto aquella en donde se encuentra la válvula de aire), lo cual se realizará con agua comun y corriente.



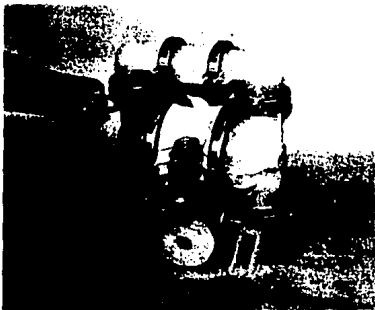
h) Para ensamblar la bomba, sólo hay que respetar las indicaciones de los soportes y de los diafragmas, ya que éstas partes tienen grabado "in" o "out", lo cual indica el sentido para la ubicación de los mismos.



i) Una vez colocados en su sitio los diafragmas, armarla y colocar las abrazaderas del cuerpo central de la bomba.



j) Colocar la válvula de bola en su sitio correcto.



k) Ensamblar toda la bomba , para posteriormente colocar las abrazaderas exteriores.

## BOMBA SINUSOIDAL

En lo que se refiere a la bomba Sinusoidal:

Esta bomba no es tan delicada en su mantenimiento como la anterior, por lo que las consideraciones para llevarlo a cabo son pocas, entre estas podemos encontrar:

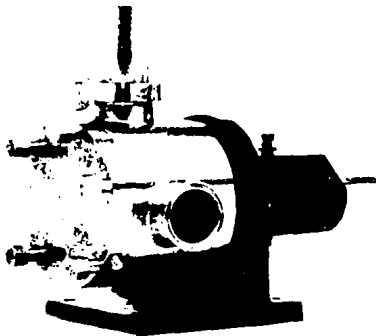
I) La bomba jamás debe arrancar en "seco", es decir siempre que se haga funcionar debe estar inundada o de lo contrario se quemará.

II) Para empezar a trabajar a una potencia dada es necesario que el aumento de la misma sea gradual y no bruscamente, lo mismo para su apagado, si nos encontramos trabajando a una potencia alta deberá disminuirse paulatinamente hasta cero antes de parar completamente el sistema.

III) El desmontaje de las piezas que conforman la bomba no debe ser frecuente de preferencia lo más espaciado posible, pues si bien es fácil realizar esta operación la mayoría de los piezas tienen cuerda y se corre el peligro de dañarla.

IV) Cuando se este lavando la bomba, operarla a una potencia de 70% ya que en este punto es donde el equipo sufre menos daño; esta operación se realiza únicamente cuando la bomba debe ser lavada sin necesidad de desarmarla cuando se manejen fluidos no abrasivos.

En la siguiente figura se muestra la bomba con sistema Sinusoidal.

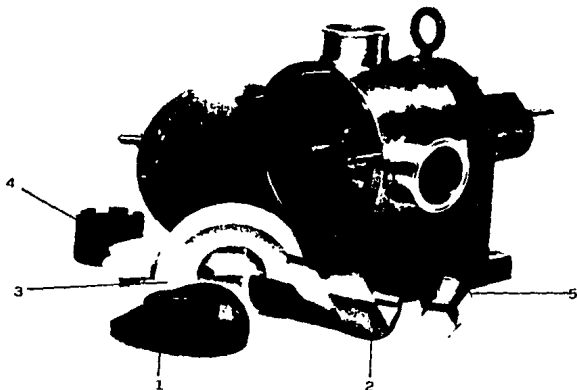




## Componentes internos y secuencia de armado.

En lo relacionado con las piezas internas que conforman la bomba tenemos:

- 1-Plato sinusoidal
- 2-Barra guía y cuerpo exterior de la misma.
- 3-Empaques contenedores
- 4-Empaque de seguridad
- 5-Tuerca base



Cuando esta bomba se tenga que desmontar para lavarse:

- a) Retirar las "grapas" de la placa de la bomba.
- b) Retirar la tuerca base, no forzando esta operación de lo contrario se puede "barrer" la cuerda de este elemento.
- c) Quitar el empaque de seguridad, para posteriormente continuar con el desarmado.
- d) Extraer el empaque contenedor que se encuentra más próximo a la entrada.
- e) Desalojar de manera conjunta, la barra guía y el plato sinusoidal, con suaves movimientos horizontales.
- f) Lavar con agua las piezas internas, (en una cubeta) el cuerpo contenedor de las partes se puede lavar con la ayuda de una manguera, (este no es posible moverlo ya que esta anclado).
- g) Para el ensamblaje de la bomba, primero colocar el empaque contenedor en el fondo del cuerpo, cuidando que ensamblen perfectamente.

h) La barra guía tiene grabado en sus costados que nos indica la orientación a la cual deberá colocarse de acuerdo a la posición en que se encuentre la succión y descarga de la bomba.

Las indicaciones son "Succión derecha" (SR) o "Succión izquierda" (SL), estas indicaciones deben coincidir con el cuerpo exterior de esta barra guía la cual tiene las mismas indicaciones, para el caso concreto de este trabajo deben coincidir con SR hacia el exterior del cuerpo de la bomba.

i) Colocar de manera conjunta la barra guía, el plato sinusoidal y el empaque de seguridad, todo esto sobre el eje del cuerpo de la bomba.

Jamás se debe forzar el acoplamiento de esta bomba ya que debe ser perfecto, cuando todas las piezas están colocadas en su sitio correcto.

j) Una vez que el acoplamiento es total, colocar la tuerca base.

k) Colocar la tapa exterior, y después las "grapas", esta operación es sumamente delicada ya que si no hay un buen acoplamiento esta pieza no podrá ser colocada, si esto sucede volver al inciso (i).