



11  
Leja

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
CUAUTITLAN**

**"DESARROLLO DE UN PROGRAMA EN MICROSOFT  
VISUAL BASIC PARA REALIZAR LOS BALANCES DE  
ENERGIA MECANICA EN LOS SISTEMAS DE  
BOMBEO EMPLEADOS EN PROCESOS  
ALIMENTICIOS"**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERA EN ALIMENTOS  
P R E S E N T A N :  
LILIA ALEJANDRA MUÑOZ GARCIA  
ARACELI ULLOA SAAVEDRA**

**ASESOR: I.A. FCO. JAVIER LOPEZ MARTINEZ.**

**CUAUTITLAN IZCALLI, EDO. DE MEX.**

26638A  
1998

**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 esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

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



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN  
UNIDAD DE LA ADMINISTRACIÓN ESCOLAR  
DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS

DR. JUAN ANTONIO MONTARAZ CRESPO  
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLÁN  
PRESENTE

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

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

Desarrollo de un Programa en Microsoft Visual Basic para  
realizar los balances de energía mecánica en los sistemas  
de bombeo empleados en procesos alimenticios.

que presenta la pasante: Lilia Alejandra Muñoz García  
con número de cuenta: 9460240-3 para obtener el TÍTULO de:  
Ingeniera en Alimentos

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

ATENTAMENTE.

"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"

Cuautitlán Izcalli, Edo. de Méx., a 24 de Abril de 1998

PRESIDENTE Dra. Laura P. Martínez Padilla

VOCAL M.en C. Ricardo P. Hernández García

SECRETARIO I.A. Francisco J. López Martínez

PRIMER SUPLENTE I.A. Laura M. Cortazar Figueroa

SEGUNDO SUPLENTE I.A. José L. Velázquez Ortega



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

ASUNTO: VOTOS **APROBATORIOS**

U. N. A. M.  
 DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES



**DR. JUAN ANTONIO MONTARAZ CRESPO**  
 DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLAN  
 PRESENTE

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

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

Desarrollo de un Programa en Microsoft Visual Basic para  
realizar los balances de energía mecánica en los sistemas  
de bombeo empleados en procesos alimenticios.

que presenta la pasante: Araceli Ulloa Saavedra  
 con número de cuenta: 9460224-5 para obtener el TITULO de:  
Ingeniera en Alimentos

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

ATENTAMENTE.  
 "POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"

Cuautitlán Izcalli, Edo. de Méx., a 24 de Abril de 1998

PRESIDENTE Dra. Laura P. Martínez Padilla

VOCAL M.en C. Ricardo P. Hernández García

SECRETARIO L.A. Francisco J. López Martínez

PRIMER SUPLENTE LA Laura M. Cortazar Figueroa

SEGUNDO SUPLENTE LA José L. Velázquez Ortega

# **AGRADECIMIENTOS**

*ARACELI Y LILIA*

Agradecemos a Dios por habernos permitido concluir ésta carrera y realizar éste trabajo , pero sobre todo porque fue un tiempo maravilloso para cultivar nuestra amistad.

**“ A ti, oh Dios de mis padres, te doy gracias y te alabo, porque me has dado sabiduría y fuerza...**

**Tú has conocido mi sentarme y mi levantarme;**

**Has entendido desde lejos mis pensamientos.**

**Y sobre mí pusiste tu mano.**

**Tal conocimiento es demasiado maravilloso para mí,**

**Alto es, no lo puedo comprender”.**

Dn. 2:22, Sal. 139:2,6

**¡ GRACIAS SEÑOR !**

**A Paco:**

Por todo el tiempo que dedicaste en la realización de ésta Tesis, por tu orientación, apoyo e invaluable amistad.

Gracias porque siempre tuvimos tu apoyo incondicional en los momentos difíciles y porque pusiste todo tu entusiasmo al igual que nosotros en ésta meta que realizamos por primera vez los tres.

Gracias por todas las horas de intenso trabajo que compartimos, por los días en los que no había tiempo de comer y tu fuiste solidario con nosotras, pero sobre todo gracias porque eres una persona excelente y un gran amigo con el que sabemos que podremos seguir contando a lo largo de nuestra vida, al igual que tú contarás con nosotras siempre (no creas que después de tanto tiempo te vas a librar de nosotras tan fácilmente).

**¡ GRACIAS POR TODO PACO!**

**A la Universidad:**

Por la formación y educación que hemos adquirido durante la carrera y porque de ella aprendimos que las metas solamente las alcanzan aquellos que luchan y que tienen la capacidad de levantarse cuando han caído.

**A la FES – Cuautitlán:**

Porque entre sus muros conocimos grandes amigos que contribuyeron en nuestro desarrollo profesional y personal.

**A todos los profesores:**

Que de una u otra forma aportaron sus conocimientos y consejos para nuestra formación durante nuestra etapa como estudiantes.

**A los sinodales:**

Por el empeño que tuvieron en revisar ésta Tesis, ya que de esta manera hemos valorado aún más nuestro trabajo, y con su colaboración y sugerencias nos permitieron mejorarlo.

¡GRACIAS!

Dra. Laura Patricia Martínez Padilla  
M. en C. Ricardo P. Hernández García  
I.A. Fco. Javier López Martínez  
I.A. Laura M. Cortazar Figueroa  
I.A. José Luis Velázquez Ortega

**A LAPRYFAL:**

Por habernos permitido utilizar las instalaciones y el equipo; y habernos soportado durante tanto tiempo.

Por último dedicamos ésta Tesis a todas aquellas personas que la utilicen, esperando sinceramente que les pueda ayudar y pretendiendo así seguir viviendo dentro de la FES Cuautitlán a través de ustedes.

**Gracias**  
**¡Ingeniería en Alimentos!**

# **AGRADECIMIENTOS**

*ARACELI*

**A Dios:**

Por permitirme llegar en éste momento tan importante de mi vida, rodeada de salud y amor.

**A mis Padres:**

Por su amor, respeto y comprensión, ya que me han ayudado a lograr mis metas y sobre todo a ser mejor persona.

**A mis Hermanas:**

Mónica y Rosalia, por su apoyo y por estar conmigo en los momentos más difíciles de mi vida.

**A mis Abuelitos:**

Tere, María y Oscar por todo su cariño y motivación para seguir adelante.

**A Lilia:**

Por tu amistad, confianza y entusiasmo para poder realizar una de nuestras metas y sobre todo por los gratos momentos que hemos pasado juntas.

**A Paco:**

Por tu amistad, orientación y apoyo para la realización de ésta Tesis.

# **AGRADECIMIENTOS**

*LILIA*

**A Dios:**

Por que me dio la gran oportunidad de estudiar ésta carrera y contar con su ayuda y dirección en todos los momentos de mi vida.

**Papi y Mami:**

Les agradezco todo el apoyo que me han brindado, su ayuda incondicional, su solidaridad con mis problemas, sus consejos, pero sobre todo gracias por el amor que siempre me han brindado el cual ha sido un impulso muy grande para lograr mis metas.

Puedo decirlo con mucho orgullo, ya que no hubiera podido lograr todo esto sin ustedes.

**¡Los amo! Lilia**

**Abuelita Angelina:**

Quiero dedicarte ésta Tesis, ya que eres la mujer más sabia que he conocido, y por eso lucharé cada día para parecerme más a Ti.

**A mis Hermanos:**

José Luis y Sergio, por su apoyo, su comprensión y su ayuda a lo largo de mi vida.

**A la Familia Hernández García:**

Por ser casi como mis padres y hermanos y preocuparse por mis estudios durante todo éste tiempo.

Gracias: Tío Gustavo, Tía Mary, Gus, Israel y Mayra

**Martha y Billy Ririe:**

Gracias por ser dos personas a las que quiero y admiro mucho, gracias por creer en mí y apoyar mis futuras metas.

**Paco:**

Gracias por todo el tiempo que dedicaste para ayudarnos, gracias por tu paciencia conmigo, pero sobre todo gracias por haberme permitido conocerte y contar con tu amistad.

**Araceli:**

Que puedo decirte, gracias por estos años en los que me has brindado tu amistad, gracias por aguantar mi carácter, mis arranques, mis enojos, mis bromas; en fin tu me conoces bien, solamente gracias por ser como eres Manzana y ....

**¡Gracias por compartir ésta meta conmigo!**

**Abif, Elizabeth y Chavita:**

Gracias por haberme brindado su amistad, gracias por todos los momentos alegres que pase con ustedes y gracias por que se que lucharemos por conservar ésta amistad.

**Abif, te amo**

**Elizabeth y Chavita, los quiero mucho.**

**Gracias a todos mis amigos:**

Que harán que nunca me olvide de la Universidad y que me permitieron formar parte de anécdotas que recordaré toda mi vida.

Gracias: Javier, Tomas, Rodrigo, Edna, Alaffita, Cuaxi, Ana, Abril, Lupita, Güera, Lupita Sosa, Maru, Rosalia, Martha, Rosy, Beto, Hilda...

## INDICE

	pág
Indice General	i
Indice de Cuadros	vi
Indice de Gráficas	vii
Indice de Figuras	vii
Nomenclatura	viii
Resumen	x
Introducción	xi
<b>CAPITULO 1. Desarrollo Teórico</b>	<b>1</b>
- Objetivo general	1
- Objetivos particulares	1
<b>CAPITULO 2. Antecedentes</b>	<b>2</b>
<b>2.1 Mecánica de fluidos</b>	<b>2</b>
- Fluido	2
- Reología	2
- Viscosidad	2
<b>2.2 Clasificación de Fluidos en función de su comportamiento reológico.</b>	<b>3</b>
- Fluido Newtoniano	3
- Fluido no-Newtoniano	4
- Fluidos Independientes del tiempo	4
1) Plástico de Bingham	4

2) Fluidos de la ley de la Potencia	5
a) Pseudoplásticos o Reofluidizantes	5
Indice de consistencia	5
Indice de comportamiento al flujo	5
b) Dilatantes	5
3) Fluidos Herschel-Bulkley	6
2.2.4 - Fluidos Dependientes del tiempo	6
1) Tixotrópicos	6
2) Reopécticos	6
2.2.5 - Ecuaciones de Fluidos	7
<b>2.3 Balance de Energía Mecánica</b>	<b>8</b>
2.3.1 - Trabajo	9
2.3.2 - Energía Potencial	9
2.3.3 - Energía Calorífica	9
2.3.4 - Energía de Presión	9
a) Presión	9
b) Presión atmosférica	9
c) Presión manométrica	10
d) Presión de vapor	10
2.3.5 - Energía Cinética	10
2.3.6 - Energía de Fricción	11
2.3.7 - Pérdidas por fricción	11
2.3.8 - Cálculo de pérdidas de presión en tramo recto de tubería	12
2.3.9 - Cálculo de pérdidas de presión en accesorios	12
- Accesorios en el sistema	14
- Número de Reynolds	15
- Flujo Laminar	16
- Flujo Turbulento	17

- Factor de fricción de Fanning	18
- Coeficiente de resistencia	20
<b>2.4 Criterios de dimensionamiento</b>	22
° Diámetro económico	23
° Velocidad recomendada	23
° Caída de presión permisible	23
<b>2.5 Criterios Heurísticos</b>	24
<b>2.6 Parámetros implicados en la selección de una bomba</b>	25
- Potencia de la bomba	27
- Presión de succión	27
- Presión de descarga	27
- NPSHd y NIPA	28
- Cabezal	29
<b>2.7 Tipos de Bomba</b>	29
- Bombas de desplazamiento positivo	29
- Bombas cinéticas	31
- Bombas de propulsión	32
<b>2.8 Formas de Estudiar un Procesos</b>	32
<b>2.9 Lenguaje de Programación</b>	
Microsoft Visual Basic	34
<b>2.10 Programación Orientada a Objetos</b>	36
- Objeto	37
- Herencia	37
- Clases	37
- Superclase	37

-Variables	37
Nombre	37
Tipo	37
Ámbito	38
Públicas	38
Privadas	38
- Generar el algoritmo de cálculo	39
- Estructuración del Programa	39
- Realización del Programa	40
- Compilación del Programa	41
- Validación del Programa	41
<b>CAPITULO 3. Desarrollo del Programa</b>	42
- Algoritmo de calculo	44
<b>CAPITULO 4. Estructura y Validación del Programa</b>	49
- Presentación	49
- Entrada de datos	49
- Resultados	49
- Información	49
- Despedida	49
- Estructura del Programa	50
- Validación del Programa	62
Problemas resueltos	62
° Fluido Newtoniano	62
° Fluido de la ley de la Potencia	85
° Fluido Herschel-Bulkley	108

## **CAPITULO 5. Conclusiones y**

<b>Recomendaciones</b>	136
5.1 Conclusiones	136
5.2 Recomendaciones	138
Bibliografía	139
Anexo	141

## INDICE DE CUADROS

	pág
CUADRO 1. Clasificación de fluidos en función de su comportamiento reológico	3
CUADRO 2. Resistencia en accesorios expresada como longitud equivalente en diámetro de conducto ( $L_e / D$ )	14
CUADRO 3. Clasificación de los tipos de bombas	29
CUADRO 4. Formas de estudiar un proceso	33
CUADRO 5. Comandos Básicos del lenguaje Visual Basic	40
CUADRO 6. Diámetros Recomendados	69
CUADRO 7. Comparación y validación del Fluido Newtoniano	132
CUADRO 8. Comparación y validación del Fluido de la ley de la Potencia	133
CUADRO 9. Comparación y validación del Fluido Herschel-Bulkley	134

## **INDICE DE GRAFICAS**

	pág
GRAFICA 1. Comportamiento de los fluidos	7
GRAFICA 2. Representación de Moody para cálculo del Factor de fricción para Fluidos Newtonianos	18
GRAFICA 3. Representación de Dodge y Metzner para cálculo del Factor de fricción para Fluidos de la Potencia	19
GRAFICA 4. Cálculo de $K_f$	22

## **INDICE DE FIGURAS**

FIGURA 1. Pérdidas por fricción en un tramo de tubería con y sin accesorios	13
FIGURA 2. Tipos de Flujo	17

## **INDICE DE GRAFICAS**

	pág
GRAFICA 1. Comportamiento de los fluidos	7
GRAFICA 2. Representación de Moody para cálculo del Factor de fricción para Fluidos Newtonianos	18
GRAFICA 3. Representación de Dodge y Metzner para cálculo del Factor de fricción para Fluidos de la Potencia	19
GRAFICA 4. Cálculo de $K_f$	22

## **INDICE DE FIGURAS**

FIGURA 1. Pérdidas por fricción en un tramo de tubería con y sin accesorios	13
FIGURA 2. Tipos de Flujo	17

## NOMENCLATURA

$c_p$  = calor específico (Kcal/kg°C)

$D$  = diámetro (m)

$E$  = rugosidad (m)

$E_c$  = energía cinética (Nm/kg)

$E_i$  = energía interna (Nm/kg)

$F_f$  = factor de fricción de Fanning (adimensional)

$g$  = aceleración de la gravedad = 9.81 (m/s<sup>2</sup>)

$g_c$  = 1 (kgm/Ns<sup>2</sup>)

$h$  = altura (m)

$H_{fs}$  = pérdidas de energía por fricción (Nm/kg)

$k$  = índice de consistencia (Pas<sup>n</sup>)

$K_f$  = coeficiente de resistencia de accesorios (adimensional)

$L$  = longitud (m)

$L_e$  = longitud equivalente (m)

$L_{max}$  = longitud máxima (m)

$m$  = masa (kg)

$n$  = índice de comportamiento al flujo (adimensional)

$NPSH_d$  = cabezal de presión de succión para bombas centrifugas (Pa)

$NIPA$  = cabezal de presión de succión para bombas de desplazamiento  
positivo (pa)

$P$  = presión (Pa)

$Q$  = calor (Kcal/h) o flujo volumétrico (m<sup>3</sup> /s)

$r$  = radio (m)

$Re$  = número de Reynolds (adimensional)

$Re_{gen}$  = número de Reynolds generalizado para fluidos de la potencia  
(adimensional)

$V$  = velocidad (m/s)

$V$  = volumen (m<sup>3</sup>)

$V_m$  = velocidad media (m/s)

$W_f$  = trabajo de flecha (Nm/kg)

$W$  = gasto másico (kg/h)

$Z$  = altura (m)

Símbolos:

$\alpha$  = corrección de la energía cinética (adimensional)

$\Delta$  = diferencia

$c_0$  = relación entre la fuerza necesaria para que un fluido se mueva y la fuerza aplicada (adimensional)

$\dot{\gamma}$  = velocidad de corte ( $s^{-1}$ )

$\phi$  = factor de corrección para fluido Herschel-Bulkley (adimensional)

$\mu$  = viscosidad (Pa.s)

$\mu_a$  = viscosidad aparente (Pa.s)

$\mu_p$  = viscosidad plástica (Pa.s)

$\rho$  = densidad ( $kg/m^3$ )

$\tau$  = esfuerzo cortante (Pa)

$\tau_0$  = esfuerzo cortante inicial ( $s^{-1}$ )

Subíndices:

1= inicial

2= final

Superíndice:

2 = cuadrado

## **RESUMEN:**

Este trabajo se realizó con la finalidad de que los estudiantes de la carrera de Ingeniero en Alimentos que estén cursando o hayan cursado las materias de Flujo de Fluidos y Laboratorio Experimental Multidisciplinario II, principalmente, puedan contar con una herramienta de apoyo para complementar los temas impartidos en las asignaturas respectivas.

También se pretende que los estudiantes una vez que hayan entendido los conceptos teóricos y prácticos de los fenómenos que ocurren y están involucrados a lo largo de la selección del equipo de bombeo, así como de la importancia que tienen las propiedades físicas y reológicas de un fluido alimenticio, hagan uso de este Programa para realizar los cálculos de manera más rápida y que además, en la medida de lo posible, reafirmen sus conocimientos sobre Mecánica de Fluidos.

Para la selección de un equipo de bombeo a nivel industrial, se requiere realizar una gran cantidad de cálculos previos para predecir el funcionamiento de todos los equipos. En muchas ocasiones, principalmente en la industria alimentaria, el tiempo dedicado a esto es excesivo, debido a que no existen nomogramas, gráficos, entre otras herramientas como las existentes para agua, que permiten reducir el tiempo de cálculo.

Con el programa desarrollado en el presente trabajo se predice el comportamiento de un sistema y la relación que se da entre el fluido alimenticio y el equipo seleccionado, ya que con los datos obtenidos el estudiante puede decidir bajo que condiciones de operación podrá envasar un fluido alimenticio con las cuales obtenga un mayor aprovechamiento de energía, lo cual se traduce en un aumento de la eficiencia del sistema.

## **INTRODUCCION:**

Hoy en día las computadoras se han convertido en una herramienta necesaria ya que economiza tiempo, facilita la resolución de problemas, y de esta manera ayuda a tomar decisiones adecuadas, de ahí la importancia de conocer lenguajes de programación como Visual Basic.

Se ha observado que existe una deficiencia en la formación académica de los estudiantes de la carrera de Ingeniero en Alimentos, en lo que respecta a conocimientos de computo, por lo que es recomendable que los estudiantes se familiaricen con el uso de computadoras, ya que es una parte fundamental que debe cubrir el perfil de un egresado.

Este Programa, se diseñó con el objetivo de reducir el tiempo empleado para la selección del diámetro de tubería y del sistema de bombeo de fluidos alimenticios en función de la capacidad del equipo de envasado.

Para facilitar el entendimiento de los resultados obtenidos por el programa, la información del presente trabajo se divide en tres partes:

En la primera se proporcionan:

° Conceptos básicos y definiciones sobre mecánica de fluidos y programación.

En la segunda parte se presenta:

° El algoritmo de cálculo utilizado para la resolución de problemas con fluidos de diferentes comportamientos reológicos, tanto Newtoniano como No-Newtoniano.

Y finalmente, en la tercera parte:

° Se presentan ejemplos resueltos para diferentes fluidos así como una comparación con los resultados obtenidos con el programa para validarlo.

Durante la realización de este trabajo se observó la importancia que tiene la programación con lenguajes de computo como un apoyo para la resolución de problemas de Ingeniería. Cabe mencionar que el programa cuenta con esquemas, los cuales facilitan el entendimiento de los fenómenos involucrados en la selección de un equipo de bombeo.

Además, el programa está complementado con la información más relevante de mecánica de fluidos, programación, así como del algoritmo de cálculo utilizado para la realización de éste, una serie de problemas resueltos para validarlo y facilitar al usuario el entendimiento de la estructura del mismo.

Por otra parte el enfoque de esta Tesis es el de utilizar los principios de la mecánica de fluidos y realizar algunas aplicaciones de tales principios a problemas prácticos. El énfasis principal se pone en las propiedades de los fluidos, flujo de fluidos en tuberías y selección de bombas.

El enfoque que se ha utilizado anima al estudiante a involucrarse en el aprendizaje de los principios de la mecánica de fluidos y programación en los siguientes puntos:

1. El entendimiento de conceptos.
2. El reconocimiento del planteamiento lógico de la solución de problemas.
3. La habilidad de entender los detalles requeridos en la resolución de problemas.
4. La habilidad de criticar el diseño de un sistema dado y de recomendar mejoras.
5. La habilidad de diseñar sistemas de Bombeo prácticos y eficientes.

Cabe considerar que la mayor parte de los conocimientos necesarios para entender los puntos anteriores, son proporcionados y cubiertos por las asignaturas teóricas respectivas.

Se tiene la experiencia de que los estudiantes, a menudo, se les dificulta la resolución de algunos problemas. Por esta razón, se realiza este Programa, que además de contener información, presenta los resultados de una manera fácil de entender y a su vez fácil de interpretar junto con el texto, ya que los conceptos son presentados en un lenguaje claro y en la resolución de problemas se presentan los procedimientos paso a paso.

Con este trabajo se pretende animar a los estudiantes a utilizar la computadora en la resolución de problemas de mecánica de fluidos, así como su utilización en las diferentes materias de la carrera.

# **CAPITULO 1**

## **DESARROLLO TEÓRICO**

**OBJETIVO GENERAL:** Elaborar un Programa de Computo que permita realizar los cálculos necesarios para la selección adecuada de un Sistema de Bombeo mediante el lenguaje de programación Visual Basic.

**Objetivo Particular 1:** Establecer los conceptos básicos de Mecánica de Fluidos así como del lenguaje de programación Visual Basic para la selección de equipos de bombeo mediante una Revisión Bibliográfica.

**Objetivo Particular 2:** Realizar el Programa para la selección de un equipo de bombeo utilizando las ecuaciones obtenidas de la revisión bibliográfica e implementándolas en el lenguaje de programación Visual Basic.

**Objetivo Particular 3:** Validar el Programa mediante la comparación de los resultados obtenidos con el Programa y los obtenidos en forma manual.

# **CAPITULO 2**

## **ANTECEDENTES**

## **2.1 MECÁNICA DE FLUIDOS.**

El término **mecánica de fluidos** se refiere al estudio del comportamiento de los fluidos, ya sea en reposo o en movimiento<sup>1</sup>.

**FLUIDO:** Es una sustancia que no tiene la capacidad de resistirse a fuerzas o esfuerzos de corte sin sufrir un desplazamiento, mientras que un sólido sí puede hacerlo. Los fluidos se clasifican generalmente en líquidos y gases. Un líquido está sometido a fuerzas intermoleculares que lo mantienen unido de tal manera que su volumen es definido pero su forma no. Cuando se vierte un líquido dentro de un recipiente, ocupará dentro de éste un volumen igual al suyo propio sin importar la forma del recipiente. Los líquidos son ligeramente compresibles y su densidad varía poco con la temperatura o la presión. Un gas, por otra parte, consta de partículas en movimiento que chocan unas con otras y tratan de dispersarse de tal modo que un gas no tiene forma ni volumen definidos y llenará completamente cualquier recipiente en el cual se coloque<sup>2</sup>.

**REOLOGÍA:** Es la ciencia que estudia la deformación y el flujo de la materia, incluyendo los problemas de elasticidad, viscosidad y fluidez.

**VISCOSIDAD ( $\mu$ ):** La viscosidad expresa la facilidad que tiene un fluido para fluir cuando se le aplica una fuerza externa. El coeficiente de viscosidad absoluta, o simplemente la viscosidad de un fluido es una medida de su resistencia al deslizamiento o a sufrir deformaciones internas, y se calcula como:

$$\mu = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (1)$$

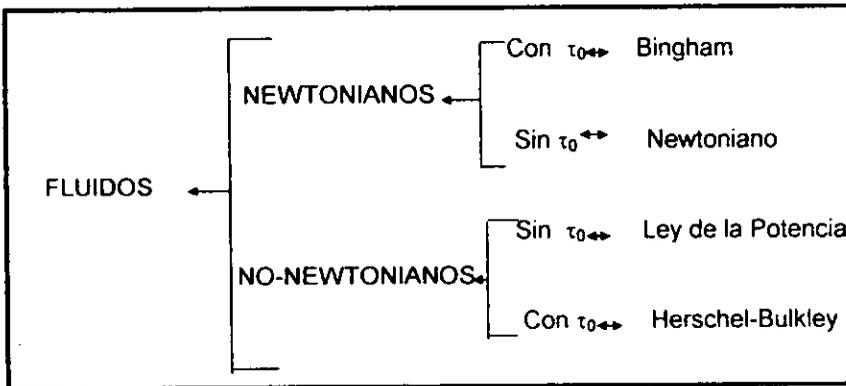
---

<sup>1</sup> Mott, 1996

<sup>2</sup> Hughes, 1978

En algunos fluidos la viscosidad depende de la fuerza que se haya realizado sobre ellos, y como no todos los fluidos tienen el mismo comportamiento cuando se someten a cizallamiento, ni la rapidez de deformación en cualquier esfuerzo cortante es igual, se pueden clasificar de la siguiente forma:

## 2.2 CLASIFICACIÓN DE FLUIDOS EN FUNCIÓN DE SU COMPORTAMIENTO REOLÓGICO <sup>3</sup>.



CUADRO 1: CLASIFICACIÓN DE FLUIDOS EN FUNCIÓN DE SU COMPORTAMIENTO REOLÓGICO

**FLUIDO NEWTONIANO:** Son aquellos en los que la viscosidad es una constante independiente de la velocidad de corte o de la fuerza de corte aplicada. Estos fluidos son representados matemáticamente mediante la ecuación de la ley de Newton de viscosidad:

$$\tau = \mu \dot{\gamma} \quad (2)$$

Donde:

$\tau$  = esfuerzo cortante (Pa)

$\mu$  = viscosidad (Pa·s)

$\dot{\gamma}$  = velocidad de corte (s<sup>-1</sup>)

<sup>3</sup> Steffe, 1992

**FLUIDO NO-NEWTONIANO:** Cuando un fluido no presenta el comportamiento descrito por la ecuación 2 se trata de un fluido no-Newtoniano. Los fluidos no-Newtonianos pueden dividirse en dos categorías principales en base a su comportamiento de  $\tau / \dot{\gamma}$  :

- 1.- Fluidos en los que el esfuerzo cortante es independiente del tiempo o duración de la acción cortante (independientes del tiempo).
- 2.- Fluidos en los que el esfuerzo cortante depende del tiempo o duración de la acción cortante (dependientes del tiempo).

Además de su comportamiento no lineal en la relación de esfuerzo cortante - velocidad de corte, algunos fluidos no-Newtonianos también tienen características elásticas (de sólido) que son una función del tiempo y como resultado reciben el nombre de fluidos viscoelásticos.

#### **\* FLUIDOS INDEPENDIENTES DEL TIEMPO<sup>4,11</sup> :**

Son aquellos en los que el valor de la viscosidad no cambia con respecto al tiempo de observación, siempre y cuando la velocidad de corte sea constante. Algunos de los fluidos que siguen este comportamiento son:

**1) PLÁSTICO DE BINGHAM.**- Difieren de los Newtonianos en que para iniciar su deformación requieren de un exceso de cierto valor del esfuerzo cortante llamado límite de fluidez ( $\tau_0$ ). El esfuerzo cortante inicial ( $\tau_0$ ) se define como la fuerza mínima requerida para iniciar el movimiento o desplazamiento de un fluido. Algunos fluidos tienen un límite de fluidez alto, tales como: puré de durazno, pasta de pescado y pasta cocinada de almidón.

---

<sup>4</sup> Geankoplis, 1993

<sup>11</sup> Rao, 1995

2) FLUIDOS DE LA LEY DE LA POTENCIA.- (Ostwald de Waele) La viscosidad no es constante y su valor depende de la velocidad y del esfuerzo de corte aplicado, por lo que se le denomina viscosidad aparente. Estos fluidos a su vez se dividen en:

a) PSEUDOPLÁSTICOS o REOFLUIDIZANTES.- La mayoría de los fluidos no-Newtonianos pertenecen a esta categoría e incluyen concentrado de jugo de frutas, jugo de manzana sin pectina (de 50 a 65 °Brix), jugo de fruta de la pasión (de 15.6 a 33.4 °Brix), jugo de naranja (de 60 a 65 °Brix) malteada de chocolate, Mostaza francesa, según Rao. La curva de flujo por lo general puede representarse mediante la función logarítmica 3 denominada de Ostwald de Waele):

$$\tau = k \dot{\gamma}^n \quad n < 1 \quad (3)$$

donde:

k = índice de consistencia (Pas<sup>n</sup>)

n = índice de comportamiento al flujo (adimensional)

$\dot{\gamma}$  = velocidad de corte (s<sup>-1</sup>)

$\tau$  = esfuerzo cortante (Pa)

INDICE DE CONSISTENCIA (k): Representa la resistencia que ejerce un fluido No-Newtoniano para ser deformado o para iniciar su movimiento. Cuando n = 1, k = viscosidad en el caso de los fluidos Newtonianos.

INDICE DE COMPORTAMIENTO AL FLUJO (n): Representa la dependencia de la consistencia del fluido, es decir, conforme "n" aumenta, el comportamiento del fluido se asemeja más a un sólido

b) DILATANTES.- Estos son mucho menos comunes que los pseudoplásticos y su comportamiento al flujo muestra un aumento de la viscosidad

aparente, al elevar la velocidad cortante. Casi siempre se puede aplicar la expresión logarítmica de la ecuación anterior pero cuando  $n > 1$ . Algunas soluciones dilatantes son la harina de maíz, la azúcar en solución y almidón en agua<sup>11</sup>.

**3) HERSCHEL-BULKLEY**.- Una característica importante de los fluidos Herschel-Bulkley es que presentan un esfuerzo cortante inicial y requiere de una fuerza finita que le permita fluir. Por debajo de esta fuerza se comporta como un sólido. Esta característica es muy importante para diseñar procesos y asegurar la calidad de los productos.

Algunos ejemplos de fluidos que presentan dicho comportamiento son: salsa catsup, salsas molidas mexicanas, mayonesas bajas en calorías, aderezos y sopas tipo crema<sup>15</sup>. Al igual que los fluidos de la potencia, estos se comportan como Pseudoplásticos y Dilatantes después de haber sobrepasado el  $\tau_0$ .

**\* FLUIDOS DEPENDIENTES DEL TIEMPO<sup>3,4</sup> :**

**1) TIXOTRÓPICOS**.- Estos fluidos exhiben una disminución reversible del esfuerzo cortante y la viscosidad con respecto al tiempo cuando la velocidad de corte es constante. Este esfuerzo cortante tiende a un valor límite que depende de la velocidad cortante. Entre los principales ejemplos pueden incluirse las mayonesas, leche condensada azucarada y algunos tipos de almidones<sup>15</sup>.

**2) REOPÉCTICOS**.- Son muy raros y exhiben un aumento reversible del esfuerzo cortante y la viscosidad con respecto al tiempo cuando la velocidad de corte es constante. Algunos ejemplos son soles, mieles y soluciones con un mínimo de 40% de algodón<sup>3</sup>.

---

<sup>11</sup> Rao, 1995

<sup>15</sup> Zuñiga, 1991

<sup>3</sup> Steffe, 1992

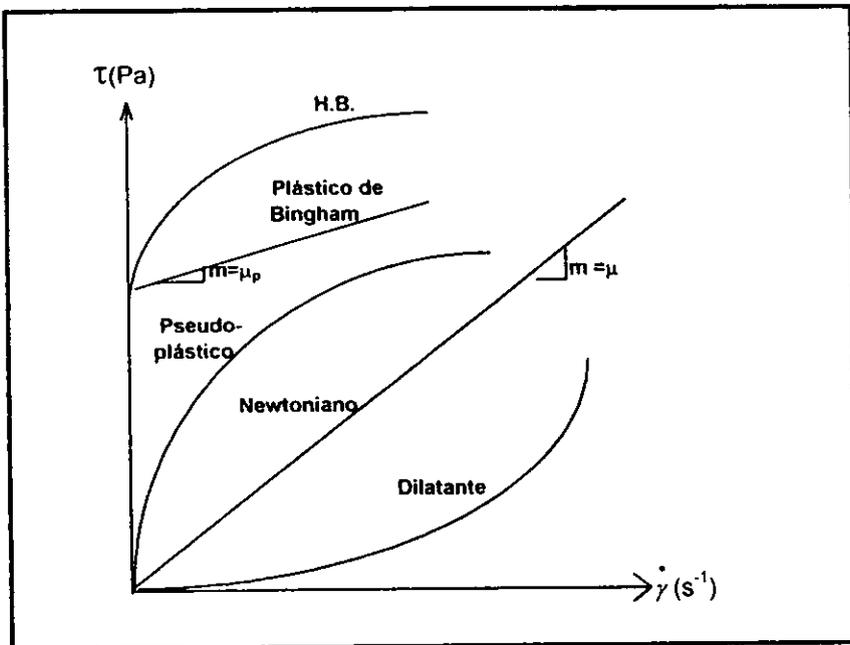
<sup>4</sup> Geankoplis, 1993

En algunos procedimientos de diseño para fluidos tixotrópicos y reopécticos, cuando se trata de flujo estable en tuberías, se usan los valores límite de las propiedades de flujo a velocidad de corte constante.

**ECUACIONES DE LOS FLUIDOS:**

- \* Newtonianos  $\tau = \mu \dot{\gamma}$
- \* Bingham  $\tau = \tau_0 + \mu_p \dot{\gamma}$
- \* H.B.  $\tau = k\dot{\gamma}^n + \tau_0$
- \* Potencia  $\tau = k\dot{\gamma}^n$

En la siguiente gráfica se muestran las tendencias generales que siguen cada uno de los diferentes tipos de fluidos.



**GRÁFICA 1. COMPORTAMIENTO DE LOS FLUIDOS<sup>1</sup>**

Es importante conocer el comportamiento de los fluidos ya que esto influye en la selección adecuada del equipo que se requiere para el transporte de dichos fluidos, debido a que en muchas ocasiones el desconocimiento de dicho comportamiento provoca la selección inadecuada de equipo y trae como consecuencia que los fluidos tengan problemas como, rompimiento de su estructura o de partículas que tengan en suspensión, así como sobrecalentamiento del fluido y/o del equipo provocando pérdidas de productos, económicas y daños en el equipo. Es por esto que se hace necesario realizar los balances de energía mecánica con las ecuaciones adecuadas para cada uno de los fluidos.

### **2.3 BALANCE DE ENERGÍA MECÁNICA <sup>4</sup> .**

La Energía Mecánica es un termino de interés para los ingenieros, ya que incluye al termino de trabajo, a la energía cinética, a la energía potencial y a la parte de trabajo de flujo del termino de entalpía.

La energía mecánica es una forma de energía que es, o bien un trabajo, o bien una forma que puede transformarse directamente en trabajo.

Los términos de calor y energía interna, no permiten una conversión simple en trabajo debido a la segunda ley de la termodinámica y a la eficiencia de la conversión. Los términos de energía mecánica no tienen esta limitación y pueden convertirse casi, en su totalidad, en trabajo.

La energía que se convierte en calor o energía interna es trabajo perdido o una pérdida de energía mecánica causada por la resistencia friccional al flujo (pérdidas por fricción).

Es conveniente escribir un Balance de Energía Mecánica en función de los términos anteriores<sup>21</sup>:

---

<sup>3</sup> Steffe, 1992

<sup>4</sup> Geankoplis, 1993

<sup>21</sup> Martinez, 1994

$$\frac{P_1}{\rho} + Z_1 \frac{g}{gc} + \frac{V_{m1}^2}{2agc} + Ei_1 + Wf = \frac{P_2}{\rho} + Z_2 \frac{g}{gc} + \frac{V_{m2}^2}{2agc} + Ei_2 + Q + Hfs \quad (4)$$

Una vez obtenida esta ecuación general del Balance de Energía Mecánica, a continuación se describirán los términos del mismo, donde el comportamiento reológico influye de manera determinante.

TRABAJO (Wf): Es la energía necesaria proporcionada por un equipo para producir el movimiento de un líquido en un sistema de tuberías.

ENERGÍA POTENCIAL (Zg/gc): Es la cantidad de energía disponible, para mover un líquido almacenado. Esta se produce como resultado de la altura de una columna de líquido dentro de un recipiente multiplicado por la fuerza de gravedad.

ENERGÍA CALORÍFICA (Q): Cantidad de calor transferido entre el fluido y el medio ambiente.

ENERGÍA DE PRESIÓN (P/ρ): Energía que ejerce el medio ambiente sobre la superficie de un líquido contenido dentro de un recipiente.

a) Presión: La presión en un fluido en reposo se define como la fuerza de compresión que actúa sobre un área del fluido. La fuerza de presión produce que un fluido en movimiento, sufra una aceleración. Existen diferentes tipos de presión, las más importantes pueden ser:

b) Presión atmosférica: Presión ejercida por una columna de aire sobre una superficie.

c) Presión manométrica: Es la presión ejercida por un líquido sobre las paredes de un recipiente, la cual es medida con un instrumento llamado manómetro. Si la presión medida es menor a la atmosférica se le llama presión de vacío.

d) Presión de vapor<sup>1</sup>: Cuando un líquido se introduce en un recipiente cerrado, las moléculas de dicho líquido se evaporan en el espacio que está por encima y lo llenan por completo. Después de un tiempo se establece un equilibrio. Este vapor ejerce una presión al igual que un gas y a esta presión se le puede llamar *Presión de Vapor* del líquido.

El valor de la presión de vapor es independiente de la cantidad del líquido en el recipiente siempre y cuando haya algo de líquido presente.

Si un gas inerte como el aire también está presente en el espacio del vapor, su efecto sobre la presión de vapor del líquido es muy bajo. En general, el efecto de la presión del aire sobre la presión de vapor puede considerarse como despreciable, para presiones de unas cuantas atmósferas o menos.

La presión de vapor de un líquido aumenta notablemente al elevarse la temperatura. Por ejemplo, la presión de vapor del agua a 50°C es 12.333 Kpa (92.51mmHg) y a 100°C, la presión de vapor aumenta en alto grado a un valor de 101.325 Kpa (760mmHg).

ENERGÍA CINÉTICA: Es la energía presente debida al movimiento de un fluido cuya velocidad ( $V$ ) se encuentra en una sola dirección (axial) y sólo varía en la sección transversal, como se observa en la ecuación 5, la cual está expresada en coordenadas cilíndricas:

---

<sup>1</sup> Mott, 1996

$$Ec = \frac{vdv}{\alpha g_c} \quad (5)$$

$\alpha$  = Término relativo a la energía cinética que toma en cuenta el efecto de la distribución de la velocidad en el caudal de flujo sobre la energía cinética promedio.

**ENERGÍA DE FRICCIÓN:** Es la energía que pierde un fluido en régimen laminar al ser transportado por una tubería<sup>1</sup>.

### **PÉRDIDAS POR FRICCIÓN (Hfs)<sup>1</sup> :**

Cuando un fluido se desplaza uniformemente por una tubería recta, larga y de diámetro constante, la configuración del flujo indicada por la distribución de la velocidad sobre el diámetro de la tubería adopta una forma característica. Cualquier obstáculo en la tubería cambia la dirección de la corriente en forma total o parcial, alterando la configuración característica de flujo y ocasionando turbulencia, causando una pérdida de energía mayor de la que normalmente se produce en un flujo por una tubería recta. Ya que las válvulas y accesorios en una línea de tuberías alteran la configuración de flujo se produce una pérdida de presión adicional.

Las pérdidas totales de presión debidas a la fricción contemplan a las longitudes rectas del sistema (Hfs<sub>tramo recto</sub>), pero si en el sistema de flujo existen diversos "obstáculos", tales como accesorios, variaciones bruscas de diámetro, válvulas o aparatos de medida de flujo, es preciso realizar el cálculo de las pérdidas en accesorios (Hfs<sub>accesorios</sub>)<sup>16</sup> y en equipos si es que los hay. Estas pérdidas se calculan con la ecuación 6:

$$Hfs = \sum \frac{2fV_m^2 L}{g_c D} + \sum_{a=1}^b \frac{K_f V_m^2}{12\alpha g_c} + Hfs_{\text{equipo}} \quad (6)$$

<sup>1</sup> Mott, 1996

<sup>16</sup> Bird, 1993

Algunos manuales, como el preparado por la división de Ingeniería de Crane, citan la ecuación 6 sin el término de  $\alpha$ , ya que se considera que en flujo turbulento  $\alpha$  es igual a 1.

Donde:

$f$  = factor de fricción de Fanning.

$V_m$  = Velocidad media

$L$  = longitud

$D$  = diámetro.

$K_f$  = factor de pérdida, coeficiente de resistencia de accesorios.

### **Cálculo de Pérdidas de presión en tramo recto de tubería:**

La ecuación 7 es la ecuación general para calcular pérdidas por fricción en ductos circulares y es la siguiente:

$$H_{fs} = \frac{\Delta P}{\rho} = \frac{4V_m^2 L}{g_c D} \left( \frac{f}{2} \right) \quad (7)$$

### **Cálculo de Pérdidas de presión en accesorios:**

Para calcular la caída de presión total producida por una válvula o accesorio, se deben considerar los siguientes aspectos (figura 1):

- 1) La pérdida de presión dentro de la válvula.
- 2) La pérdida de presión en la tubería de entrada.
- 3) La pérdida de presión en la tubería de salida.

Desde el punto de vista experimental es difícil medir las tres caídas de presión por separado. Sin embargo, su efecto combinado es la cantidad deseada y puede medirse exactamente con métodos bien conocidos.

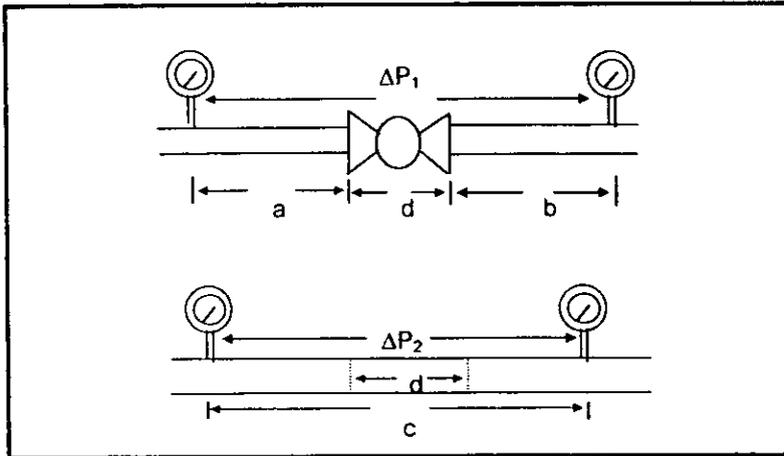


FIGURA 1. PERDIDAS POR FRICCIÓN EN UN TRAMO DE TUBERÍA CON Y SIN ACCESORIO<sup>5</sup>.

En la figura 1 se muestran dos tramos de tubería del mismo diámetro y longitud. El tramo superior contiene una válvula de globo. Si las pérdidas de presión  $\Delta P_1$  y  $\Delta P_2$  se miden entre los puntos indicados se encuentra que  $\Delta P_1$  es mayor que  $\Delta P_2$ .

En realidad la pérdida de presión debida a la válvula de longitud "d" es  $\Delta P_1$  menos la pérdida de presión ocasionada por el tramo de tubería con longitud "a+b". La  $\Delta P$  de la válvula es mayor a la caída de presión en el tramo de tubería "d", esto es debido a que la longitud del accesorio no provoca la misma caída de presión que el tramo recto de tubería de longitud "d".

Para que exista la misma caída de presión en ambos tramos de tuberías, la longitud total del segundo tramo debe ser mayor; para calcular este valor de longitud es necesario definir el termino longitud equivalente ( $L_e$ ) para accesorios.

<sup>5</sup> Crane, 1990.

## CAPITULO 2 ANTECEDENTES

La longitud equivalente es la longitud del tramo recto de tubería que produce la misma caída de presión que el accesorio, siempre y cuando sean del mismo diámetro. Para calcular la longitud equivalente, se puede utilizar la relación  $Le/D$ .

El valor de  $Le / D$  es una constante para cada tipo de accesorio tomado en la *zona de completa turbulencia* (Cuadro 2).

TIPO	$Le / D$
Válvula de Globo completamente abierta	340
Válvula de ángulo completamente abierta	150
Válvula de compuerta completamente abierta	9
Válvula de mariposa completamente abierta	45
Codo estándar de 90°	30
Codo estándar de 45°	16
Te estándar con flujo a través de un tramo	20
Te estándar con flujo a través de una rama	60

CUADRO 2. RESISTENCIA EN ACCESORIOS, EXPRESADA COMO LONGITUD EQUIVALENTE EN DIÁMETRO DE CONDUCTO, PARA RÉGIMEN TURBULENTO ( $Le / D$ ). Mott, 1996

### **Accesorios en el sistema<sup>1</sup> :**

Los elementos que controlan la dirección o la rapidez de flujo de un fluido en un sistema, típicamente establecen turbulencias locales en el fluido, ocasionando que la energía se disipe en forma de calor. Estas pérdidas de energía se presentan siempre que haya una restricción, un cambio de velocidad de flujo o un cambio en su dirección. En un sistema grande, las pérdidas debidas a la presencia de válvulas y conectores es, por lo general, pequeña en comparación

---

<sup>1</sup> Mott, 1996

con las pérdidas por fricción en los conductos. Por consiguiente, a tales pérdidas se les conoce como pérdidas menores.

Se dispone de muchos tipos diferentes de válvulas y uniones de varios fabricantes para especificación e instalación en sistemas de flujo de fluidos. Las válvulas se utilizan para controlar la cantidad de flujo y pueden ser válvulas de globo, de ángulo, de mariposa, otros varios tipos de válvulas de verificación y muchas más. Las uniones dirigen la trayectoria de flujo u ocasionan un cambio en el tamaño de la trayectoria de flujo. Se incluyen los codos de varios diseños, tes, reductores, boquillas y orificios

Para poder calcular las pérdidas de presión tanto en accesorios como en tuberías es necesario calcular el Factor de fricción para el fluido en el régimen de flujo correspondiente.

Para establecer el régimen de flujo es necesario calcular el número de Reynolds.

Osborne Reynolds fue el primero en demostrar que el movimiento y la caída de presión de un fluido en flujo laminar o turbulento puede ser predicho si se conoce la magnitud de un número adimensional, conocido ahora como número de Reynolds.

Se ha demostrado que el régimen de flujo en tuberías depende del diámetro de la tubería, de la densidad, la viscosidad del fluido y de la velocidad de flujo. El valor numérico de una combinación adimensional de estas cuatro variables, conocido como número de Reynolds, puede considerarse como la relación entre las fuerzas dinámicas del fluido con respecto a los esfuerzos de deformación ocasionados por la viscosidad. El número de Reynolds puede calcularse a partir de las siguientes ecuaciones 8 y 9:

Para fluidos Newtonianos en tuberías:

$$Re = \frac{DV_m\rho}{\mu} \quad (8)$$

Para fluidos No-Newtonianos en tuberías:

$$Re_{gen} = \frac{D^n V^{2-n} \rho}{8^{n-1} k} \left( \frac{4n}{3n+1} \right)^n \quad (9)$$

Donde:

$\rho$  = densidad, que es la cantidad de masa (m) por unidad de volumen (V) de una sustancia. Se calcula de la siguiente manera<sup>1</sup>.

$$\rho = m / V$$

$\mu$  = viscosidad

D = diámetro de la tubería

V = velocidad

k = índice de consistencia

n = índice de comportamiento al flujo

Para estudios técnicos, el régimen de flujo para líquidos en tuberías se considera como laminar si el número de Reynolds es menor que 2100 y turbulento si el número de Reynolds es superior a 10,000.<sup>4</sup> Entre estos dos valores está la zona denominada "crítica" donde el régimen de flujo es de transición.

Flujo Laminar: El tipo de flujo que existe a velocidades más bajas que la crítica se conoce como régimen laminar y a veces como régimen viscoso. Este régimen se caracteriza por el desplazamiento de capas cilíndricas concéntricas una sobre otra de manera ordenada. La velocidad del fluido es máxima en el eje de la tubería y disminuye rápidamente hasta anularse en la pared de la tubería<sup>5</sup>.

<sup>1</sup> Mott, 1996

<sup>4</sup> Geankoplis, 1993

<sup>5</sup> Crane, 1990

**Flujo Turbulento:** A velocidades mayores que la crítica, el régimen es turbulento. En el régimen turbulento hay un movimiento irregular e indeterminado de las partículas del fluido en direcciones transversales a la dirección principal del flujo; la distribución de velocidades en el régimen turbulento es más uniforme a través del diámetro de la tubería, siempre hay una pequeña capa de fluido en la pared de la tubería, conocida como la capa periférica o subcapa laminar, que se mueve en régimen laminar.

El término de flujo laminar se usa como sinónimo para indicar que un fluido fluye en láminas o capas, en oposición al flujo turbulento en el cual las componentes de la velocidad tienen fluctuaciones turbulentas al azar que se imponen sobre sus valores medios.

Lo que determina si un flujo es laminar o turbulento es la velocidad y la configuración o tamaño del ducto. A medida que la velocidad aumenta el flujo cambiará de laminar a turbulento, pasando por un régimen de transición. Los tres tipos de flujo ocurren en la naturaleza, pero el turbulento parece ser el más común<sup>5</sup>.

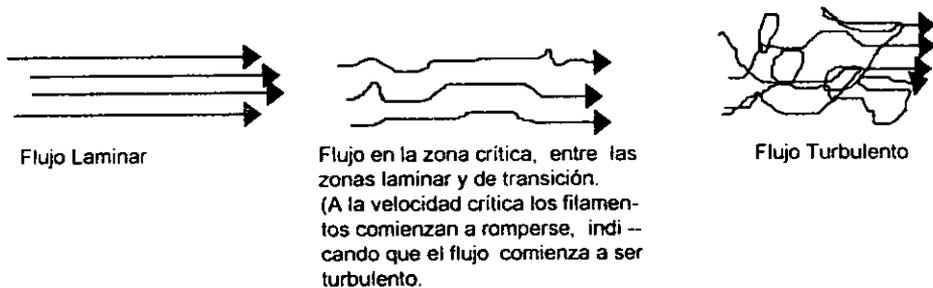


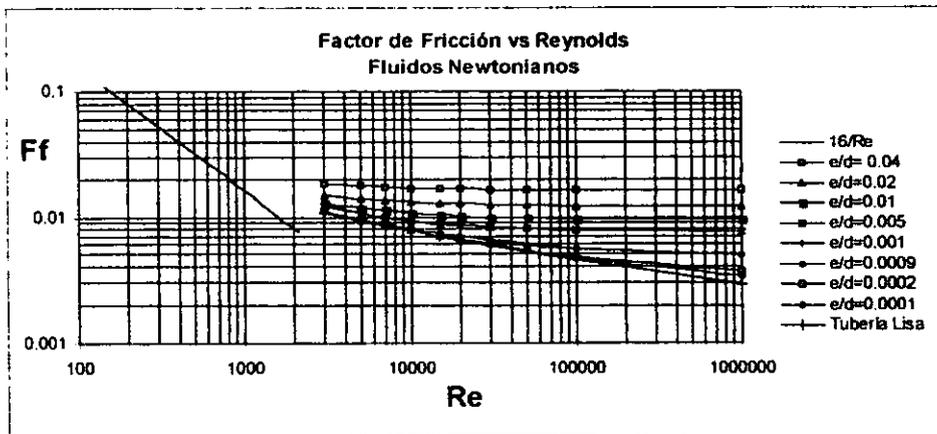
FIGURA 2: TIPOS DE FLUJO<sup>5</sup>

<sup>5</sup> Crane, 1990

Factor de Fricción de Fanning (Ff): Representa la fricción o rozamiento que sufre un fluido con las paredes de la tubería y entre sus capas, debido a su viscosidad lo cual crea una tensión de corte. La energía del fluido se pierde mediante la acción de vencer a las fuerzas de fricción producidas por la tensión de corte, la forma de calcularse experimentalmente se realiza a partir de la ecuación 10:

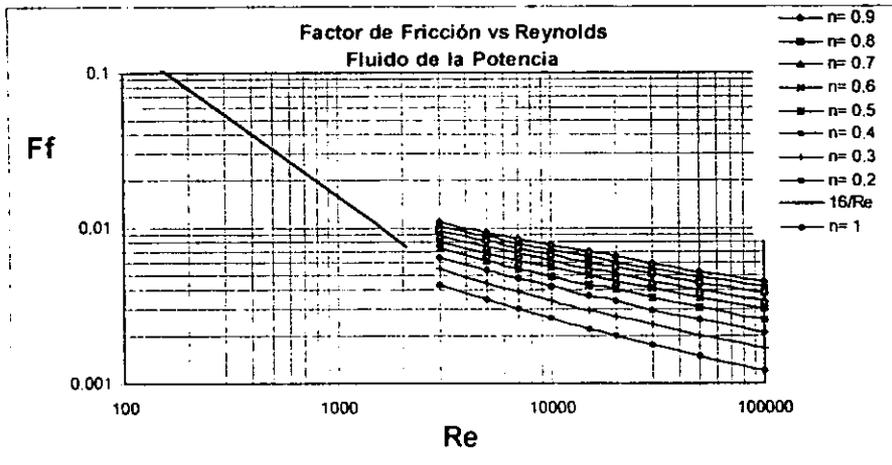
$$Ff = \frac{\Delta P D g_c}{\rho V_m^2 2L} \quad (10)$$

Existen formas teóricas de calcular el factor de fricción, lo cual puede ser a partir de gráficas y ecuaciones, aunque cada una depende del tipo de fluido y del régimen de flujo.



GRÁFICA 2. Representación de Moody para cálculo del Factor de Fricción para fluidos Newtonianos <sup>17</sup>

<sup>17</sup> Cheremisinoff, 1988



GRÁFICA 3. Representación de Dodge y Metzner para cálculo del Factor de fricción para Fluidos de la Potencia (Basada en la ecuación de von Karman-Nikuradse<sup>17</sup>)

El factor de fricción en régimen turbulento en tuberías se puede calcular mediante las siguientes ecuaciones:

a) para fluidos Newtonianos se calcula con la ecuación de Colebrook<sup>8</sup> de la siguiente manera:

$$\frac{1}{\sqrt{Ff_{DARCY}}} = 1.14 - 0.869 \ln \left( \frac{E}{D} + \frac{9.38}{Re \cdot \sqrt{Ff}} \right) \quad (11)$$

b) para fluidos que siguen la Ley de la Potencia se utiliza la ecuación de Dodge y Metzner<sup>17</sup> :

$$\frac{1}{\sqrt{Ff}} = \left[ \frac{4}{n^{0.75}} * \log \left( Re_{gen} * Ff^{\left(1 - \frac{n}{2}\right)} \right) \right] - \left[ \frac{0.4}{n^{1.2}} \right] \quad (12)$$

<sup>17</sup> Chermisinoff, 1988

\* Stanley, 1988

y en régimen laminar para Fluidos Newtonianos (ecuación 13) y de la Potencia (ecuación 14), son :

$$Ff_{FANNING} = \frac{16}{Re} \quad (13)$$

$$Ff_{FANNING} = \frac{16}{Re_{gen}} \quad (14)$$

Para fluidos Herschel-Bulkley en régimen laminar, el factor de fricción se calcula con la siguiente ecuación<sup>18</sup>:

$$Ff_{FANNING} = \frac{16}{\varphi Re_{gen}} \quad (15)$$

Donde:

$\varphi$ : es el Factor de corrección que se utiliza para el calculo de la velocidad media debido al perfil de velocidades para fluidos Herschel-Bulkley .

$$\varphi = (1 + 3n)^n (1 - \varepsilon_0)^{1/n} * \left[ \frac{(1 - \varepsilon_0)^2}{1 + 3n} + \frac{2\varepsilon_0(1 - \varepsilon_0)}{1 + 2n} + \frac{\varepsilon_0^2}{1 + n} \right]^n \quad (16)$$

Donde:

$\varepsilon_0$  : Es la relación de la fuerza necesaria para que un fluido empiece su movimiento y la fuerza aplicada para producir su movimiento.

Una vez establecidas las ecuaciones para el calculo del factor de fricción en cualquier régimen de flujo para algunos fluidos. Se presenta a continuación los métodos utilizados para calcular el coeficiente de resistencia de accesorios (kf).

**COEFICIENTE DE RESISTENCIA (Kf):** Es un coeficiente de pérdida de fricción, que se utiliza para calcular las pérdidas de presión cuando un fluido

<sup>18</sup> Steffe y colaboradores, 1986

pasa por un accesorio, las cuales también se pueden calcular a partir de la longitud equivalente ( $L_e$ ) de tubería recta.

El  $K_f$  no tiene unidades, pues representa una constante de proporcionalidad entre la pérdida de energía y la cabeza de velocidad. La magnitud del  $K_f$  depende de la geometría del dispositivo que ocasiona la pérdida y algunas veces depende de la velocidad de flujo<sup>1</sup>.

El  $K_f$  se puede calcular mediante las ecuaciones propuestas por Steffe, Mohamed y Ford para fluidos pseudoplásticos en régimen laminar<sup>11</sup>:

Para válvula de tres vías:

$$K_f = 30.3 \text{ Re}^{-0.492} \quad (17)$$

Para Te:

$$K_f = 29.4 \text{ Re}^{-0.504} \quad (18)$$

Para Codo de 90°:

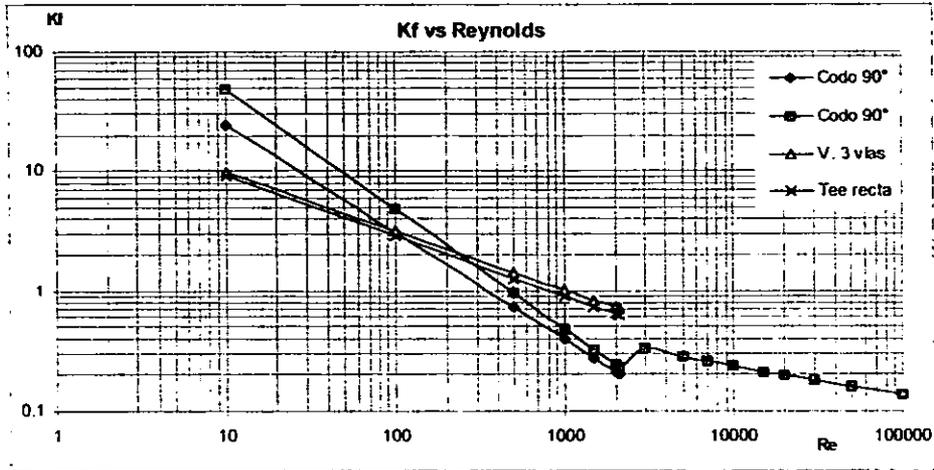
$$K_f = 191.0 \text{ Re}^{-0.896} \quad (19)$$

---

<sup>1</sup> Mott, 1996

<sup>11</sup> Rao, 1995

O mediante la siguiente gráfica obtenida de las ecuaciones anteriores:



GRÁFICA 4. Cálculo de Kf ( Rao 1995, Steffe 1984 )

o bien, experimentalmente mediante ecuación 20:

$$K_f = \frac{2\Delta P}{\alpha \rho v^2} \quad (20)$$

Para poder calcular la potencia necesaria para la selección de un equipo de bombeo es necesario contar con el diámetro de la tubería, así como la longitud de tubería entre los equipos. Estos datos se pueden obtener utilizando los criterios Heurísticos y de Dimensionamiento.

## 2.4 CRITERIOS DE DIMENSIONAMIENTO<sup>15</sup>.

Estos criterios están enfocados básicamente a la selección del diámetro de tubería. Para utilizar alguno de estos criterios es importante conocer el gasto o flujo volumétrico para llevar a cabo la selección del diámetro de tubería.

Estos criterios son:

<sup>15</sup> Zuñiga, 1991

° **Diámetro económico:** Se fundamenta en la aplicación del balance económico entre los costos de tubería, estación de bombeo y operación (costos mínimos anuales). A una velocidad de flujo fija, la inversión en tuberías y accesorios se incrementa en forma directa al tamaño de tubería mientras que los costos de operación y estación de bombeo decrecen con el incremento de tamaño de tubería. La selección del diámetro de tubería se puede realizar mediante gráficas o ecuaciones.

° **Velocidad recomendada:** El criterio de velocidad recomendada se fundamenta en la prevención de la corrosión y erosión de las paredes de las tuberías y accesorios, la cual se puede presentar por diversos factores tales como: interacción química fluido-metal, materiales suaves en tuberías, presencia de sólidos abrasivos, etc. En el caso de carecer de datos se recomienda de manera general velocidades máximas de 2m/s aproximadamente.

° **Caída de presión permisible (para evitar la cavitación del sistema de bombeo):** Este criterio se fundamenta en el manejo de fluidos monofásicos, siendo establecidos como una función de variables intrínsecas al proceso (presión del sistema) y del fluido (presión de vapor).

La limitante en este caso es evitar alcanzar la presión de vapor del alimento, ya que esto produciría cavitación del equipo de bombeo.

$$\Delta P_{\text{permisible}} = P_{\text{sistema}} - P_{\text{vapor}} \quad (21)$$

La relación entre la caída de presión permisible y las pérdidas de presión por unidad de longitud, proporciona la longitud máxima de tubería que debe haber antes de la bomba.

$$L_{\text{max}} = \Delta P_{\text{permisible}} / (\Delta P_{\text{fricción}} / L) \quad (22)$$

Teniendo todos los cálculos y balances realizados, se puede continuar con la selección del equipo de bombeo que será necesario para un fluido determinado. Es importante conocer todos los aspectos involucrados para la selección de éste.

## **2.5 CRITERIOS HEURÍSTICOS<sup>8</sup> .**

El diseño heurístico es un método que se apoya en el resultado obtenido de alternativas y experiencias anteriores similares. De estas experiencias se puede deducir una serie de reglas empíricas o heurísticas que, de ser seguidas, conducirán a la selección de la mejor alternativa en la mayoría de los casos. Dichas reglas son empleadas durante la toma de decisiones cuando se afronta una nueva situación, suponiendo, aunque sin demostrarlo, que las reglas siguen siendo válidas bajo las nuevas condiciones de diseño.

Los criterios heurísticos son un complemento para la ubicación del equipo, que permiten que este sea colocado dentro del área calculada de una Planta Industrial, sin embargo, estas reglas o criterios también permiten calcular un costo estimado, pero si no se tiene la suficiente experiencia este costo puede ser mayor.

El uso de las reglas heurísticas se encuentra muy extendido en el diseño de equipos. Reglas heurísticas muy conocidas son las que han seguido al emplear las velocidades recomendadas en el diseño de redes de tuberías; o al diseñar un intercambiador de calor (ITC) con la caída de presión y con una temperatura mínima de diseño previamente establecidas.

A pesar de conocerse excepciones que van claramente en contra de dichos criterios, es indiscutible que estas reglas siguen siendo útiles y ahorran una gran cantidad de esfuerzo y dinero, sobre todo en las etapas iniciales del diseño de un

---

\* Stanley, 1988

proceso, donde resultaría muy oneroso analizar todas y cada una de las alternativas posibles.

Es importante tomar en cuenta algunas consideraciones para dichos criterios, como son las siguientes:

- ° La separación entre el piso y la tubería más baja
- ° El tramo de tubería unido al tanque
- ° El tramo de tubería entre tanque y bomba
- ° La distancia recomendada entre un tanque y el equipo más próximo
- ° El tanque debe tener una separación con respecto al piso.

## **2.6 PARAMETROS IMPLICADOS EN LA SELECCIÓN DE UNA BOMBA<sup>1,9</sup>.**

Cuando se selecciona una bomba para una aplicación particular, se deben considerar los siguientes factores:

1. La naturaleza del líquido que se va a bombear.
2. La capacidad requerida (velocidad de flujo de volumen)
3. Las condiciones en el lado de la succión (entrada) de la bomba.
4. Las condiciones en el lado de la descarga (salida) de la bomba.
5. La cabeza total de la bomba.
6. El tipo de sistema al que la bomba está entregando el fluido.

---

<sup>1</sup> Mott, 1996

<sup>9</sup> Dover, 1987

7. El tipo de fuente de alimentación (motor eléctrico, motor de diesel, turbina de vapor, etc).
8. Limitaciones de espacio, peso y posición.
9. Condiciones ambientales.
10. Costo de la bomba y de su instalación.
11. Costo de la operación de la bomba.
12. Códigos y estándares que rigen las bombas.

La naturaleza del fluido está caracterizada por su temperatura en las condiciones de bombeo, es importante tener datos de su gravedad específica, viscosidad, tendencia a generar corrosión o erosión en las diferentes partes de la bomba y su presión de vapor a la temperatura de bombeo. El término de presión de vapor se utiliza para definir la presión en la superficie libre de un fluido debido a la formación de un vapor. La presión de vapor se eleva conforma a la temperatura del líquido se eleva, y es esencial que la presión a la entrada de la bomba permanezca por arriba de la presión de vapor del fluido.

Después de la selección de la bomba, se deben especificar los siguientes puntos:

1. Tipo de bomba y fabricante.
2. Tamaño de la bomba.
3. Tamaño de la conexión de la succión y tipo (de borde, roscada, etc).
4. Tamaño y tipo de la conexión de descarga.
5. Velocidad de operación.
6. Especificaciones de la alimentación (por ejemplo: para un motor eléctrico-potencia requerida, velocidad, voltaje, fase, frecuencia, tamaño del armazón, tipo de estructura).
7. Tipo de acoplamiento, fabricante, número del modelo.
8. Características de montaje.
9. Materiales y accesorios especiales que se requieren si los hay.
10. Diseño del sellado de la flecha y materiales del sellado.

Los catálogos de las bombas y los representantes de los fabricantes proporcionarán la información necesaria para ayudar en la selección y especificación de las bombas y del equipamiento de los accesorios.

**POTENCIA DE LA BOMBA:** La potencia se define como la energía necesaria para realizar un trabajo. En mecánica de fluidos se considera que es la rapidez con que la energía esta siendo transferida <sup>1</sup>.

**PRESIÓN DE SUCCIÓN:** La entrada o sistema de succión debe ser capaz de permitir la entrada a la bomba de un flujo parejo de líquido a una presión suficientemente alta para evitar la formación de burbujas en el fluido. A medida que la presión en un fluido disminuye, la temperatura a la cual se forman burbujas de vapor también disminuye. Por lo tanto, es esencial que la presión de succión a la entrada de la bomba tenga un valor más elevado que la presión a la cual se presentaría vaporización a la temperatura de operación del líquido.

Si se le permite a la presión de succión disminuir hasta el punto donde se presenta vaporización, se crea **cavitación** dentro de la bomba. En lugar de un flujo permanente de fluido, la bomba tomará una mezcla de vapor y líquido, provocando que disminuya la entrega. Además, a medida que las burbujas de vapor ingresan en la bomba, éstas encuentran presiones mayores que provocan que las burbujas se colapsen en forma muy rápida. Lo anterior puede resultar en ruido excesivo, vibración y un desgaste de las diferentes partes de la bomba <sup>1</sup>.

**PRESION DE DESCARGA:** Es la presión del líquido que se requiere a la salida de la bomba. Este valor se calcula a partir del Balance de Energía <sup>10,18</sup>.

---

<sup>1</sup> Mott, 1996

<sup>10</sup> García, 1986.

<sup>18</sup> Steffe, 1986.

NPSHd Y NIPA<sup>1,15</sup>: Las bombas no pueden operar adecuadamente si la presión a la entrada de ésta es insuficiente para llenar su cavidad. Esta presión denominada "Presión de Entrada Neta Requerida" en  $N/m^2$  o  $lb/in^2_{abs}$ , se determina experimentalmente y se publica para cada bomba por el fabricante. El NPSH o NIPA requerido es función del diseño de la bomba y varía primordialmente con la velocidad de la bomba y la viscosidad del fluido.

Esta presión de entrada neta requerida se compara con la presión de entrada neta disponible, que se calcula investigando el lado de entrada del sistema de bombeo, es decir, calculando la presión de succión en la bomba.

Los fabricantes proporcionan datos acerca de la cabeza de succión positiva neta que se requiere para una operación satisfactoria. La persona que seleccione una bomba debe asegurarse que existe un NPSH o NIPA disponible lo suficientemente grande. Esto es:

NPSH disponible > NPSH requerido

NIPA disponible > NIPA requerido

El valor de NPSH disponible depende de la naturaleza del fluido que se esté bombeando, la tubería de succión, la ubicación del depósito del fluido y la presión aplicada al fluido en el depósito.

NOTA: La diferencia que existe entre el NIPA y NPSH es el tipo de bomba que se va a utilizar el NPSH es para bombas centrífugas y el NIPA para bombas de desplazamiento positivo.

---

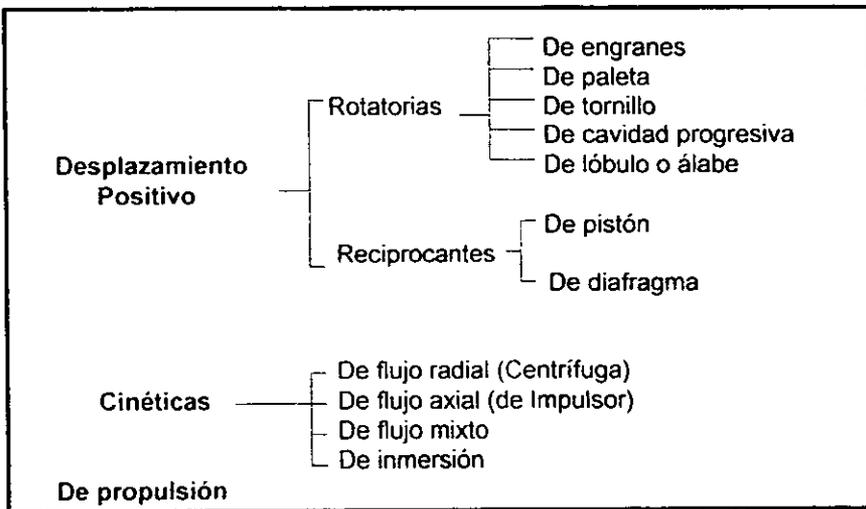
<sup>15</sup> Zuñiga 1991.

**CABEZAL<sup>1</sup>**: Es la energía o trabajo que debe realizar la bomba para mover un fluido a través de un sistema.

$$\text{CABEZAL} = P_{\text{descarga}} - P_{\text{succión}} \quad (23)$$

## 2.7 TIPOS DE BOMBA<sup>1</sup>.

Los tipos de bombas comúnmente utilizados para el paso del fluido pueden clasificarse como se muestra en el cuadro 3:



CUADRO 3. CLASIFICACIÓN DE LOS TIPOS DE BOMBAS<sup>1</sup>

**BOMBAS DE DESPLAZAMIENTO POSITIVO:** Entregan una cantidad fija de fluido en cada revolución del rotor de la bomba. La mayoría de éstas bombas pueden manejar líquidos con altas viscosidades.

<sup>1</sup> Mott, 1996

**BOMBAS ROTATORIAS:** Conforme se incrementa la presión, se presenta una ligera disminución en capacidad debido a una derrama interna de lado de alta presión al lado de baja presión.

- a) De engranes: Comprende dos engranes fuertemente unidos que giran en el sentido de las manecillas del reloj dentro de una estructura. El fluido ingresa desde el depósito de alimentación en el puerto de succión y se transporta por los espacios entre los dientes de los engranes al puerto de descarga, en donde se entrega a alta presión al sistema.
  
- b) De paleta: Consiste en un rotor excéntrico que contiene un juego de paletas deslizantes que se mueven dentro de la estructura. Un anillo de álabe en la estructura controla la posición radial de las paletas. El fluido ingresa al puerto de succión a la izquierda y después se captura en un espacio entre dos paletas consecutivas y es así transportado al puerto de descarga en el sistema de presión.
  
- c) De tornillo: Operan a una velocidad nominal de 3000 lb/in<sup>2</sup>, pueden correr a altas velocidades y operan en una forma más silenciosa que la mayoría de otros tipos de bombas hidráulicas.
  
- d) De Cavidad Progresiva: Produce un flujo parejo, no pulsado y se utiliza la mayoría de las veces en la entrega de fluidos en procesos más que en aplicaciones hidráulicas. A medida que el rotor largo central se mueve dentro del estator, se forman cavidades que aumentan hacia el extremo de la descarga de la bomba que transporta el material que se está manejando. Este tipo de bomba puede manejar una gran variedad de fluidos incluyendo agua, corrientes con un alto contenido de sólidos, líquidos altamente viscosos tales como puré de manzana o aún masa de pan.

## CAPITULO 2 ANTECEDENTES

- e) De lóbulo o álabe: Opera en forma similar a la bomba de engranes. Los dos rotores que giran en el sentido de las manecillas del reloj pueden tener dos, tres o más lóbulos que se junten entre sí y embonan con la estructura. El fluido es conducido a los alrededores por la cavidad que se forma entre lóbulos sucesivos.

**BOMBAS RECIPROCANTES:** Emplea un pistón que toma fluido dentro de un cilindro a través de una válvula de alimentación conforme se aleja de la válvula. Por consiguiente, conforme el pistón se mueve hacia adelante, la válvula de alimentación se cierra y el fluido es impulsado hacia afuera a través de la válvula de descarga.

- a) De pistón: Las bombas de pistón utilizadas en la transferencia de fluidos se clasifican tanto como de acción única, simplex, o como de acción doble, duplex. Tienen una capacidad de flujo más grande y operan a presiones menores. Asimismo, éstas se encuentran alimentadas a través de un alimentador tipo biela, en lugar de ser alimentadas por medio de la placa de derrame.
- b) De diafragma: Tiene una varilla reciprocante que mueve un diafragma flexible dentro de una cavidad, descargando fluido en forma alternada conforme la varilla se mueve hacia la izquierda y tomando fluido hacia adentro conforme la varilla se mueve hacia la derecha.

**BOMBAS CINÉTICAS:** Éstas adicionan energía al fluido acelerándolo a través de la acción de un impulsor giratorio.

- a) De flujo radial (centrífuga): Principalmente son para aplicaciones industriales y comerciales, existen pequeñas unidades para su uso en

aparatos domésticos, como son lavadoras de ropa, de platos y en productos de menor escala.

- b) De flujo axial (de impulsor): Éstas dependen de la acción hidrodinámica de las hojas impulsoras para levantar y acelerar al fluido en forma axial, a lo largo de una trayectoria paralela al eje del impulsor.
- c) De flujo mixto: La bomba de flujo mezclado incorpora algunas acciones de ambos tipos de bombas, la centrífuga y la de impulsor.
- d) De inmersión o sumergibles: Se diseñan de tal forma que la estructura completa de la bomba centrífuga, el motor de alimentación y los dispositivos de succión y de descarga pueden sumergirse en el fluido que será bombeado. Estas bombas son útiles para remover agua de desecho en obras de construcción, minas, pozos de luz, tanques industriales y en barcos de carga. En la parte superior de la unidad el flujo se une y fluye hacia una tubería de descarga ubicada en la parte central o tubería de manguera. El motor seco se sella en el centro de la bomba

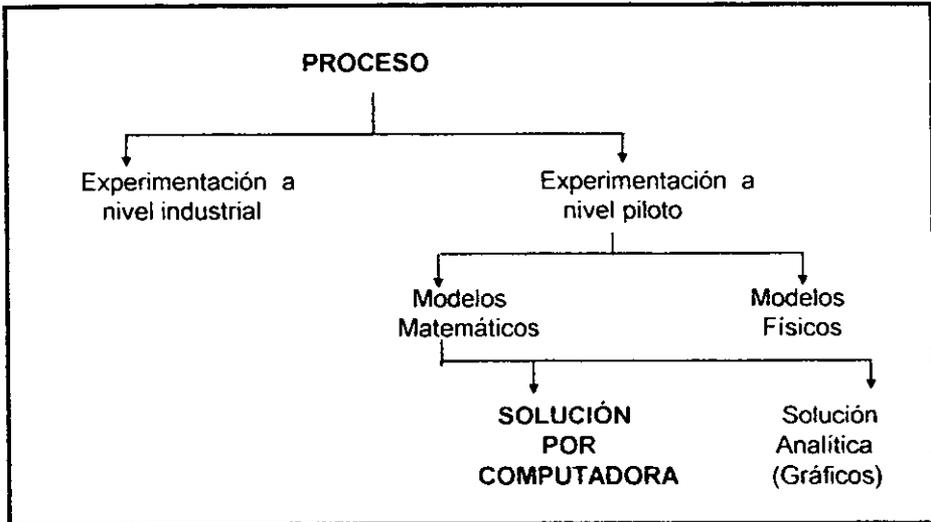
**BOMBAS DE PROPULSIÓN:** Son utilizadas con frecuencia en sistemas domésticos de agua, se componen de una bomba centrífuga junto con un montaje de propulsores.

Para estudiar un Proceso en particular además de darle solución como se ha explicado anteriormente, existen diferentes formas de resolverlo y la Programación por Computadoras es una herramienta que nos sirve para este fin.

## **2.8 FORMAS DE ESTUDIAR UN PROCESOS.**

En la actualidad el estudio de procesos por computadoras se ha convertido en una herramienta importante para facilitar la resolución de problemas de

ingeniería. Existen varias formas de estudiar un proceso real, como se puede observar en el cuadro 4:



CUADRO 4: FORMAS DE ESTUDIAR UN PROCESO<sup>17</sup>

La computadora nos permite predecir el comportamiento de un equipo a nivel industrial y/o a nivel piloto, por medio de modelos matemáticos y/o físicos los cuales se pueden resolver de una forma mucho más rápida utilizando programas de computación.

Un Programa es un conjunto de instrucciones que juntas hacen que la computadora lleve a cabo una tarea determinada, tal como el procesado electrónico de un dibujo, la gestión de los archivos de una red informática o la resolución de cálculos complejos. Un programa puede ser extremadamente pequeño o puede ser una aplicación de gran tamaño.

## **2.9 LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN MICROSOFT VISUAL BASIC.**

Un Programa de Visual Basic es una aplicación escrita específicamente para Windows utilizando el sistema de programación de Visual Basic. Para escribir un programa en Visual Basic se deberá determinar, en primer lugar, cuál es la tarea que se desea realizar; posteriormente, se deberá diseñar la pantalla del programa y, finalmente, desarrollar el programa utilizando el sistema de programación de Visual Basic.<sup>13</sup>

Visual Basic es una caja inmensa de utilidades y recursos puestos a nuestra disposición para hacer que la programación de cualquier aplicación por compleja que sea, resulte ahora más sencilla que nunca y con pantallas mejor presentadas e intuitivas.

Sin lugar a dudas el desarrollo de aplicaciones bajo Windows es una realidad, lo cual hace suponer que el futuro de la programación va encaminado hacia los entornos gráficos.

Una de las características fundamentales que diferencian a Windows de DOS es un entorno gráfico que a base de ventanas presenta al usuario en forma de objetos, la mayoría de las operaciones que se pueden realizar bajo el sistema operativo, evitando así tener que recordar órdenes y opciones que en muchos casos el escribirlas ya eran una posible fuente de errores. En un entorno gráfico un usuario simplemente selecciona la utilidad correspondiente a la tarea que desea ejecutar; el resto del trabajo lo hace el sistema.

Visual Basic es un sistema de desarrollo diseñado especialmente para crear aplicaciones gráficas de una forma rápida y sencilla.

---

<sup>12</sup> Sanchiz, 1997

<sup>13</sup> Halvorson, 1996

Visual Basic está centrado en dos tipos de objetos, **ventanas y controles**, que permiten diseñar sin programar, un mecanismo de comunicación para una aplicación. Para realizar una aplicación se crean **ventanas**, llamadas **formas**, y sobre ellas se dibujan otros objetos llamados **controles**. Quiere esto decir, que cada **objeto ( formas y controles )** está ligado a un código que permanece inactivo hasta que se dé el suceso que lo activa.

Una vez creada la forma, se pueden añadir controles tales como etiquetas, cajas de texto, cajas para señalar una o más opciones, botones para elegir una opción entre varias, botones de órdenes, etc.

Una **forma** es una ventana que sirve de fondo para los controles y para los gráficos situados sobre la misma. Se pueden utilizar tantas formas como se necesiten y dependiendo de la utilidad que se les dé, éstas serán de diferentes tipos. Así, se puede crear una forma para que contenga un gráfico, para visualizar información, y para aceptar datos.

Para hacer que una aplicación responda a sucesos tenemos que unir código a las formas y a los controles.

El código que se une a un objeto se denomina **procedimiento conducido por un suceso** o simplemente **procedimiento**.

Para unir un procedimiento a un objeto hay que escribir el código correspondiente a dicho procedimiento en la ventana de código asociada con el objeto.

Un procedimiento está formado por un nombre de objeto, un nombre de suceso y una o más sentencias.

Cuando desarrollamos una aplicación bajo este tipo de programación, la secuencia en la que van a ejecutarse las sentencias no puede ser prevista por el

programador. Por ejemplo, si en lugar de un botón hubiera dos o más botones, claramente se ve que el programador no puede escribir el programa pensando que el usuario va a pulsarlos en una determinada secuencia.

Por lo tanto, para programar una aplicación Windows hay que escribir código separado para cada objeto en general, quedando la aplicación dividida en pequeños procedimientos conocidos cada uno de ellos por un suceso.<sup>14</sup>

El lenguaje de Programación Visual Basic se basa en la metodología orientada a objetos, la cual es una técnica de estructuración. En ella, los objetos son los principales elementos de construcción. Sin embargo, comprender simplemente lo que es un objeto o utilizar objetos en un programa no significa que se esté programando en una forma orientada a objetos. Lo que cuenta es la forma como los objetos se conectan entre sí.

## **2.10 PROGRAMACION ORIENTADA A OBJETOS<sup>13,14</sup>.**

Es aquella programación por medio del envío de mensajes a objetos de tipo desconocido. Tales objetos se encontrarán en un arreglo o en una colección como es un escritorio. Todos los objetos de la colección comparten ciertas características (por ejemplo, El conocimiento de su ubicación en pantalla y la capacidad para cambiar de ubicación, activarse o desactivarse). Desde la perspectiva del programador, la selección de un objeto dentro de la colección proporciona información acerca del tipo exacto del objeto.

Los ambientes de manejo por ventanas, como Microsoft Windows, proporcionan ejemplos en los que el tipo preciso de un objeto no siempre se conoce. Por ejemplo, los objetos que se presentan en la pantalla podrían ser barras de desplazamiento, ventanas, iconos, menús, botones u otros tipos de controladores. Cada uno de estos objetos responde a los mensajes que envía el

---

<sup>14</sup> Ceballos, 1997

<sup>13</sup> Halvorson, 1996

usuario en forma de teclas oprimidas o clics de ratón y cosas distintas sucederán dependiendo de cuál es el objeto al que se apunta cuando se envía un mensaje.<sup>6</sup>

Un programa orientado a objetos consta de las siguientes propiedades:

**OBJETO:** Es todo que aquello agrupa datos y procedimientos, almacena y procesa información.

**HERENCIA:** Es una herramienta que permite expresar las propiedades o protocolo de comunicación comunes a un conjunto de objetos, es decir, mediante la herencia se transmite la información almacenada en cada variable hacia los diferentes objetos y clases que la requieran durante la ejecución del programa.

**CLASES:** Son plantillas (ventanas o formas) donde se encuentran los objetos.

**SUPER CLASE:** Es el modulo donde se definen o se declaran todos las variables que serán utilizadas por los objetos del programa .

**VARIABLES:** Es un espacio de memoria al cual se le asigna un valor determinado, que puede modificarse a lo largo de la ejecución del programa, es mediante éstas que se realizan las operaciones específicas de cada objeto. Cada variable tiene atributos propios como:

a) **NOMBRE:** Es el nombre que se utiliza para referirse a la variable en la aplicación.

b) **TIPO:** El tipo determina qué clase de valores puede almacenar la variable.

---

<sup>6</sup> Voss 1996

c) **ÁMBITO:** El ámbito de una variable indica en que parte del programa la variable es conocida y por lo tanto puede utilizarse.

Existen dos tipos generales de variables: Públicas y Privadas.

**PÚBLICAS:** Son aquellas variables que se registran en el Modulo del programa, y pueden ser utilizadas por todas las ventanas y los objetos.

**PRIVADAS:** Son las variables que se dan de alta en un solo objeto o ventana y no podrán volver a utilizarse en otra.

Para realizar la simulación por computadoras se deben realizar los siguientes pasos:

- 1. Generar el algoritmo de cálculo para el programa**
- 2. Estructuración del programa**
- 3. Realización del programa**
- 4. Compilación del programa**
- 5. Validación del programa**

A continuación se explicarán brevemente en que consiste cada paso:

## **1. Generar el algoritmo de cálculo**

El algoritmo de cálculo es una secuencia de operaciones ordenadas para llegar a obtener el resultado esperado.

Este paso consiste en elegir las variables y plantear las ecuaciones de tal forma que las variables resultantes puedan sustituirse en otras ecuaciones y obtener así los datos necesarios.

Otro punto importante es la utilización de ciclos que permitan determinar el valor correcto de ecuaciones de tipo iterativas, al mismo tiempo, la computadora será capaz de elegir la opción adecuada según el ciclo al que se le mande.

## **2. Estructuración del programa**

Este paso consiste en:

### **a) Declaración de variables:**

Es necesario asignar uno o varios caracteres para declarar cada una de las variables involucradas.

### **b) Entrada de datos:**

A estos datos se les asignarán variables para que puedan ser utilizados en las ecuaciones.

### **c) Realización de operaciones:**

Una vez conocidas las variables, los datos y el algoritmo de cálculo se procede a plantear las operaciones necesarias.

d) Presentación de resultados:

Ya que se han realizado las operaciones se presentarán los resultados una vez ejecutado el programa.

### 3. Realización del programa

Es importante conocer los comandos necesarios para que se realicen acciones específicas.

Los comandos de Visual Basic más utilizados para realizar un programa se explican en el siguiente cuadro:

COMANDO	FUNCION
Public	Se emplea para dar de alta las variables que tengan valores enteros positivos y negativos.
Label .Caption = Format (variable)	Para imprimir algún texto, resultado, etc.
Modulo	Guarda las variables para ser utilizadas en alguna operación
Do While Condicion End Do Loop	Este ciclo repite un proceso siempre cuando la condición sea verdadera de lo contrario se saltará todas las instrucciones.
Load Form (número de la ventana) Form (número de la ventana).show	Sirve para conectar las ventanas, mostrando de manera ordenada las ventanas o secuencia en la que aparecerán al ejecutar el programa.
Nombre de la variable = Val(Text1.Text)	Se ocupa para guardar en la memoria el valor asignado de tal forma que sea heredado para cálculos posteriores.

CUADRO 5: COMANDOS BÁSICOS DE LENGUAJE VISUAL BASIC

En éste capítulo se presenta como está estructurado el programa para resolver los problemas de mecánica de fluidos, cuya finalidad esta en proporcionar los resultados más importantes para la selección del sistema de bombeo.

Para seleccionar un equipo de bombeo es necesario conocer:

\* Características del fluido:

° Físicas :

- densidad ( $\text{kg/m}^3$ ):
- comportamiento reológico:

Fluidos Newtonianos:

viscosidad

Fluidos No-Newtonianos (de la ley de la Potencia y H.B):

índice de consistencia "k" (Pas<sup>n</sup>)  
índice de comportamiento al flujo "n"

° Termodinámicas:

- Presión de vapor.

\* Características de la envasadora:

- Capacidad del envase (ml)
- Nivel de producción (envases / min.)

\* Otros:

- Tiempo de proceso

### CAPITULO 3 DESARROLLO DEL PROGRAMA

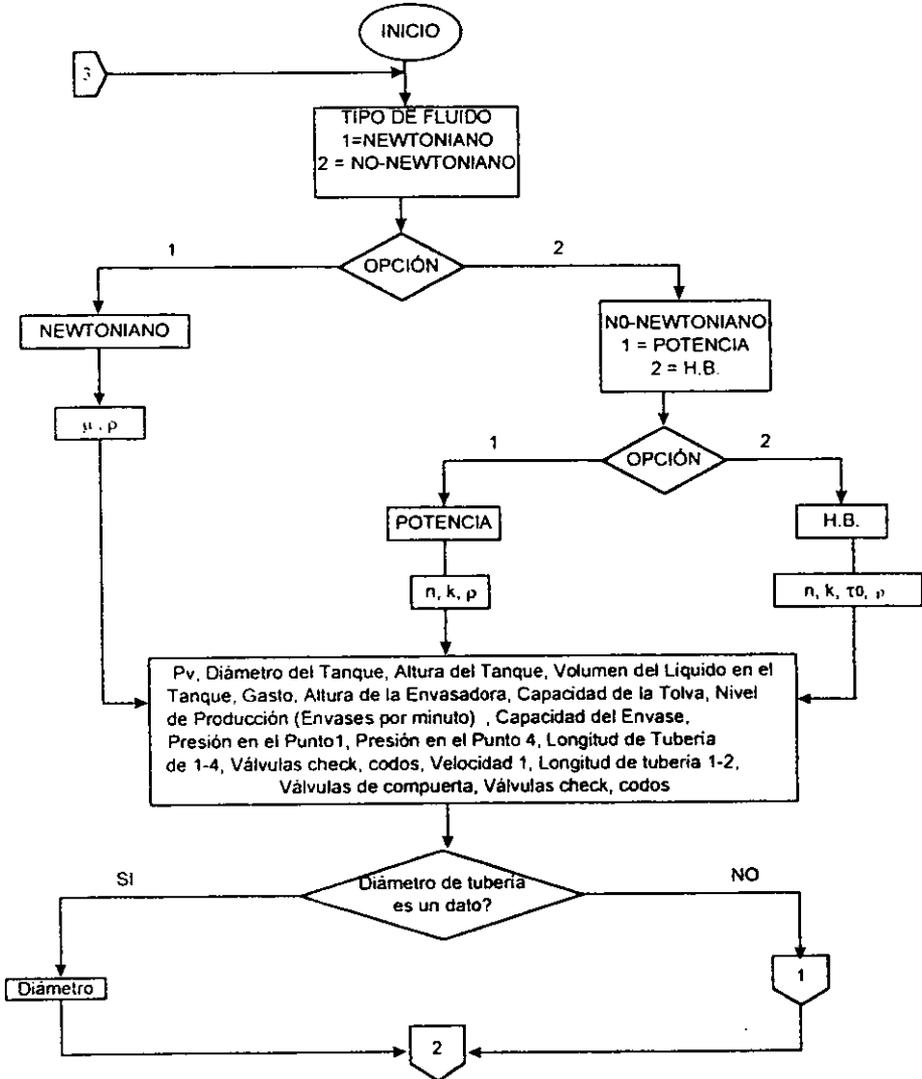
Para los cálculos es necesario conocer el diámetro de tubería (D), longitud (L), velocidad media del fluido ( $V_m$ ) y el factor de fricción (f). El problema reside ahora en definir o encontrar la relación existente entre el factor de fricción (f) y el comportamiento no-Newtoniano.

Se considera que el bombeo se realiza a temperatura constante y que no existen pérdida o ganancia de calor a través del sistema. Por lo que el Balance de Energía Mecánica se reduce a :

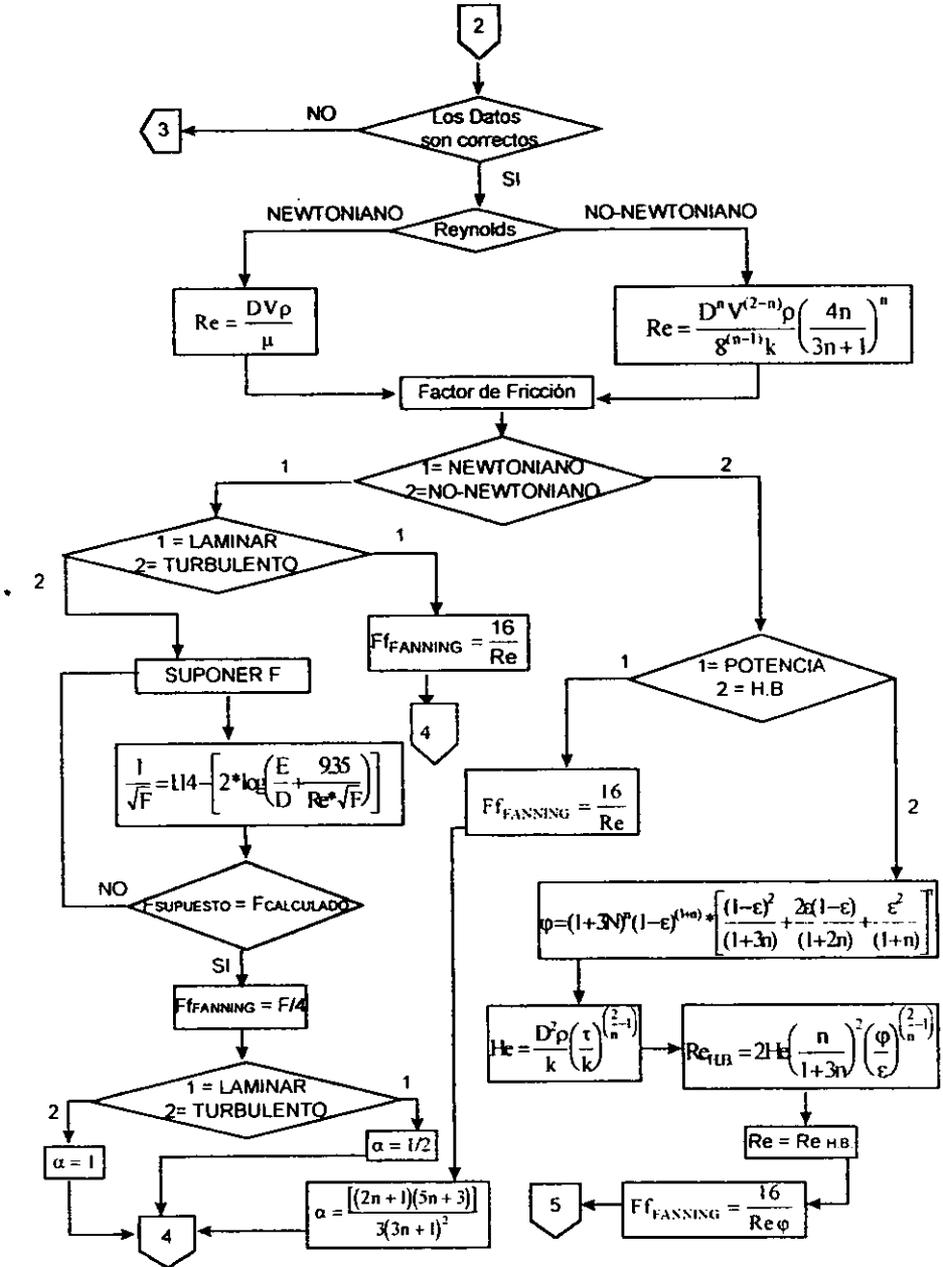
$$Wf = \frac{\Delta Zg}{gc} + \frac{\Delta V^2}{2gc} + Hf_{S_{TOTALS(1-4)}} \quad (24)$$

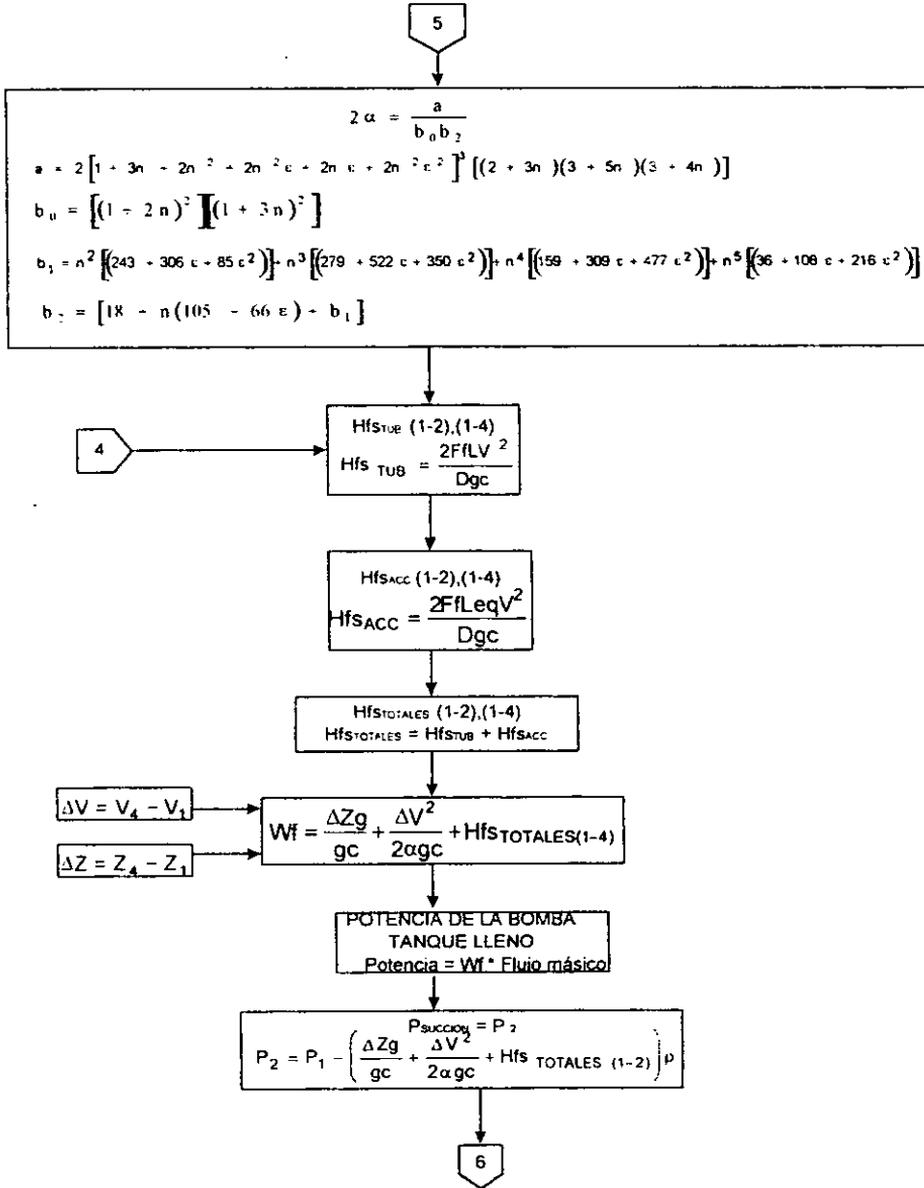
A continuación se presenta el Algoritmo de Cálculo donde se muestra en forma ordenada las ecuaciones utilizadas para la resolución de los problemas, con el fin de que se comprendan más fácilmente los pasos a seguir para la selección de una bomba.

ALGORITMO DE CALCULO

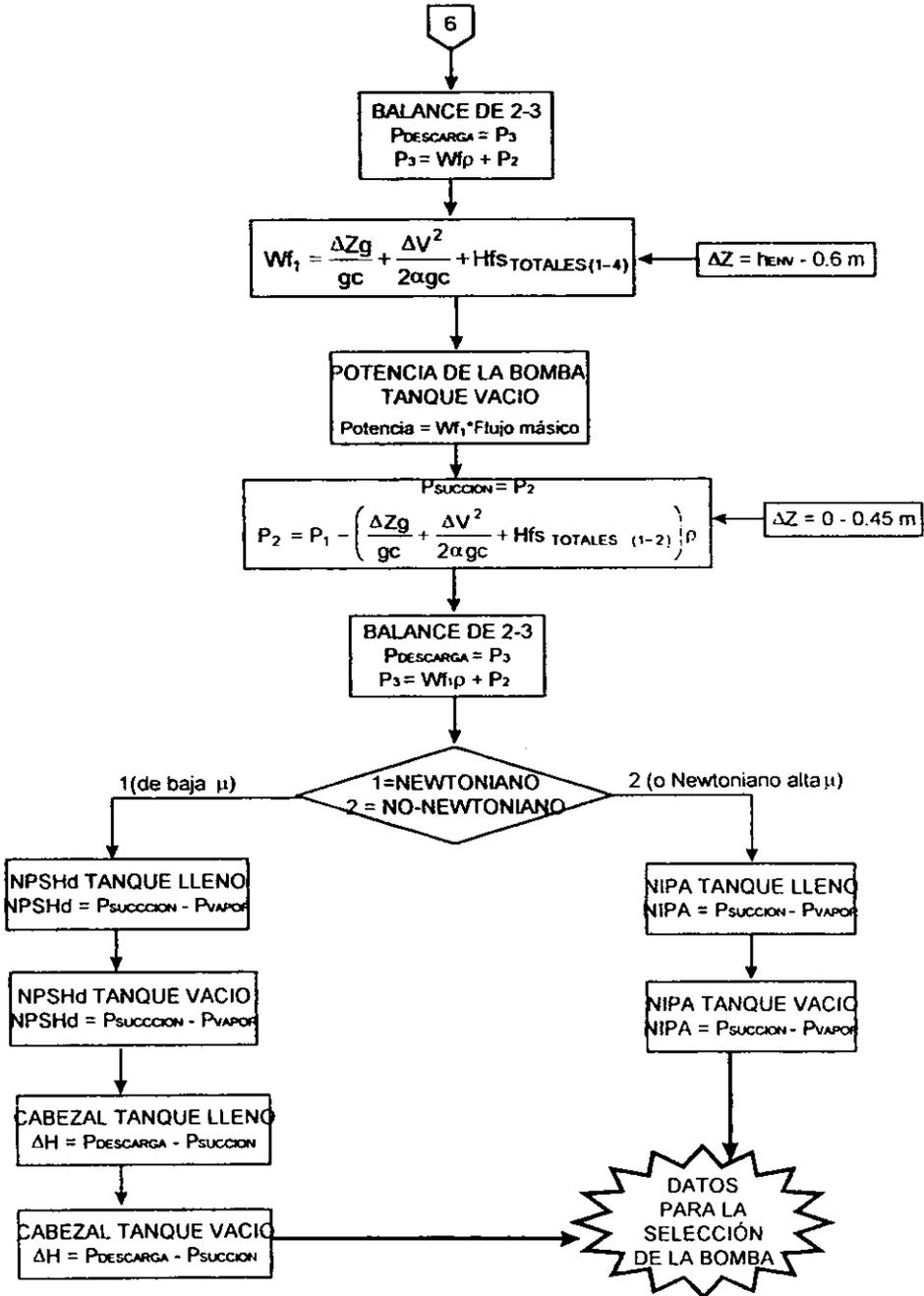


CAPITULO 3 DESARROLLO DEL PROGRAMA



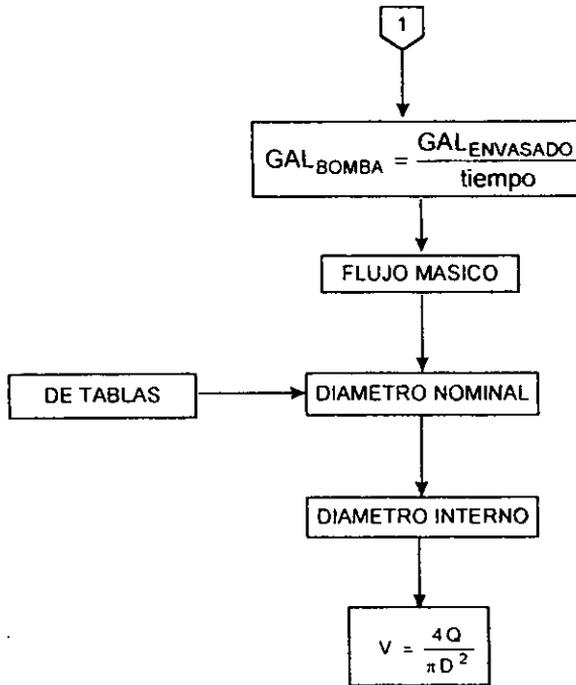


**CAPITULO 3 DESARROLLO DEL PROGRAMA**



### CAPITULO 3 DESARROLLO DEL PROGRAMA

Esta parte del algoritmo, es para calcular el flujo volumétrico de la bomba en función de la capacidad de la tolva de la envasadora y del tiempo de operación de la bomba.



# CAPITULO 4

## ESTRUCTURA Y VALIDACIÓN DEL PROGRAMA

La estructura de este programa consta de cinco partes fundamentales

- 1. Presentación**
- 2. Entrada de datos**
- 3. Resultados**
- 4. Información**
- 5. Despedida**

#### **1. Presentación:**

Esta es la primera parte del programa en donde se presentan la portada y la selección del tipo de fluido. Dependiendo de esta selección el programa elegirá las pantallas a utilizar.

#### **2. Entrada de datos:**

Aquí se almacenarán los datos que son necesarios para realizar los cálculos, es importante que los datos estén en las unidades que se piden, ya que de no ser así los resultados no serán los correctos o bien el programa detendrá su ejecución.

#### **3. Resultados:**

En esta parte se muestran las pantallas con los resultados más importantes y necesarios para poder conocer el comportamiento del fluido en estudio y seleccionar la bomba.

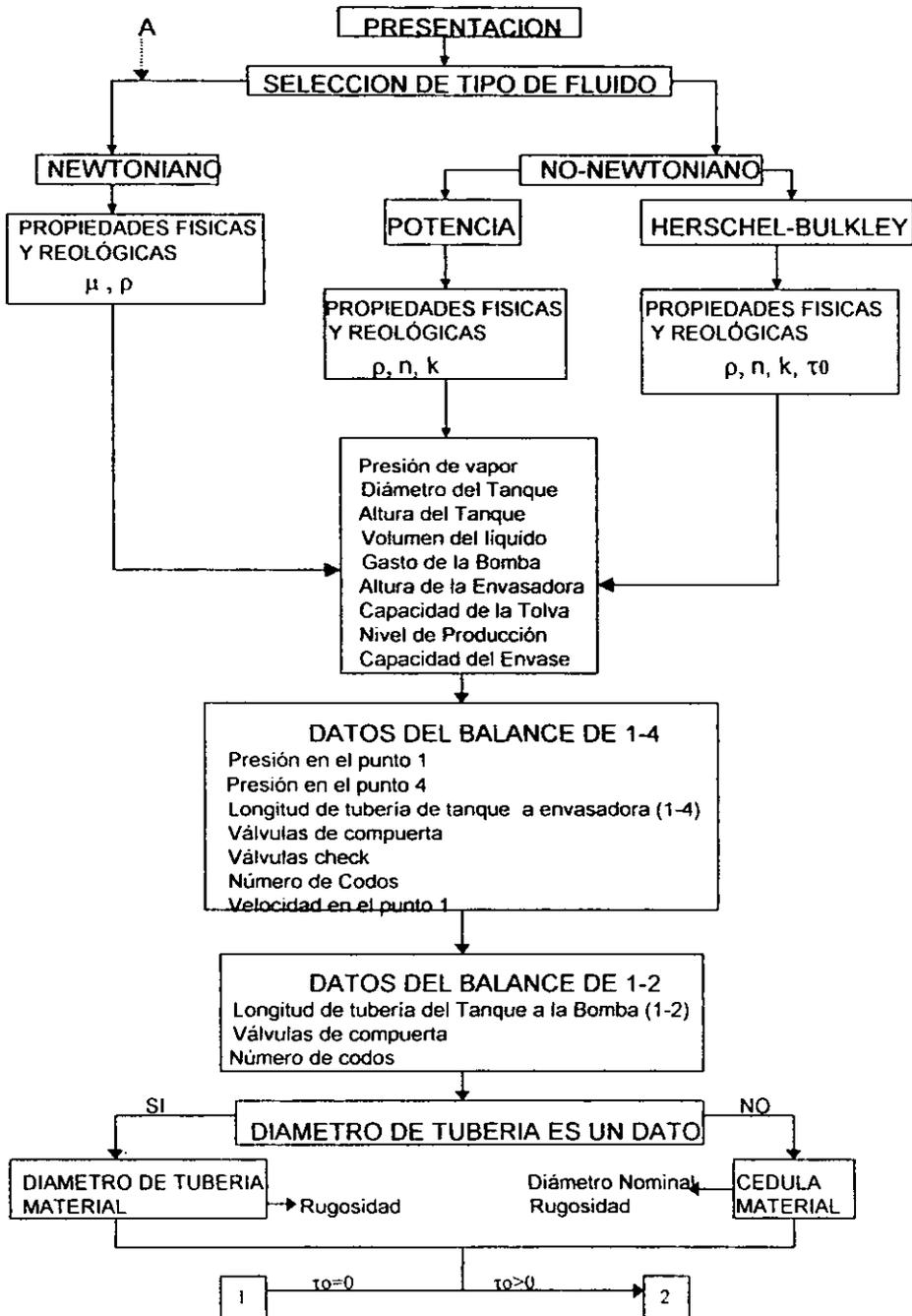
#### **4. Información:**

Esta sección es muy importante ya que es un complemento que permite entender los conceptos y definiciones tanto de los datos como de los resultados que presenta el programa.

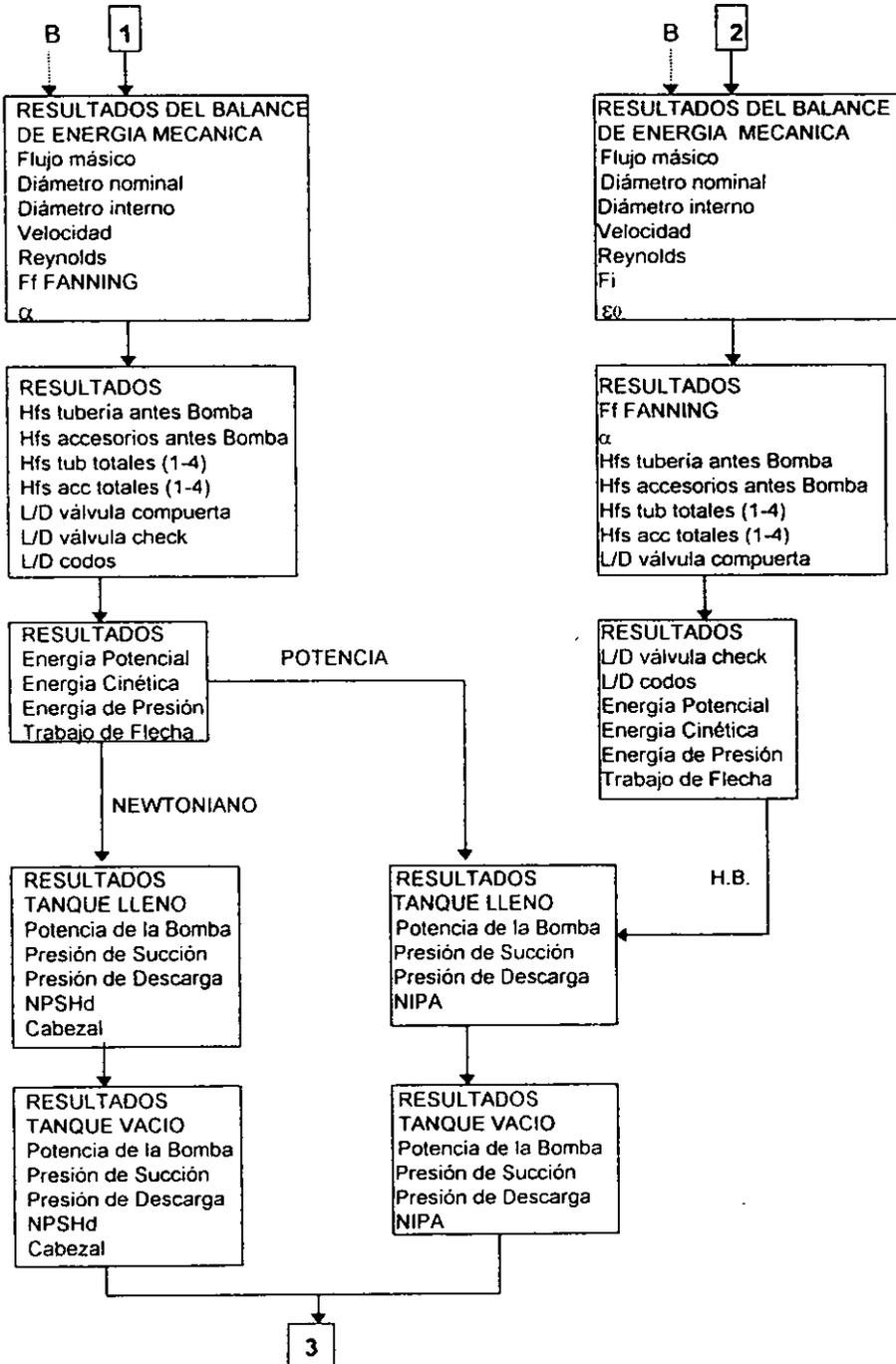
#### **5. Despedida:**

Es la parte final del programa en donde se tienen las opciones de: salir del programa, realizar otro cálculo, verificar los resultados o imprimirlos.

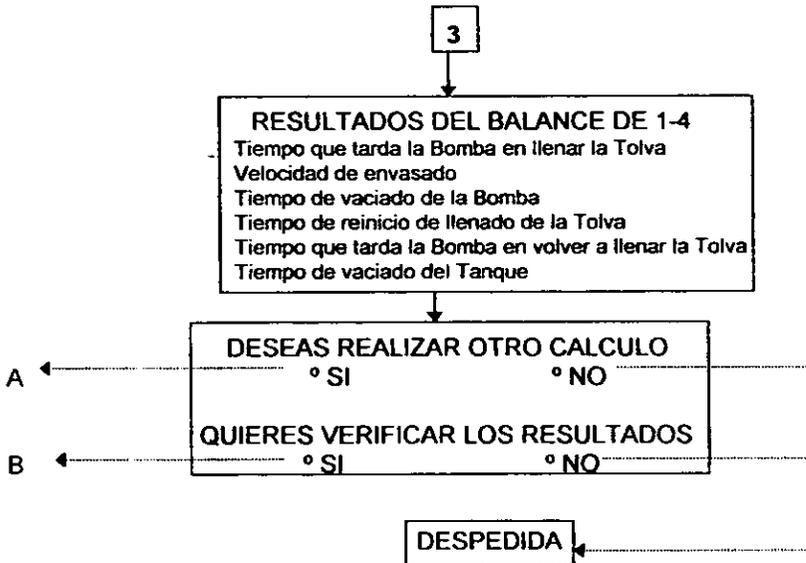
ESTRUCTURA DEL PROGRAMA



CAPITULO 4 ESTRUCTURA Y VALIDACIÓN DEL PROGRAMA



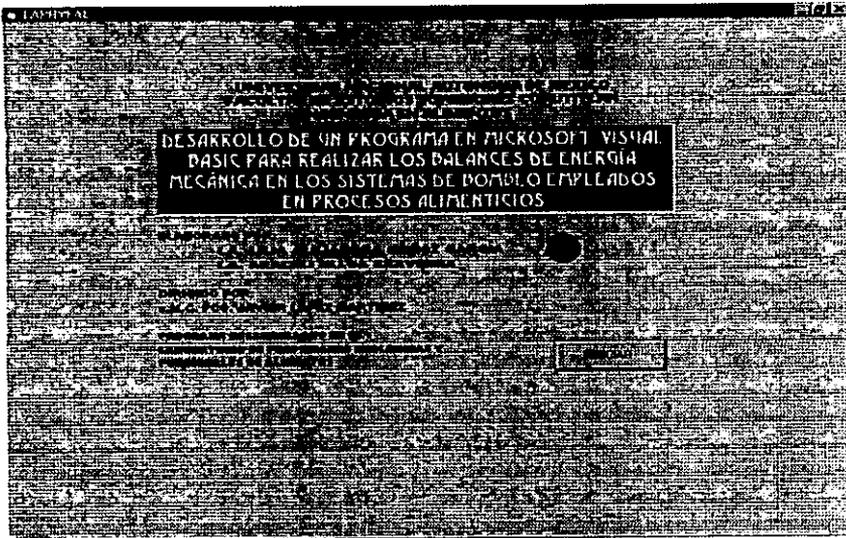
## CAPITULO 4 ESTRUCTURA Y VALIDACIÓN DEL PROGRAMA



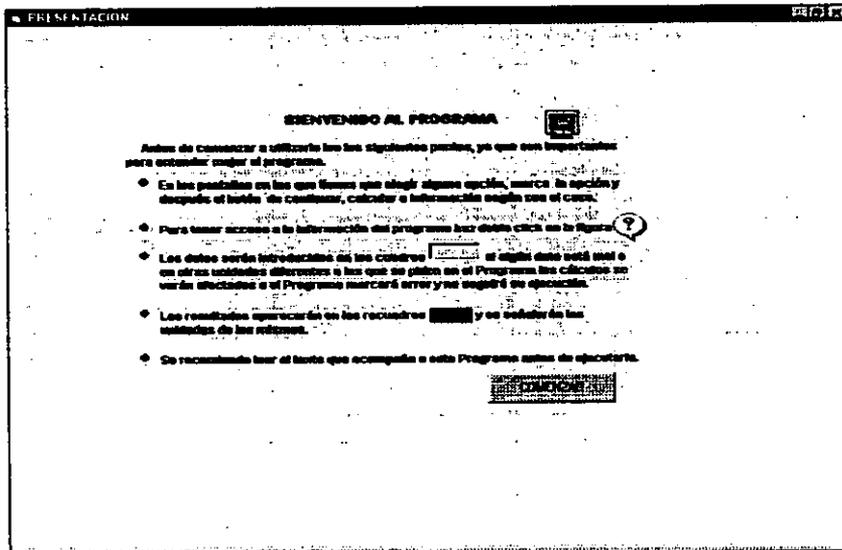
Con la finalidad de que la estructura presentada anteriormente, se comprenda; se presentan impresas y se explican brevemente algunas de las pantallas como aparecen en el programa, esperando que se tenga una visión más real de éste.

Cabe mencionar que las pantallas de información, no se presentan debido a que ésta información es citada en el Capítulo 2.

## CAPITULO 4 ESTRUCTURA Y VALIDACION DEL PROGRAMA

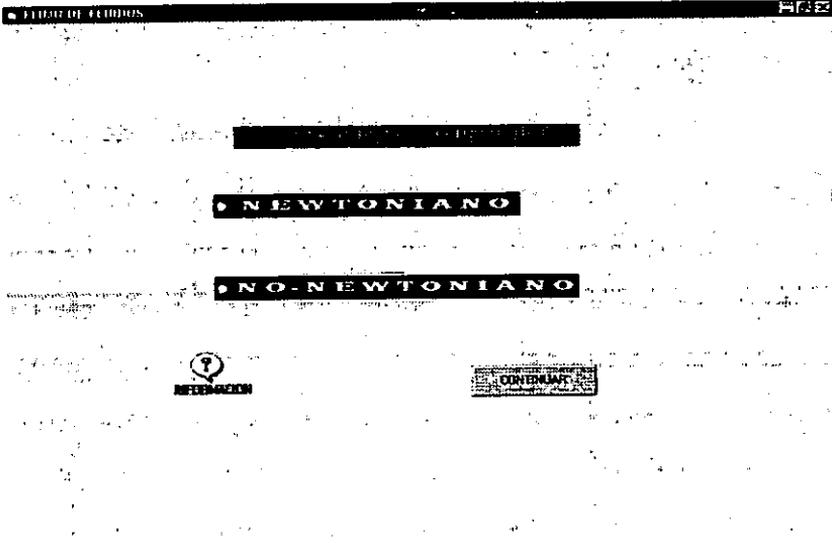


**PORTADA:** Esta es la primera pantalla en la cual se pretende introducir al usuario al tema de la Mecánica de Fluidos y que al leer el título del Programa puede saber el objetivo de éste.

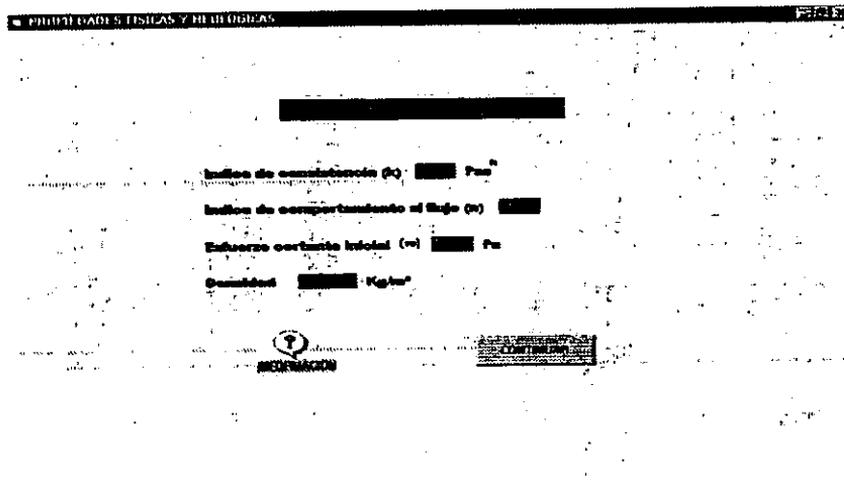


**PRESENTACION:** En esta pantalla se presentan de manera breve y sencilla las instrucciones básicas para poder ejecutar de una manera adecuada el Programa.

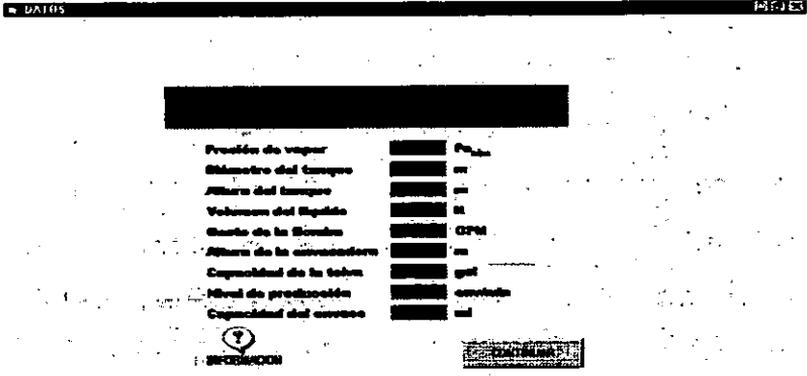
## CAPITULO 4 ESTRUCTURA Y VALIDACION DEL PROGRAMA



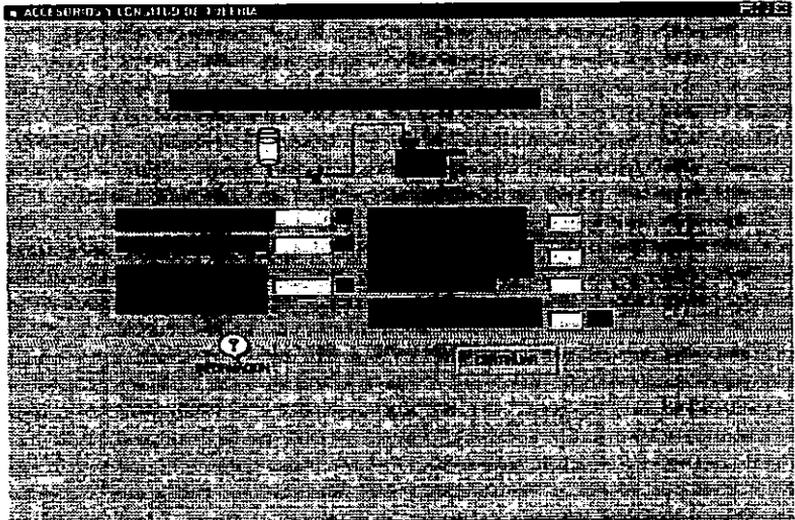
**SELECCIÓN:** Aquí es en donde el usuario selecciona el tipo de fluido con el que desea trabajar.



**ENTRADA DE DATOS:** De acuerdo al fluido seleccionado, en esta ventana el Programa pedirá al usuario las propiedades físicas y reológicas del fluido.

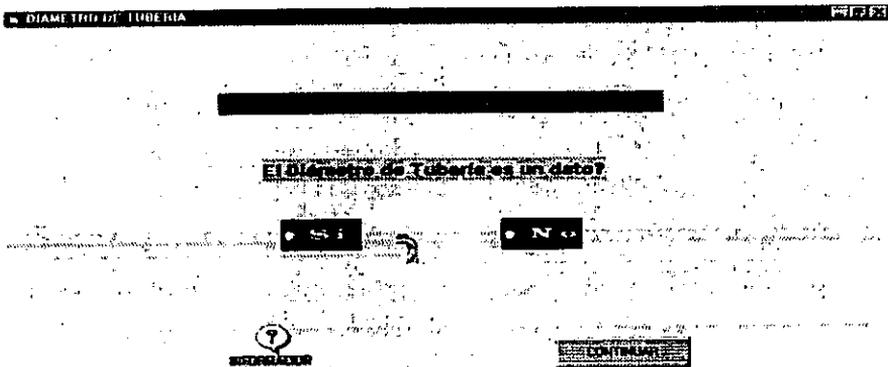
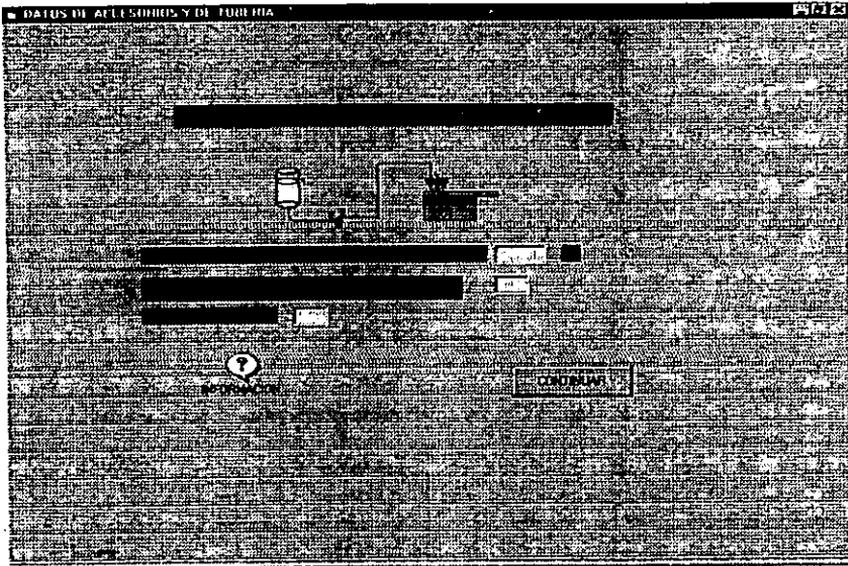


**ENTRADA DE DATOS:** En ésta etapa se piden los datos necesarios para realizar el Balance de Energía Mecánica, entre las más importantes están las dimensiones y las características de los equipos .



**ENTRADA DE DATOS:** En ésta pantalla y en la siguiente, se continúan pidiendo datos referentes a tuberías y accesorios.

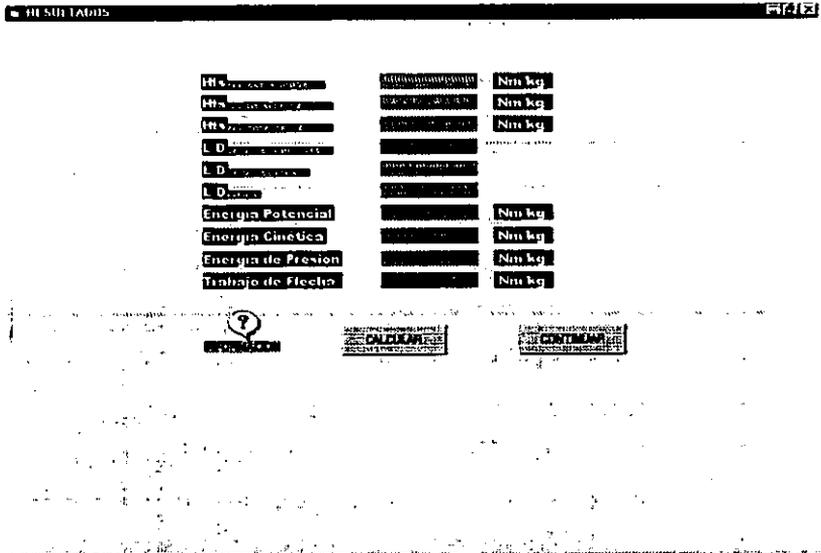
## CAPITULO 4 ESTRUCTURA Y VALIDACION DEL PROGRAMA



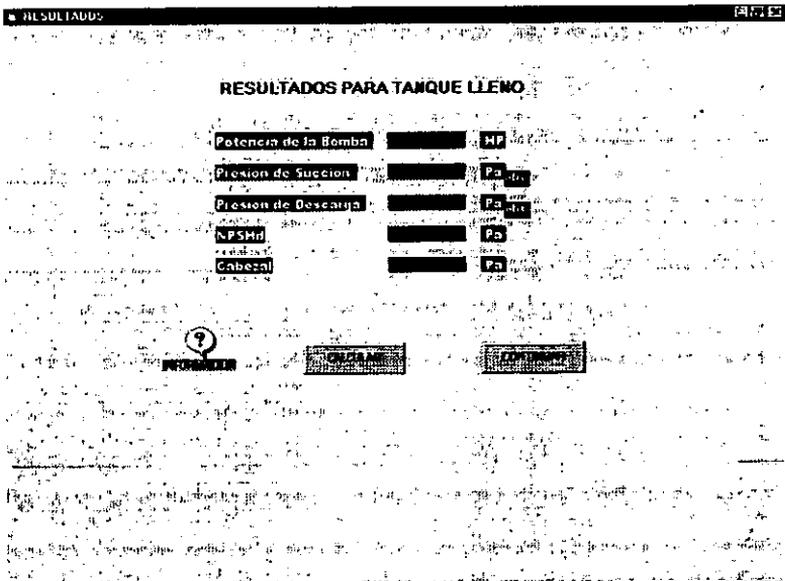
**DIÁMETRO DE TUBERÍA:** Una vez que se han introducido los datos necesarios para realizar los Balances de Energía Mecánica, el usuario debe indicarle al Programa si ya seleccionó el diámetro de tubería o no. En caso de no haber seleccionado el diámetro de tubería anteriormente, el Programa mostrará la siguiente pantalla.



## CAPITULO 4 ESTRUCTURA Y VALIDACION DEL PROGRAMA



Continuación de Pantalla de Resultados del Balance de Energía Mecánica.



**RESULTADOS:** En esta pantalla y en la siguiente, se presentan algunos datos que son importantes para la selección de una bomba.



## CAPITULO 4 ESTRUCTURA Y VALIDACION DEL PROGRAMA

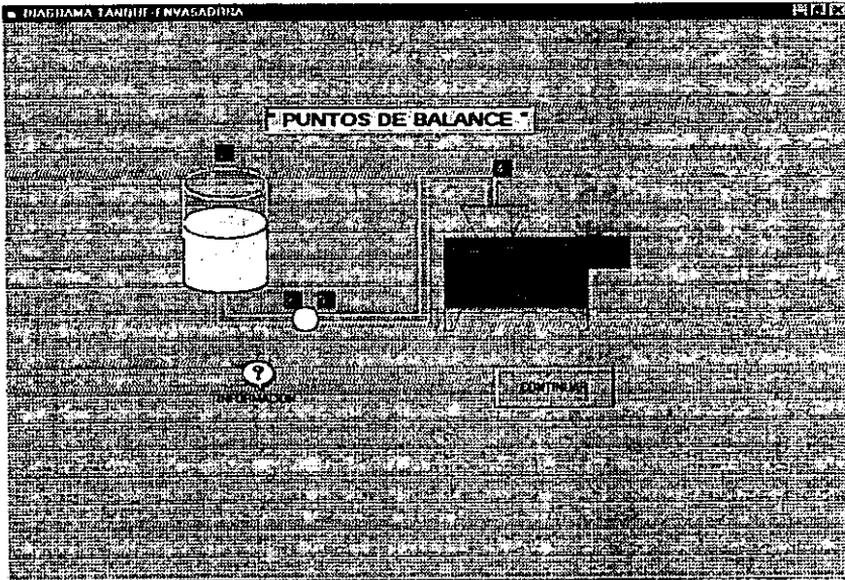
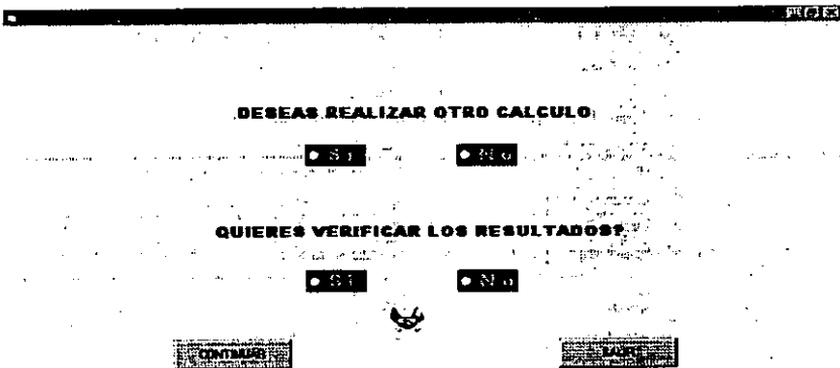


DIAGRAMA: Esta pantalla tiene como objetivo principal mostrar la etapa del proceso que se está estudiando así como los puntos en los cuales se realizan los Balances de Energía Mecánica.



Esta pantalla se diseñó con el fin de que el usuario si desea realizar otros cálculos no tenga que abandonar la ejecución, o bien si desea verificar los resultados pueda hacerlo sin necesidad de introducir nuevamente los datos.

## CAPITULO 4 ESTRUCTURA Y VALIDACION DEL PROGRAMA

LAPTOPAL R033

**SE RECOMIENDA EN CASO DE TENER  
DUDAS, CONSULTAR LA TESIS EN LA QUE  
SE INCLUYEN LOS CONCEPTOS BÁSICOS Y  
PROBLEMAS RESUELTOS DE ESTE  
PROGRAMA**



PROGRAMA Y NOMBRE DEL PROGRAMA  
COMBINACION DE CLAVES

Esta es la pantalla final con la que el Programa termina su ejecución, y en la cual se recomienda al usuarios que consulte el texto que acompaña a dicho Programa.

## **VALIDACION DEL PROGRAMA:**

Los problemas que se presentan a continuación se han realizado de una forma manual y se comparan al final de este capítulo con los resultados que se obtuvieron con los mismos datos en el programa.

## **PROBLEMAS RESUELTOS**

Para un fluido NEWTONIANO.

### **Ejemplo 1:**

De acuerdo con el siguiente esquema, realizar los cálculos que permitan obtener la información necesaria para seleccionar un sistema de bombeo. La bomba enviará un fluido Newtoniano de baja viscosidad a razón de 50 GPM hacia la envasadora que tiene una altura de 2.5 m, la cual está provista de una tolva con una capacidad de 25 galones.

El nivel de producción de la envasadora es de 5000 env/h y cada envase tiene una capacidad de 200 ml.

El fluido Newtoniano tiene las siguientes propiedades: una densidad de  $1050 \text{ kg/m}^3$ , viscosidad de 1.17 cp y una presión de vapor de  $5623.4 \text{ Pa}_{\text{abs}}$ . Considerar que el tiempo total del proceso es de 2 h 25 min<sup>4</sup>.

Para iniciar la resolución del problema se enlistan los siguientes datos:

---

<sup>4</sup> El tiempo de proceso es un valor supuesto, tomando como base que algunos procesos industriales de transformación de alimentos tardan en promedio tal tiempo.



Datos del sistema:

Gasto de la bomba propuesto = 50 GPM

Capacidad de la tolva = 25 Gal

Nivel de producción = 5000 env / h

Capacidad del envase = 200 ml

AP = 0.6 m

EPT = 0.15 m

AE = 2.5 m

AENV = 2.5 m

T2 = 0.25 m

T3 = 0.2 m

T1 = AE + T3 - EPT = 2.5 m + 0.2 m - 0.15 m = 2.55 m

NOTA: Para calcular las demás distancias de tubería es necesario seleccionar el tanque que se debe de utilizar, el cual se seleccionará posteriormente.

Presión en el tanque = 77007 Pa

Presión en la tolva = 77007 Pa.

Esta presión corresponde a la presión atmosférica de Cuautitlán Izcalli, cabe hacer mención que la presión atmosférica es diferente en cada ciudad y dependiendo del lugar en donde se considere instalar la industria, la presión atmosférica que se utilice para realizar los cálculos debe ser la que corresponda a la ciudad respectiva.

Número de accesorios (ver figura al inicio del ejemplo)

Válvulas de compuerta = 1

Válvulas check = 0

Número de codos = 4

#### CAPITULO 4 ESTRUCTURA Y VALIDACIÓN DEL PROGRAMA

Antes de realizar los cálculos para el balance de energía mecánica, se procede a la selección del tanque de almacenamiento, para lo cual se realizan los siguientes cálculos:

+Para esto es necesario emplear los datos del nivel de producción y el tiempo total de proceso. Primero se calcula la cantidad de producto por hora que será envasado en ese tiempo:

$$\frac{5000 \text{ env}}{h} \left| \frac{200 \text{ ml}}{1 \text{ env}} \right| \left| \frac{1 \text{ lt}}{1000 \text{ ml}} \right| \left| \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ lt}} \right| = 1 \frac{\text{m}^3}{h}$$

Una vez calculado el volumen total de líquido que es envasado por hora, se calcula el volumen de líquido que será almacenado en el tanque para abastecer a la envasadora, mientras el siguiente lote de producto está listo. Para esto es necesario, multiplicar el volumen por el tiempo total de proceso, como se muestra a continuación:

$$\therefore \frac{1 \text{ m}^3}{h} [2.4166 \text{ h}] = 2.4166 \text{ m}^3 \approx 2416.6 \text{ lt}$$

**Volumen en lt del líquido = 2416.6**

NOTA: El dato de 2.4166 horas, corresponde al tiempo total del proceso que es de 2 horas 25 minutos.

Con este volumen se procede a la selección del tanque. El tanque seleccionado corresponde a un volumen de 6000 lt, tomando en consideración un posible incremento de la producción a corto plazo y para evitar realizar un cambio posterior, por lo que las dimensiones del tanque seleccionado son las siguientes (Ver Anexo):

AT= 2.975 m

#### CAPITULO 4 ESTRUCTURA Y VALIDACIÓN DEL PROGRAMA

Diámetro externo del tanque = 2.15 m

Diámetro interno del tanque = 2.0 m

AP= 0.8 m

ATSP= 2.175 m

Una vez conocidas las dimensiones del tanque se pueden establecer las dimensiones de tubería faltantes, tales como:

$T = 0.45 \text{ m}$

$TAB = 2.15 \text{ m} = \text{Diámetro externo del tanque}$

$TOB = 2 * AE = 2 * 2.5 \text{ m} = 5 \text{ m}$

Después de haber obtenido éstos valores se puede calcular la longitud de tubería total y la longitud de tubería antes bomba:

Para la longitud de tubería total:

Longitud de tubería de tanque a envasadora = 10.924 m

Para la longitud de tubería del tanque a la bomba:

Longitud de tubería del tanque a la bomba =  $T + TAB$

Longitud de tubería del tanque a la bomba =  $0.45 \text{ m} + 2.15 \text{ m} = 2.6 \text{ m}$

Una vez calculadas las distancias que se utilizarán en el sistema, se puede comprobar que la bomba siempre estará funcionando, esto se realizará con el fin de que el equipo no sufra daños posteriores por falta de alimentación del fluido, para esto se realizan los cálculos siguientes:

#### CAPITULO 4 ESTRUCTURA Y VALIDACIÓN DEL PROGRAMA

+Cálculo del tiempo de funcionamiento de la bomba:

Se toma la capacidad de la tolva y se divide entre el flujo de operación de la bomba y el tiempo calculado debe de ser de preferencia menor al tiempo en que tarda en vaciarse la tolva.

Como la bomba funciona a 50 GPM, se calcula el tiempo de vaciado de la tolva y el tiempo de llenado de la misma, para verificar que los tiempos son los adecuados y que siempre habrá líquido en la tolva. Como se muestra a continuación:

$$\frac{\text{gal}_{\text{tolva}}}{\text{gpm}_{\text{Bomba}}} = \text{tiempo} \qquad \frac{25 \text{ gal}}{50 \text{ gpm}} = 0.5 \text{ min}$$

El tiempo que trabaja la bomba para llenar la tolva es de 0.5 minutos. Para determinar si este tiempo es adecuado es necesario calcular el tiempo que tarda en vaciarse la tolva.

**Tiempo que tarda la Bomba en llenar la Tolva = 30 segundos**

Para conocer el tiempo de vaciado de la tolva se debe partir del nivel de producción y la velocidad de envasado:

Nivel de Producción:

$$\frac{5000 \text{ env}}{h} \cdot \frac{1 h}{60 \text{ min}} = 83.33 \text{ env/min}$$

Velocidad de Envasado:

Velocidad = (Nivel de Producción)(Capacidad del envase)

Velocidad = (83.33 env/min)(200ml/env) = 16666.66 ml/min

**CAPITULO 4 ESTRUCTURA Y VALIDACIÓN DEL PROGRAMA**

$$\frac{16666.66 \frac{ml}{min}}{1000 \frac{ml}{l}} \cdot \frac{l}{3.784 \frac{l}{gal}} = 4.4045 \text{GPM}$$

<b>Velocidad de envasado = <u>0.07340 gal/s</u></b>
---

$$\frac{gal_{tolva}}{\text{velocidad de envasado}} = \text{tiempo} \quad \frac{25 \text{gal}}{4.4045 \text{gal/min}} = 5.67 \text{min}$$

<b>Tiempo de vaciado de la Tolva = <u>5.67 min</u></b>
--

Como el tiempo que tarda la bomba en llenar la tolva es menor que el tiempo de vaciado de la tolva, podemos decir que el gasto de la bomba es el correcto, ya que se ha asegurado que la bomba no tendrá problemas de alimentación. Por lo que con éste gasto de la bomba, se podrá calcular el diámetro de la tubería.

+Diámetro de la tubería :

Para conocer el diámetro de la tubería se convierten los 50GPM a kg/h y con ese valor se lee en el CUADRO 6:

$$50 \frac{gal}{min} \cdot \frac{1 \text{min}}{60 \text{s}} \cdot \frac{3.784 \text{l}}{1 \text{gal}} \cdot \frac{1 \text{m}^3}{1000 \text{l}} \cdot \frac{3600 \text{s}}{1 \text{h}} \cdot \frac{1050 \text{kg}}{\text{m}^3} = 11919.6 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

<b>Flujo másico en kg/h = <u>11919.6</u></b>
--

#### CAPITULO 4 ESTRUCTURA Y VALIDACIÓN DEL PROGRAMA

Gasto Másico (kg/h)	Diámetro de tubería nominal cédula 80 (in)	Diámetro de tubería (mm)
<2,000	1½	25
2,001 a 6,600	2	40
6,601 a 15,000	2½	50
15,001 a 23,600	3	65
23,601 a 37,500	4	75

CUADRO 6 Diámetros Recomendados (Hui, 1993)

Se utilizó el cuadro 6 con la cédula 80 ya que estos diámetros son muy similares a los diámetros que se utilizan para tuberías en acero inoxidable denominadas "tubing" (utilizadas en la industria alimentaria).

Para obtener la información necesaria para seleccionar una bomba es importante realizar los balances de energía mecánica entre los puntos 1 y 4 y del 1 al 2 (Ver figura al inicio del ejemplo). El balance de energía mecánica entre los puntos 1y 4, nos permiten calcular la energía necesaria que se requiere para mover el fluido por todo el sistema, y el balance de 1 a 2 nos permite corroborar que la presión de succión es mayor que la presión de vapor y por lo tanto no se presentarán problemas de cavitación en la bomba.

**REALIZANDO EL BALANCE DE ENERGÍA MECÁNICA DE (1 a 4):**

$$Wf = \frac{\Delta P}{\rho} + \frac{\Delta Zg}{gc} + \frac{\Delta V^2}{2\alpha gc} + Q + \Delta E + Hfs$$

Para calcular  $Wf$  es necesario calcular las  $Hfs$ , para esto es necesario contar con el factor de fricción y el Reynolds, por lo que se debe de conocer la velocidad media a la cual se mueve el fluido por la tubería. La velocidad media se calcula con el gasto de la bomba en  $m^3/s$  y el diámetro interno de tubería en m, como se muestra a continuación:

$$50 \frac{gal}{min} \left| \frac{3.784 lit}{1 gal} \right| \left| \frac{1 m^3}{1000 lit} \right| \left| \frac{1 min}{60 s} \right| = 3.15 E^{-3} \frac{m^3}{s}$$

$$V_4 = \frac{4Q}{\pi D^2} = \frac{4(3.15 E^{-3} \frac{m^3}{s})}{\pi(0.05m)^2} = 1.6042 \frac{m}{s}$$

<b>V en m/s = 1.6042</b>
--------------------------

Una vez obtenida la velocidad media, se calculará posteriormente el número de Reynolds y el factor de fricción. Antes de realizar éstos cálculos se obtendrá la altura del líquido necesaria para calcular la energía potencial. Esto se realiza como se muestra a continuación:

#### CAPITULO 4 ESTRUCTURA Y VALIDACIÓN DEL PROGRAMA

Del manual de tanques "Tank Insulated type MVRI" (VER ANEXO) se obtienen los datos necesarios para calcular el volumen del tanque:

$$h = 2175 \text{ mm} = 2.175 \text{ m}$$

$$\text{Vol}_{\text{TANQUE}} = \pi r^2 h = \pi(1.075\text{m})^2 (2.175 \text{ m})$$

$$\text{Vol}_{\text{TANQUE}} = 7.89 \text{ m}^3$$

Despejando h para calcular la altura del líquido con respecto al tanque, tenemos:

$$h = \frac{\text{Vol}_{\text{LIQUIDO}}}{\pi r^2} = \frac{6\text{m}^3}{\pi(1.075\text{m})^2} = 1.6526\text{m}$$

De ahí que:

$$\Delta Z = Z_4 - Z_1$$

$Z_1$  = altura del líquido con respecto al tanque + tramo de tubería (tomando como referencia el piso)

$Z_4$  = altura de la envasadora

$$Z_1 = 1.6526 \text{ m} + \text{tramo de tubería}$$

$$Z_1 = 1.6526 \text{ m} + 0.6 \text{ m}$$

$$Z_1 = 2.2526 \text{ m}$$

Por lo tanto podemos obtener  $\Delta Z$  para el balance de Energía Mecánica:

$$\Delta Z = Z_4 - Z_1 = 2.4 - 2.2526$$

$$\Delta Z = 0.1474 \text{ m}$$

Para obtener las Hfs es necesario calcular el número de Reynolds y el factor de fricción de Fanning.

Calculo del número de Reynolds:

$$Re = \frac{DV\rho}{\mu}$$

$$Re = \frac{(0.05m)(1.6042m/s)(1050kg/m^3)}{1.17 \times 10^{-3} kg/ms}$$

<b>Re = 71983.33</b>
----------------------

Como el Número de Reynolds muestra que el fluido se encuentra en régimen turbulento, por lo tanto, el Factor de fricción se puede calcular con la ecuación de Colebrook o mediante la gráfica de Moody.

a) Para calcular el Factor de fricción de Darcy mediante la ecuación de Colebrook, se resuelve la siguiente ecuación por iteraciones:

$$\frac{1}{\sqrt{Ff}} = 1.14 - \left[ 2 * \log \left( \frac{E}{D} + \frac{9.35}{Re * \sqrt{Ff}} \right) \right]$$

donde:

E = rugosidad del material (Drawn tubing<sup>20</sup>) = 0.00015 ft

D= Diámetro en ft

Ff = factor de fricción supuesto = 0.0075

$$\frac{1}{\sqrt{Ff}} = 1.14 - \left[ 2 * \log \left( \frac{0.00015}{0.01524} + \frac{9.35}{71983.33 * \sqrt{0.0075}} \right) \right]$$

$$\frac{1}{\sqrt{Ff}} = 5.030$$

$$Ff_{\text{calculado}} = 0.0395$$

---

<sup>20</sup> Saunders, 1988

#### CAPITULO 4 ESTRUCTURA Y VALIDACIÓN DEL PROGRAMA

Dado que  $0.039 \neq 0.0075$ , se debe suponer otro factor de fricción y realizar Nuevamente el calculo, hasta que los valores de los factores de fricción sean similares. Nuevo factor de fricción  $f = 0.0395$

$$\frac{1}{\sqrt{Ff}} = 1.14 - \left[ 2 * \log \left( \frac{0.00015}{0.01524} + \frac{9.35}{71983.33 * \sqrt{0.0395}} \right) \right]$$
$$\frac{1}{\sqrt{Ff}} = 5.1344$$

$$Ff_{\text{calculado}} = 0.03793$$

Como  $0.03793 \neq 0.0395$ , se supone otro factor de fricción. Nuevo factor de fricción  $f = 0.03793$

$$\frac{1}{\sqrt{Ff}} = 1.14 - \left[ 2 * \log \left( \frac{0.00015}{0.01524} + \frac{9.35}{71983.33 * \sqrt{0.03793}} \right) \right]$$
$$\frac{1}{\sqrt{Ff}} = 5.1531$$

$$Ff_{\text{calculado}} = 0.037658$$

Como  $0.037658 \neq 0.03793$ , se supone otro factor de fricción. Nuevo factor de fricción  $f = 0.037658$

$$\frac{1}{\sqrt{Ff}} = 1.14 - \left[ 2 * \log \left( \frac{0.00015}{0.01524} + \frac{9.35}{71983.33 * \sqrt{0.037658}} \right) \right]$$
$$\frac{1}{\sqrt{Ff}} = 5.1531$$

$$Ff_{\text{calculado}} = 0.037658$$

Como  $0.037658 = 0.037658$ , el valor del factor de fricción de Fanning es:

$$Ff_{\text{FANNING}} = \frac{0.037658}{4} = 0.0094145$$

$Ff_{\text{FANNING}} = 0.009415$

b) Calculo del Factor de fricción mediante la gráfica de Moody:

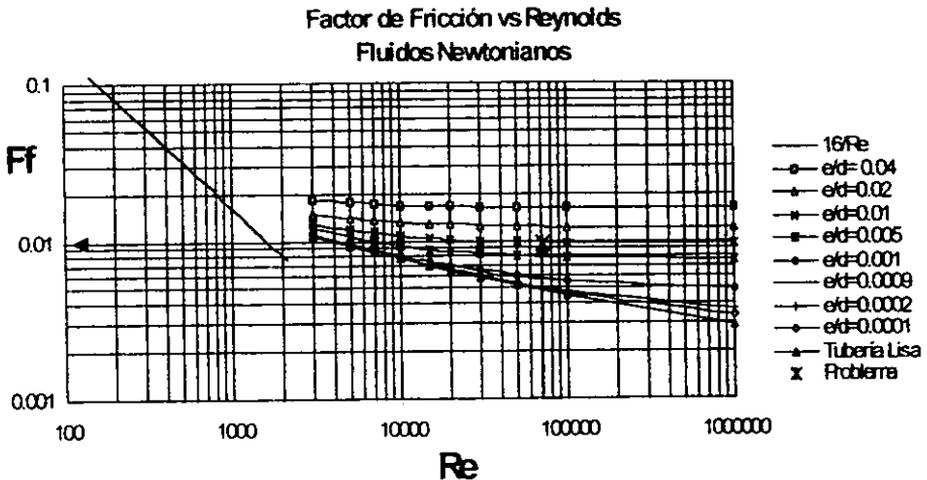
Para obtener el valor del factor de fricción, se debe dividir el valor de la rugosidad del material entre el diámetro de tubería, en función de este valor se utiliza la línea más próxima al valor obtenido y esta se intercepta con el valor del número de Reynolds y con estos dos valores se lee el valor del factor de fricción en el lado izquierdo de la gráfica de Moody .

Los valores tomados para leer el factor de fricción son:

$$e/d = 0.00015 \text{ ft} / 0.01524 \text{ ft}$$

$$e/d = 0.0098$$

$$Re = 71983.33$$



## CAPITULO 4 ESTRUCTURA Y VALIDACIÓN DEL PROGRAMA

El valor leído en la gráfica es:

$$\text{Factor de fricción} = 0.0095$$

Comparando los valores de Factor de fricción gráfico y el de la ecuación, se puede observar que son muy similares. Pero, para realizar una comparación adecuada con los datos del programa (en el cual se utiliza la ecuación de Colebrook), se utiliza el valor del factor de fricción calculado mediante la ecuación de Colebrook.

Calculo de las pérdidas de presión debidas a la fricción (Hfs) de 1 a 4:

$$Hfs_{\text{TOTALES}} = Hfs_{\text{TUBERIA}} + Hfs_{\text{ACCESORIOS}}$$

$$Hfs_{\text{TUBERIA}} = \frac{2f\beta.V^2}{Dgc}$$

$$Hfs_{\text{TUBERIA}} = \frac{2(0.0094145)(10.924m)(1.6042m/s)^2}{0.05m(1Kg/m \cdot s^2)}$$

$$Hfs_{\text{TUBERIA TOTAL en Nm/kg}} = \underline{10.5865}$$

$$Hfs_{\text{ACCESORIOS}} = \frac{2f\beta_{eq}V^2}{Dgc}$$

Para obtener los valores de Le/D es necesario consultar el CUADRO 2 citado en la página 14.

ACCESORIOS:

4 codos de 90°

1 válvula de compuerta

Calculo de longitud equivalente:

codo 90°                      Le/D = 30                      Le = 30 X 0.05 m X 4 codos = 6 m

válvula de compuerta      Le/D = 9                      Le = 9 X 0.05 m X 1 válvula = 0.45 m

#### CAPITULO 4 ESTRUCTURA Y VALIDACIÓN DEL PROGRAMA

Longitud equivalente total = 6 m + 0.45 m = 6.45 m

$$Hfs_{ACCESORIOS} = \frac{2(0.0094145)(6.45m)(1.6042m/s)^2}{0.05m(1kgm/Ns^2)}$$

$$Hfs_{ACCESORIOS\ TOTAL\ en\ Nm/kg} = \underline{6.2507}$$

Hfs **TOTALES** en Nm/kg = 16.8372

Energía potencial:

$$\frac{\Delta Zg}{gc} = \frac{0.1474(9.81)}{1} = 1.4459 Nm / Kg$$

$$Energía\ Potencial\ en\ Nm/kg = \underline{1.4459}$$

Energía cinética:

Es importante tomar en cuenta que la velocidad en el punto 1 es cero, ya que, el fluido permanece sin movimiento.

$$\frac{\Delta V^2}{2gc} = \frac{(1.6042m/s)^2}{2(1)(1)} = 1.2867 Nm / Kg$$

$$Energía\ Cinética\ en\ Nm/kg = \underline{1.2867}$$

**NOTA:** La energía de presión ( $\Delta P$ ) es cero, ya que se considera que los tanques están abiertos a la presión atmosférica. Los valores de Q y  $\Delta E$  se eliminan debido a que no hay transferencia de calor ni de energía.

#### CAPITULO 4 ESTRUCTURA Y VALIDACIÓN DEL PROGRAMA

$$\text{Energía de Presión en Nm/Kg} = \underline{0}$$

Sustituyendo en el Balance de Energía Mecánica los valores obtenidos, se tiene que el trabajo de flecha es de:

$$Wf = \frac{\Delta Z_g}{gc} + \frac{\Delta V^2}{2\alpha gc} + Hf_{s_{1-4}}$$

$$\therefore Wf = 1.4459 \text{ Nm/kg} + 1.2867 \text{ Nm/kg} + 16.837 \text{ Nm/kg}$$

$$Wf \text{ en Nm/kg} = \underline{19.5696}$$

Calculo de las pérdidas de presión debidas a la fricción (Hfs) de 1 a 2:

$$Hf_{\text{TUBERIA}} = \frac{2(0.0094145)(2.6m)(1.6042m/s)^2}{(0.05m)(1Kg/m \cdot s^2)}$$

$$Hf_{\text{TUBERIA}} \text{ en Nm/kg} = \underline{2.5196}$$

Para obtener los valores de Le/D es necesario consultar el CUADRO 2 citado en la página 14.

#### ACCESORIOS

1 CODO 90°

1 VALVULA DE COMPUERTA

Calculo de longitud equivalente:

codo 90°                      Le/D = 30                      Le = 30 X 0.05 m X 1 codos = 1.5 m

válvula de compuerta      Le/D = 9                      Le = 9 X 0.05 m X 1 válvula = 0.45 m

Longitud equivalente = 1.5 m + 0.45 m = 1.95 m

#### CAPITULO 4 ESTRUCTURA Y VALIDACIÓN DEL PROGRAMA

$$H_{fs_{ACCESORIOS}} = \frac{2(0.0094145)(1.95m)(1.6042m/s)^2}{0.05m(1kgm/Ns^2)}$$

$$H_{fs_{ACCESORIOS}} \text{ en Nm/kg} = \underline{1.8897}$$

Es importante conocer la presión de succión y de descarga cuando el tanque se encuentre vacío y lleno, ya que de esta manera, se asegura el funcionamiento del equipo de bombeo, previniendo así que el equipo no se dañe. Además, al conocer estos valores se evita que se presente el fenómeno de cavitación en la bomba.

#### PARA TANQUE LLENO:

Calculo de la  $P_{SUCCION} = P_2$

$$0 = \frac{P_2 - P_1}{\rho} + \frac{\Delta Z g}{gc} + \frac{\Delta V^2}{2\alpha gc} + H_{fs_{TUBERIA}}$$

Calculando  $\Delta Z$  de (1 a 2), se tiene:

$$\Delta Z = Z_2 - Z_1$$

$Z_2$  = distancia entre piso y tubería

$$\Delta Z = 0.15 - 2.2526$$

$$\Delta Z = - 2.1026 \text{ m}$$

Despejando la presión de succión:

$$P_2 = P_1 - \left( \frac{\Delta Z_{1-2} g}{gc} + \frac{\Delta V^2}{2\alpha gc} + H_{fs_{TUBERIA(1-2)}} \right) \rho$$

$P_2 =$

$$77007 - \left( \frac{-2.1026m(9.81m/s^2)}{1kgm/Ns^2} + \frac{(1.6042m/s)^2}{2(1)(1kgm/Ns^2)} + 4.4093Nm/kg \right) 1050kg/m^3$$

$P_2 = 92684.001 \text{ Pa}_{abs}$

$$\text{Presión de succión tanque lleno en } Pa_{abs} = \underline{92684.001}$$

#### CAPITULO 4 ESTRUCTURA Y VALIDACIÓN DEL PROGRAMA

Calculo de la Presión de descarga =  $P_3$

$$P_3 = Wf \rho + P_2$$

**ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

$$P_3 = (19.5696 \text{ Nm/kg})(1050 \text{ kg/m}^3) + 92684.001 \text{ Pa}_{\text{abs}}$$

$$P_3 = 113232.081 \text{ Pa}_{\text{abs}}$$

**Presión de descarga tanque lleno en  $\text{Pa}_{\text{abs}} = 113232.081$**

Calculo de NPSHd tanque lleno:

$$\text{NPSHd} = P_{\text{succión}} - P_{\text{vapor}}$$

$$\text{NPSHd} = 92684.001 - 5623.4$$

$$\text{NPSHd} = 87060.601$$

**NPSHd tanque lleno en  $\text{Pa} = 87060.601$**

La mayoría de las veces los fabricantes manejan este dato en  $\text{ft H}_2\text{O}$

$$1 \text{ Pa} = 3.3 \times 10^{-4} \text{ ft H}_2\text{O} \text{ por lo tanto NPSHd} = \underline{28.7299 \text{ ft H}_2\text{O}}$$

POTENCIA DE LA BOMBA (tanque lleno):

$$\text{Potencia} = Wf * \text{Flujo másico}$$

$$\text{Potencia} = (19.5696 \text{ Nm/kg})(11919.5996 \text{ kg/h}) = 233261.7963 \text{ Nm/h}$$

Multiplicando por el factor de conversión a hp

$$\text{Potencia} = 233261.7963 \text{ Nm/h} (3.7086 \times 10^{-7}) = 0.086 \text{ hp}$$

**POTENCIA DE LA BOMBA (tanque lleno) en HP = 0.086**

CABEZAL ( $\Delta H$ ) tanque lleno

$$\Delta H = P_{\text{DESCARGA (tanque lleno)}} - P_{\text{SUCCION (tanque lleno)}}$$

$$\Delta H = 113232.081 - 92684.001 = 20548.08$$

**CABEZAL (tanque lleno) en Pa = 20548.08**

La mayoría de las veces los fabricantes manejan este dato en ft H<sub>2</sub>O

$$1\text{Pa} = 3.3 \times 10^{-4} \text{ ft H}_2\text{O} \text{ por lo tanto CABEZAL} = \underline{6.7808 \text{ ft H}_2\text{O}}$$

**PARA TANQUE VACIO:**

$$P_{\text{succión}} = P_2$$

$$P_1 = 77007 \text{ Pa}$$

$$P_2 =$$

$$P_1 - \left( \frac{-0.45m(9.81m/s^2)}{1Kg/m^3} + \frac{(1.6042m/s)^2}{2(1)(1Kg/m^3)} + 4.4093Nm/Kg \right) * 1050Kg/m^3$$

$$P_{\text{succión}} = 75661.3947 \text{ Pa}_{\text{abs}}$$

**Presión de succión tanque vacio en Pa<sub>abs</sub> = 75661.3947**

$$P_{\text{descarga}} = P_3$$

#### CAPITULO 4 ESTRUCTURA Y VALIDACIÓN DEL PROGRAMA

$$P_3 = Wf_1 \rho + P_2$$

$$Wf_1 = \frac{\Delta Zg}{gc} + \frac{\Delta V^2}{2\alpha gc} + Hf_{S_{TOTALS(1-4)}}$$

$$\Delta Z = ((L_3 - 0.6)g) / gc$$

$L_3$  = altura de la envasadora

$$\Delta Zg = (2.4m - 0.6m)(9.81m/s^2) = 17.658 \text{ m}^2/s^2$$

$$Wf_1 = \frac{17.658 \text{ m}^2 / \text{s}^2}{1 \text{ Kg}m / \text{Ns}^2} + \frac{(1.6042 \text{ m} / \text{s})^2}{2(1)(1 \text{ Kg}m / \text{Ns}^2)} + 16.8372 \text{ Nm} / \text{Kg}$$

$$Wf_1 = 35.7819 \text{ Nm/kg}$$

$$P_3 = (35.7819 \text{ Nm/kg})(1050 \text{ kg/m}^3) + 75661.3947 \text{ Pa}_{\text{abs}}$$

$$P_{\text{descarga}} = 113232.4199 \text{ Pa}_{\text{abs}}$$

**Presión de descarga tanque vacío en  $\text{Pa}_{\text{asb}} = \underline{\underline{113232.4199}}$**

NPSHd tanque vacío:

$$\text{NPSHd tanque vacío} = P_{\text{succión}} - P_{\text{vapor}}$$

$$\text{NPSHd} = 75661.3947 \text{ Pa}_{\text{abs}} - 5623.4 \text{ Pa}_{\text{abs}}$$

$$\text{NPSHd} = 70037.9947 \text{ Pa}$$

$$\text{NPSHd tanque vacío en Pa} = \underline{70037.9947}$$

La mayoría de las veces los fabricantes manejan este dato en ft H<sub>2</sub>O

$$1\text{Pa} = 3.3 \times 10^{-4} \text{ ft H}_2\text{O} \text{ por lo tanto NPSHd} = \underline{23.1125 \text{ ft H}_2\text{O}}$$

POTENCIA DE LA BOMBA (tanque vacío):

$$\text{Potencia} = Wf_1 * \text{Flujo másico}$$

$$\text{Potencia} = (35.7819 \text{ Nm/kg})(11919.5996 \text{ kg/h}) = 426505.9209 \text{ Nm/h}$$

Multiplicando por el factor de conversión a hp

$$\text{Potencia} = 426505.9209 \text{ Nm/h} (3.7086 \times 10^{-7})$$

$$\text{Potencia} = 0.1581 \text{ hp}$$

---

$$\text{POTENCIA DE LA BOMBA (tanque vacío) en HP} = \underline{0.1581}$$

---

CABEZAL tanque vacío

$$\Delta H = P_{\text{DESCARGA (tanque vacío)}} - P_{\text{SUCCION (tanque vacío)}}$$

$$\Delta H = 113232.4199 - 75661.3947 = 37571.0252$$

$$\text{CABEZAL (tanque vacío) en Pa} = \underline{37571.025}$$

La mayoría de las veces los fabricantes manejan este dato en ft H<sub>2</sub>O

$$1\text{Pa} = 3.3 \times 10^{-4} \text{ ft H}_2\text{O} \text{ por lo tanto CABEZAL} = \underline{12.3984 \text{ ft H}_2\text{O}}$$

#### CAPITULO 4 ESTRUCTURA Y VALIDACIÓN DEL PROGRAMA

Para un fluido NEWTONIANO:

TIEMPO DE REINICIO DE LLENADO DE LA TOLVA

tiempo de reinicio = tiempo de vaciado+ tiempo que tarda la bomba en llenar tolva

tiempo de reinicio = 0.5 min + 5.676 min = 6.176 min

-----  
**Tiempo de reinicio de llenado de la tolva = 6.176 min**  
-----

TIEMPO QUE TARDA LA BOMBA EN VOLVER A LLENAR LA TOLVA:

$$\text{tiempo} = \frac{\text{Capacidad}_{\text{TOLVA}}(\text{gal})}{(\text{Caudal}_{\text{BOMBA}}(\text{gal/s}) - \text{Velocidad}_{\text{ENTRADA}}(\text{gal/s}))}$$

$$\text{tiempo} = \frac{25\text{gal}}{(0.83333\text{gal/s} - 0.0734085\text{gal/s})}$$

tiempo = 32.899433 s

-----  
**Tiempo que tarda la bomba en volver a llenar la tolva = 32.8994 s**  
-----

#### CAPITULO 4 ESTRUCTURA Y VALIDACIÓN DEL PROGRAMA

TIEMPO DE VACIADO DEL TANQUE:

$$\text{tiempo de vaciado del tanque} = \frac{\text{Volumen}_{\text{LIQUIDO en TANQUE}}(h)}{\text{Velocidad}_{\text{ENVASADO}}(\text{gal/s})}$$

$$\text{tiempo de vaciado del tanque} = \frac{5206.8 \text{ l}}{0.0734085 \text{ gal/s}} = 70929.1158 \text{ l/gal}$$

$$70929.1158 \left| \frac{\text{ls}}{\text{gal}} \right| \left| \frac{1 \text{ gal}}{3.784 \text{ l}} \right| \left| \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \right| = 5.2068 \text{ h}$$

**Tiempo de vaciado del tanque = 5.2068 h**

## CAPITULO 4 ESTRUCTURA Y VALIDACIÓN DEL PROGRAMA

Para un fluido de la POTENCIA.

### **EJEMPLO 2:**

De acuerdo con el esquema, realizar los cálculos que permitan obtener la información necesaria para seleccionar un sistema de bombeo, con el cual se enviarán 50 GPM de un fluido que sigue la ley de la potencia hacia una envasadora que tiene una altura de 2.5 m, la cual está provista de una tolva con una capacidad de 20 galones.

El nivel de producción de la envasadora es de 190 env/min y cada envase tiene una capacidad de 250 g. Considerar que el tiempo total del proceso es de 2 h 25 min.

El fluido de la potencia presenta las siguientes propiedades:

Densidad =  $1320 \text{ kg/m}^3$

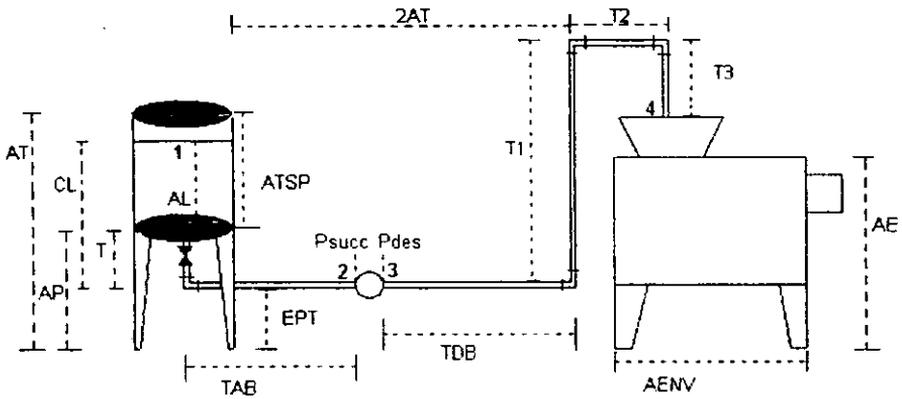
Índice de consistencia de  $9.3 \text{ Pas}^n$

Índice de comportamiento al flujo = 0.25

Presión de vapor =  $9584.8345 \text{ Pa}_{\text{abs}}$

NOTA: El tiempo total de proceso es un valor supuesto, tomando como base que algunos procesos industriales de transformación de alimentos tardan en promedio tal tiempo.

Para iniciar la resolución del problema se enlistan los siguientes datos:



- AT= Altura del tanque
- AL= Altura del líquido en el tanque
- AP= Altura de las patas del tanque
- ATSP= Altura del tanque sin patas
- CL = Columna de líquido
- EPT= Espacio entre piso y tubería
- TAB= Tubería antes de la bomba
- TDB= Tubería después de la bomba
- AENV= Ancho de la envasadora
- AE= Altura de la envasadora
- T= Tubería debajo del tanque
- T1= Tubería vertical
- T2= Tubería horizontal hacia la envasadora
- T3= Tubería descendente hacia la envasadora

**Datos del fluido:**

$\rho = 1320 \text{ kg/m}^3$

$k = 9.3 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$

$n = 0.25$

$P_{\text{vapor}} = 9584.8345 \text{ Pa}_{\text{abs}}$

**Datos del equipo:**

Gasto de la bomba propuesto = 50 GPM

Capacidad de la tolva = 20 Gal

Nivel de producción = 190 env/min

Capacidad del envase = 250 g

AP = 0.6 m

EPT = 0.15 m

AE = 2.5 m

AENV = 2.5 m

T2 = 0.25 m

T3 = 0.2 m

$T1 = AE + T3 - EPT = 2.5 \text{ m} + 0.2 \text{ m} - 0.15 \text{ m} = 2.55$

Para calcular las demás distancias de tubería es necesario seleccionar el tanque que se debe de utilizar, el cual se seleccionará posteriormente.

Presión en el punto 1 = 77007 Pa

Presión en el punto 4 = 77007 Pa

Esta presión corresponde a la presión atmosférica de Cuautitlán Izcalli, cabe hacer mención que la presión atmosférica es diferente en cada ciudad y dependiendo del lugar en donde se considere instalar la industria, la presión atmosférica que se utilice para realizar los cálculos debe ser la que corresponda a la ciudad respectiva.

Número de accesorios (ver figura al inicio del ejemplo):

Válvulas de compuerta = 1

Válvulas check = 0

Número de codos = 4

#### CAPITULO 4 ESTRUCTURA Y VALIDACIÓN DEL PROGRAMA

Cálculo de la capacidad del envase en ml/env:

Es necesario utilizar el dato de la densidad del fluido y los factores de conversión correspondientes.

$$\frac{250g}{env} \left| \frac{1kg}{1000g} \right| \left| \frac{1m^3}{1320kg} \right| \left| \frac{1000lt}{1m^3} \right| \left| \frac{1000ml}{1lt} \right| = 189ml / env$$

Capacidad del envase en ml/env = 189

Antes de realizar los cálculos para el balance de energía mecánica, se procede a la selección del tanque de almacenamiento, para lo cual se realizan los siguientes cálculos:

+Para esto es necesario emplear los datos del nivel de producción y el tiempo total de proceso. Primero se calcula la cantidad de producto por hora que será envasado en ese tiempo:

$$\frac{190env}{min} \left| \frac{60min}{1hr} \right| \left| \frac{189ml}{env} \right| \left| \frac{1lt}{1000ml} \right| \left| \frac{1m^3}{1000lt} \right| = 2.1546 \frac{m^3}{hr}$$

Una vez calculado el volumen total de líquido que es envasado por hora, se calcula el volumen de líquido que será almacenado en el tanque para abastecer a la envasadora, mientras el siguiente lote de producto esta listo. Para esto es necesario, multiplicar el volumen por el tiempo total de proceso, como se muestra a continuación:

$$\therefore \frac{2.1546m^3}{h} [2.4166h] = 5.206m^3 \approx 5206.8lt$$

Volumen en lt del liquido = 5206.8

#### CAPITULO 4 ESTRUCTURA Y VALIDACIÓN DEL PROGRAMA

NOTA: El dato de 2.4166 horas, corresponde al tiempo total del proceso que es de 2 horas 25 minutos.

Con este volumen se procede a la selección del tanque. El tanque seleccionado corresponde a un volumen de 6000 lt. (Ver Anexo):

$$AT= 2.975 \text{ m}$$

$$\text{Diámetro externo del tanque} = 2.15 \text{ m}$$

$$\text{Diámetro interno del tanque} = 2.0 \text{ m}$$

$$AP= 0.8 \text{ m}$$

$$ATSP= 2.175 \text{ m}$$

Una vez conocidas las dimensiones del tanque se pueden establecer las dimensiones de tubería faltantes, tales como:

$$T= 0.45 \text{ m}$$

$$TAB= 2.15 \text{ m} = \text{Diámetro externo del tanque}$$

$$TDB= 2 * AE = 2 * 2.5 \text{ m} = 5 \text{ m}$$

Después de haber obtenido éstos valores se puede calcular la longitud de tubería total y la longitud de tubería antes bomba:

Para la longitud de tubería total:

$$\text{Longitud de tubería de tanque a envasadora} = 12.25 \text{ m}$$

Para la longitud de tubería del tanque a la bomba:

$$\text{Longitud de tubería del tanque a la bomba} = T + TAB$$

$$\text{Longitud de tubería del tanque a la bomba} = 0.45 \text{ m} + 2 \text{ m} = 2.45 \text{ m}$$

#### CAPITULO 4 ESTRUCTURA Y VALIDACIÓN DEL PROGRAMA

Una vez calculadas las distancias que se utilizarán en el sistema, se puede comprobar que la bomba siempre estará funcionando, esto se realizará con el fin de que el equipo no sufra daños posteriores por falta de alimentación del fluido, para esto se realizan los cálculos siguientes:

+Cálculo del tiempo de funcionamiento de la bomba:

Se toma la capacidad de la tolva y se divide entre el tiempo de operación de la bomba, el cual debe de ser de preferencia menor al tiempo en que tarda en vaciarse la tolva.

Como la bomba funciona a 50 GPM, se calcula el tiempo de vaciado de la tolva y el tiempo de llenado de la tolva, para verificar que los tiempos son los adecuados y que siempre habrá líquido en la tolva. Como se muestra a continuación:

$$\frac{\text{gal}_{\text{tolva}}}{\text{gpm}_{\text{Bomba}}} = \text{tiempo}$$

$$\frac{20_{\text{gal}}}{50_{\text{gpm}}} = 0.4_{\text{min}}$$

El tiempo que trabaja la bomba para llenar la tolva es de **0.4 minutos**. Para determinar si este tiempo es adecuado es necesario calcular el tiempo que tarda en vaciarse la tolva.

**Tiempo que tarda la Bomba en llenar la Tolva = 24 segundos**

Para conocer el tiempo de vaciado de la tolva se debe partir del nivel de producción y la velocidad de envasado:

Velocidad de Envasado:

$$\text{Velocidad} = (\text{Nivel de Producción}) / (\text{Capacidad del envase})$$

**CAPITULO 4 ESTRUCTURA Y VALIDACIÓN DEL PROGRAMA**

$$\text{Velocidad} = (190 \text{ env/min})(189 \text{ ml/env}) = 35910 \text{ ml/min}$$

$$\frac{35910 \text{ ml}}{\text{min}} \left| \frac{1 \text{ l}}{1000 \text{ ml}} \right| \left| \frac{1 \text{ gal}}{3.784 \text{ l}} \right| = 9.4899 \text{ GPM}$$

<b>Velocidad de Envasado = <u>0.07340 gal/s</u></b>
---

$$\frac{\text{gal}_{\text{tolva}}}{\text{velocidad - de - envasado}} = \text{tiempo} \quad \frac{20 \text{ gal}}{9.4899 \text{ gal/min}} = 2.1075 \text{ min}$$

<b>Tiempo de vaciado de la tolva = <u>2.1075 min</u></b>
--

Como el tiempo que tarda la bomba en llenar la tolva es menor que el tiempo de vaciado de la tolva, podemos decir que el gasto de la bomba es el correcto, ya que se ha asegurado que la bomba no tendrá problemas de alimentación. Por lo que con éste gasto de la bomba, se podrá calcular el diámetro de la tubería.

+Diámetro de la tubería :

Para conocer el diámetro de la tubería se convierten los 50GPM a Kg/h y con ese valor se lee en el cuadro 6:

$$50 \frac{\text{gal}}{\text{min}} \left| \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \right| \left| \frac{3.784 \text{ l}}{1 \text{ gal}} \right| \left| \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ l}} \right| \left| \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ h}} \right| \left| \frac{1320 \text{ Kg}}{\text{m}^3} \right| = 14984.64 \frac{\text{Kg}}{\text{h}}$$

<b>Flujo másico en kg/h = <u>14984.64</u></b>
---

#### CAPITULO 4 ESTRUCTURA Y VALIDACIÓN DEL PROGRAMA

Gasto Másico (Kg/h)	Diámetro de tubería (in)	Diámetro de tubería (mm)
<2,000	1½	25
2,001 a 6,600	2	40
6,601 a 15,000	2½	50
<b>15,001 a 23,600</b>	<b>3</b>	<b>65</b>
23,601 a 37,500	4	75

CUADRO 6: Diámetros Recomendados (Hui, 1993)

Se utilizó el cuadro 6 con la cédula 80 ya que estos diámetros son muy similares a los diámetros que se utilizan para tuberías en acero inoxidable denominadas "tubing" (utilizadas en la industria alimentaria).

Para obtener la información necesaria para seleccionar una bomba es importante realizar los balances de energía mecánica entre los puntos 1 y 4 y del 1 al 2 (Ver figura al inicio del ejemplo). El balance de energía mecánica entre los puntos 1y 4, nos permiten calcular la energía necesaria que se requiere para mover el fluido por todo el sistema, y el balance de 1 a 2 nos permite corroborar que la presión de succión es mayor que la presión de vapor y por lo tanto no se presentarán problemas de cavitación en la bomba.

## CAPITULO 4 ESTRUCTURA Y VALIDACIÓN DEL PROGRAMA

REALIZANDO EL BALANCE DE ENERGÍA MECÁNICA DE (1 a 4):

$$Wf = \frac{\Delta P}{\rho} + \frac{\Delta Zg}{gc} + \frac{\Delta V^2}{2\alpha gc} + Q + \Delta E + Hfs$$

Para calcular  $Wf$  es necesario calcular las  $Hfs$ , para esto es necesario contar con el factor de fricción y el Reynolds, por lo que se debe de conocer la velocidad media a la cual se mueve el fluido por la tubería. La velocidad media se calcula con el gasto de la bomba en  $m^3/s$  y el diámetro interno de tubería en m, como se muestra a continuación:

$$50 \frac{\text{gal}}{\text{min}} \left| \frac{3.784 \text{lt}}{1 \text{gal}} \right| \left| \frac{1 \text{m}^3}{1000 \text{lt}} \right| \left| \frac{1 \text{min}}{60 \text{s}} \right| = 3.15 \text{E}^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$V_4 = \frac{4(3.15 \text{E}^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{s}})}{\pi(0.065 \text{m})^2} = 0.9492791 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

<b>V en m/s = <u>0.9492791</u></b>
------------------------------------

Una vez obtenida la velocidad media, se calculará posteriormente el número de Reynolds y el factor de fricción. Antes de realizar éstos cálculos se obtendrá la altura del líquido necesaria para calcular la energía potencial. Esto se realiza como se muestra a continuación:

Del manual de tanques "Tank Insulated type MVRI" (Ver Anexo) se obtienen los siguientes datos para calcular el volumen del tanque:

#### CAPITULO 4 ESTRUCTURA Y VALIDACIÓN DEL PROGRAMA

$$h = 2175 \text{ mm} = 2.175 \text{ m}$$

$$Vol_{TANQUE} = \pi r^2 h = \pi(1\text{m})^2 (2.175 \text{ m})$$

$$Vol_{TANQUE} = 6.8329 \text{ m}^3$$

Despejando h para calcular la altura del liquido con respecto al tanque, tenemos:

$$h = \frac{Vol_{LIQUIDO}}{\pi r^2} = \frac{5.206\text{m}^3}{\pi(1\text{m})^2} = 1.6571\text{m}$$

De ahí que:

$$\Delta Z = Z_4 - Z_1$$

$Z_4$  = altura de la envasadora

$Z_1$  = altura del liquido con respecto al tanque + tramo de tubería (tomando como referencia el piso)

$$Z_1 = 1.6571 \text{ m} + \text{tramo de tubería}$$

$$Z_1 = 1.6571 \text{ m} + 0.6 \text{ m}$$

$$Z_1 = 2.2571 \text{ m}$$

Por lo tanto podemos obtener  $\Delta Z$  para el balance de Energía Mecánica:

$$\Delta Z = Z_4 - Z_1$$

$$\Delta Z = 2.5 - 2.2571$$

$$\Delta Z = 0.2429 \text{ m}$$

Para obtener las Hfs es necesario calcular el número de Reynolds y el factor de fricción de Fanning.

CAPITULO 4 ESTRUCTURA Y VALIDACIÓN DEL PROGRAMA

Calculando el número de Reynolds:

$$Re_{gen} = \frac{D^n V^{2-n} \rho}{8^{n-1} K} \left( \frac{4n}{3n+1} \right)^n$$

$$Re_{gen} = \frac{(0.065m)^{0.25} (0.9492791m/s)^{2-0.25} (1320Kg/m^3) \left( \frac{4(0.25)}{3(0.25)+1} \right)^{0.25}}{8^{0.25-1} (9.3Pas^n)}$$

$$Re_{gen} = \underline{270.593}$$

El Número de Reynolds nos muestra que el fluido esta fluyendo en Régimen Laminar.

Calculando el Factor de fricción de Fanning:

$$Ff_{FANNING} = \frac{16}{Re}$$

$$Ff_{FANNING} = \frac{16}{270.593}$$

$$Ff_{FANNING} = \underline{0.05912939}$$

Calculando  $\alpha$ :

$$\alpha = \frac{((2n+1)(5n+3))}{3(3n+1)^2}$$

$$\alpha = \frac{(2(0.25)+1)(5(0.25)+3)}{3(3(0.25)+1)^2}$$

$$\alpha = \underline{0.6938}$$

## CAPITULO 4 ESTRUCTURA Y VALIDACIÓN DEL PROGRAMA

Calculando las pérdidas de presión debidas a la fricción (Hfs) de 1 a 4:

$$Hfs_{\text{TOTALES}} = Hfs_{\text{TUBERIA}} + Hfs_{\text{ACCESORIOS}}$$

$$Hfs_{\text{TUBERIA}} = \frac{2f \cdot l \cdot V^2}{Dgc}$$

$$Hfs_{\text{TUBERIA}} = \frac{2(0.05912939)(12.25m)(0.9492791m/s)^2}{0.065m(1Kg/m \cdot Ns^2)}$$

$Hfs_{\text{TUBERIA TOTAL en Nm/kg}} = \underline{20.2476}$
---

Para calcular las pérdidas de presión debidas a la fricción para los accesorios, se han propuesto dos formas de calcularlas: la primera, suponiendo que el valor de  $Le/D_{\text{TURBULENTO}}$  es igual a  $Le/D_{\text{LAMINAR}}$  (CUADRO 2 página 14), y la segunda utilizando la gráfica obtenida por las ecuaciones propuestas por Steffe (pág. 21,22).

a) Calculo de  $K_f$  para un codo  $90^\circ$  a partir de la relación de  $Le/D_{\text{TURBULENTO}}$ :

Para calcular el valor de  $K_f$ , se requiere multiplicar el valor de  $Le/D$  del accesorio por el factor de fricción calculado previamente.

$$K_f = (Le/D)(F_f)$$

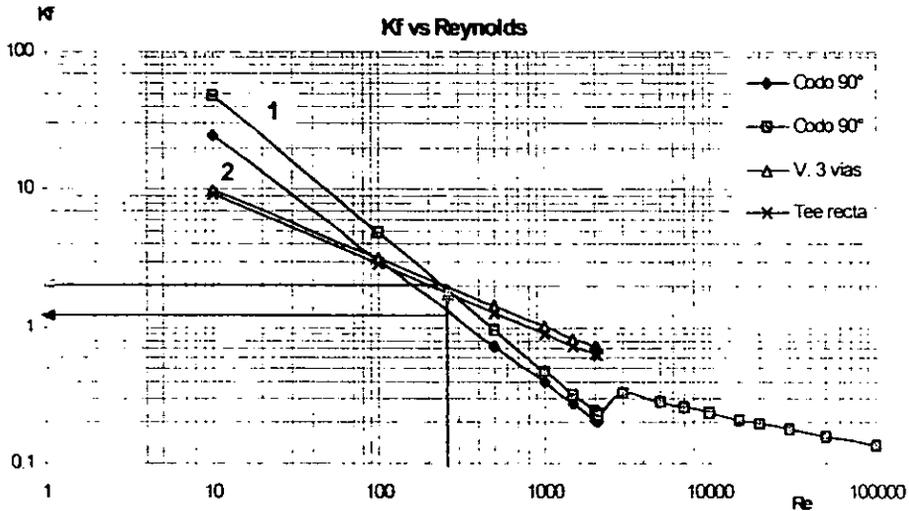
$$Le/D = 30$$

$$F_f = 0.05912939$$

$$K_f = 1.7738817$$

#### CAPITULO 4 ESTRUCTURA Y VALIDACIÓN DEL PROGRAMA

b) Calculando las pérdidas de presión debidas a la fricción, por medio de la gráfica de  $K_f$  basada en las ecuaciones propuestas por Steffe, se obtienen los siguientes resultados:



De acuerdo con el valor de Reynolds, que es de 270.593, se lee de la gráfica el valor de  $K_f$  para el accesorio correspondiente, obteniendo los siguientes resultados:

Codo de 90°

- $K_f = 1.77$  utilizando la relación  $Le/D = 30$  (línea 1) ó
- $K_f = 1.26$  utilizando la relación de Steffe (línea 2)

Una vez que se conocen los valores de  $K_f$ , tanto por el valor de  $Le/D$  como por las ecuaciones de Steffe se calculan las pérdidas de presión debidas a la fricción en un accesorio para comparar los resultados obtenidos por ambas formas y así justificar que el cálculo se puede realizar de cualquier manera, siempre y cuando el valor del número de Reynolds no sea demasiado pequeño (menores de 100), ya que en este caso, si existe una diferencia significativa entre los valores, como se observa en la gráfica anterior.

#### CAPITULO 4 ESTRUCTURA Y VALIDACIÓN DEL PROGRAMA

$$H_{fs\text{codo}} = \frac{2KfV^2}{gc}$$

$$a) \quad H_{fs\text{codo}} = \frac{2(1.77)(0.949279 \text{ m/s})^2}{1 \text{ kgm/Ns}^2}$$

$$H_{fs\text{codo}} = 3.19 \text{ Nm/kg}$$

$$b) \quad H_{fs\text{codo}} = \frac{2(1.26)(0.949279 \text{ m/s})^2}{1 \text{ kgm/Ns}^2}$$

$$H_{fs\text{codo}} = 2.39 \text{ Nm/kg}$$

Como no se cuentan con otras relaciones para los demás accesorios, y los valores de caída de presión debidos a la fricción obtenidos con la relación  $Le/D$  son mayores (con lo cual se puede asegurar el buen funcionamiento del sistema) a los obtenidos con la relación de Steffe, por lo tanto, se puede utilizar para realizar el cálculo de las  $H_{fs}$  en los accesorios la relación  $Le/D$ .

Calculo de pérdidas de presión debidas a la fricción de 1 a 4:

#### ACCESORIOS:

4 codos de 90°

1 válvula de compuerta

codo 90°                       $Le/D = 30$                $Le = 30 \times 0.065 \text{ m} \times 4 \text{ codos} = 7.8 \text{ m}$

válvula de compuerta       $Le/D = 9$                $Le = 9 \times 0.065 \text{ m} \times 1 \text{ válvula} = 0.585 \text{ m}$

Longitud equivalente total = 7.8 m + 0.585 m = 8.385 m

#### CAPITULO 4 ESTRUCTURA Y VALIDACIÓN DEL PROGRAMA

$$Hfs_{ACCESORIOS} = \frac{2(0.05912939)(8.385m)(0.9492791m/s)^2}{0.065m(1kgm/Ns^2)}$$

$$Hfs_{ACCESORIOS} \text{ TOTAL en Nm/kg} = \underline{13.7470}$$

Hfs **TOTALES** en Nm/kg = 33.98

Energía potencial:

$$\frac{\Delta Zg}{gc} = \frac{0.2429m(9.81m/s^2)}{1kgm/Ns^2} = 2.38Nm/kg$$

$$\text{Energía Potencial en Nm/Kg} = \underline{2.3828}$$

Energía cinética:

Es importante tomar en cuenta que la velocidad en el punto 1 es cero, ya que, el fluido permanece sin movimiento.

$$\frac{\Delta V^2}{2gc} = \frac{(0.9492791m/s)^2}{2(0.6938)(1kgm/Ns^2)} = 0.65071Nm/kg$$

$$\text{Energía Cinética en Nm/kg} = \underline{0.65071}$$

**NOTA:** La energía de presión ( $\Delta P$ ) es cero, ya que se considera que los tanques están abiertos a la presión atmosférica.

Los valores de Q y  $\Delta E$  se eliminan debido a que no hay transferencia de calor ni de energía.

$$\text{Energía de Presión en Nm/kg} = \underline{0}$$

## CAPITULO 4 ESTRUCTURA Y VALIDACIÓN DEL PROGRAMA

Sustituyendo en el Balance de Energía Mecánica los valores obtenidos, y eliminando los términos tenemos que el trabajo de flecha es:

$$W_f = \frac{\Delta Z g}{g c} + \frac{\Delta V^2}{2 a g c} + H f s_{(1-4)}$$

$$\therefore W_f = 2.380142 \text{ Nm/kg} + 0.650716 \text{ Nm/kg} + 33.98 \text{ Nm/kg}$$

$$W_f \text{ en Nm/kg} = \underline{37.019}$$

Calculo de las pérdidas de presión debidas a la fricción (Hfs) de 1 a 2:

$$H_{fs\text{TUBERIA}} = \frac{2 f f_l V^2}{D g c}$$

$$H_{fs\text{TUBERIA}} = \frac{2(0.05912939)(2.45\text{m})(0.9492791\text{m/s})^2}{(0.065\text{m})(1\text{Kg/m}^3\text{s}^2)}$$

$$H_{fs\text{TUBERIA}} = \underline{4.0167 \text{ Nm/kg}}$$

$$H_{fs\text{ACCESORIOS}} = \frac{2 f f_{l.eq} V^2}{D g c}$$

Realizando el cálculo utilizando los valores de Le/D, se obtienen los siguientes resultados:

## CAPITULO 4 ESTRUCTURA Y VALIDACIÓN DEL PROGRAMA

### ACCESORIOS:

1 codos de 90°

1 válvula de compuerta

codo 90°       $Le/D = 30$        $Le = 30 \times 0.065 \text{ m} = 1.95 \text{ m}$  X 1 codos = 1.95 m

válvula de compuerta       $Le/D = 9$

$Le = 9 \times 0.065 \text{ m} = 0.585 \text{ m}$  X 1 válvula = 0.585 m

Longitud equivalente = 1.95 m + 0.585 m = 2.535 m

$$H_{fs_{\text{ACCESORIOS}}} = \frac{2(0.05912939)(2.535\text{m})(0.9492791\text{m/s})^2}{0.065\text{m}(1\text{kgm/Ns}^2)}$$

$H_{fs_{\text{ACCESORIOS}}} = 4.1547 \text{ Nm/kg}$
---

Es importante conocer la presión de succión y de descarga cuando el tanque se encuentre vacío y lleno, ya que de esta manera, se asegura el funcionamiento del equipo de bombeo, previniendo así que el equipo no se dañe. Además, al conocer estos valores se evita que se presente el fenómeno de cavitación en la bomba.

### PARA TANQUE LLENO:

Calculo de la  $P_{\text{SUCCION}} = P_2$

$$0 = \frac{P_2 - P_1}{\rho} + \frac{\Delta Z g}{gc} + \frac{\Delta V^2}{2agc} + H_{fs_{\text{TOTAL}}}$$

#### CAPITULO 4 ESTRUCTURA Y VALIDACIÓN DEL PROGRAMA

Calculando  $\Delta Z$  de (1 a 2), se tiene:

$$\Delta Z = Z_2 - Z_1$$

$Z_2$  = espacio entre piso y tubería

$Z_1$  = altura del líquido con respecto al tanque + tramo de tubería

$$\Delta Z = 0.15 - 2.2571$$

$$\Delta Z = - 2.1071 \text{ m}$$

Despejando la presión de succión:

$$P_2 = P_1 - \left( \frac{\Delta Z_{1-2} g}{gc} + \frac{\Delta V^2}{2\alpha gc} + Hf_{s_{\text{tubería } 1-2}} \right) \rho$$

$P_2 =$

$$77007 - \left( \frac{-2.1071 \text{ m} (9.81 \text{ m} / \text{s}^2)}{1 \text{ Kg m} / \text{Ns}^2} + \frac{(0.9492791 \text{ m} / \text{s})^2}{2(0.6938)(1 \text{ Kg m} / \text{Ns}^2)} + 8.1667 \text{ Nm} / \text{Kg} \right) 1320 \text{ Kg} / \text{m}^3$$

$$P_2 = 92654.9883 \text{ Pa}_{\text{abs}}$$

**Presión de succión tanque lleno en  $\text{Pa}_{\text{abs}} = 92654.9883$**

Calculo de Presión de descarga =  $P_3$

$$P_3 = Wf \rho + P_2$$

$$P_3 = (37.0191 \text{ Nm/kg})(1320 \text{ kg/m}^3) + 92654.9883 \text{ Pa}_{\text{abs}}$$

#### CAPITULO 4 ESTRUCTURA Y VALIDACIÓN DEL PROGRAMA

$$P_3 = 141520.2003 \text{ Pa}_{\text{abs}}$$

**Presión de descarga tanque lleno en  $\text{Pa}_{\text{abs}} = 141520.2003$**

NIPA tanque lleno:

$$\text{NIPA} = P_{\text{succión}} - P_{\text{vapor}}$$

$$\text{NIPA} = 92654.9883 - 9584.8345$$

**NIPA tanque lleno en  $\text{Pa} = 83070.1538$**

La mayoría de las veces los fabricantes manejan este dato en  $\text{ft H}_2\text{O}$

$$1\text{Pa} = 3.3 \times 10^{-4} \text{ ft H}_2\text{O} \text{ por lo tanto NIPA} = \underline{27.4131 \text{ ft H}_2\text{O}}$$

POTENCIA DE LA BOMBA (tanque lleno):

$$\text{Potencia} = Wf * \text{Flujo másico}$$

$$\text{Potencia} = (37.019 \text{ Nm/kg})(14968.8 \text{ kg/h}) = 554130.0072 \text{ Nm/h}$$

Multiplicando por el factor de conversión a HP

$$\text{Potencia} = 554130.0072 \text{ Nm/h} (3.7086 \times 10^{-7})$$

$$\text{Potencia} = 0.2055 \text{ HP}$$

**POTENCIA DE LA BOMBA (tanque lleno) en HP = 0.2055**

PARA TANQUE VACIO:

$$P_{\text{succión}} = P_2$$

$$P_1 = 77007 \text{ Pa}$$

$$P_2 =$$

$$P_1 - \left( \frac{-0.45m(9.81m/s^2)}{1Kg/m^3} + \frac{(0.9492791m/s)^2}{2(0.6938)(1Kg/m^3)} + 8.1667Nm/Kg \right) * 1320Kg/m^3$$

$$P_{\text{succión}} = 71197.02 \text{ Pa}_{\text{abs}}$$

**Presión de succión tanque vacío en Pa<sub>abs</sub> = 71197.02**

$$P_{\text{descarga}} = P_3$$

$$P_3 = Wf_1 \rho + P_2$$

$$Wf_1 = \frac{\Delta Z g}{gc} + \frac{\Delta V^2}{2gc} + Hf_{\text{TOTAL}} \rho$$

$$\Delta Z = ((L_3 - 0.6)m) / gc$$

$L_3$  = altura de la envasadora

$$\Delta Z g = (2.5m - 0.6m)(9.81m/s^2) = 18.639 \text{ m}^2/s^2$$

$$Wf_1 = \frac{18.639m^2/s^2}{1Kg/m^3} + \frac{(0.9492791m/s)^2}{2(0.6938)(1Kg/m^3)} + 33.987Nm/Kg$$

$$Wf_1 = 53.2753 \text{ Nm/kg}$$

#### CAPITULO 4 ESTRUCTURA Y VALIDACIÓN DEL PROGRAMA

$$P_3 = (53.2753 \text{ Nm/kg})(1320 \text{ kg/m}^3) + 71197.02 \text{ Pa}_{\text{abs}}$$

$$P_{\text{descarga}} = 141520.4273 \text{ Pa}_{\text{abs}}$$

**Presión de descarga tanque vacío en  $\text{Pa}_{\text{asb}} = \underline{141520.4273}$**

NIPA tanque vacío:

$$\text{NIPA tanque vacío} = P_{\text{succión}} - P_{\text{vapor}}$$

$$\text{NIPA} = 71197.02 \text{ Pa}_{\text{abs}} - 9584.8345 \text{ Pa}_{\text{abs}}$$

$$\text{NIPA} = 61612.1855 \text{ Pa}$$

**NIPA tanque vacío en Pa = 61612.1855**

La mayoría de las veces los fabricantes manejan este dato en ft H<sub>2</sub>O

$$1 \text{ Pa} = 3.3 \times 10^{-4} \text{ ft H}_2\text{O} \text{ por lo tanto NIPA} = \underline{20.3320 \text{ ft H}_2\text{O}}$$

POTENCIA DE LA BOMBA (tanque vacío):

$$\text{Potencia} = Wf_1 * \text{Flujo másico}$$

$$\text{Potencia} = (53.2753 \text{ Nm/Kg})(14968.8 \text{ Kg/h}) = 797467.31064 \text{ Nm/h}$$

Multiplicando por el factor de conversión a HP

$$\text{Potencia} = 797467.31064 \text{ Nm/h} ( 3.7086 \times 10^{-7})$$

$$\text{Potencia} = 0.2957 \text{ HP}$$

**POTENCIA DE LA BOMBA (tanque vacío) en HP = 0.2957**

#### CAPITULO 4 ESTRUCTURA Y VALIDACIÓN DEL PROGRAMA

PARA UN FLUIDO DE LA POTENCIA:

TIEMPO DE REINICIO DE LLENADO DE LA TOLVA

tiempo de reinicio = tiempo de vaciado+ tiempo que tarda la bomba en llenar tolva

tiempo de reinicio = 0.4 min + 2.1075 min = 2.5075 min

**Tiempo de reinicio de llenado de la tolva = 2.5075 min**

TIEMPO QUE TARDA LA BOMBA EN VOLVER A LLENAR LA TOLVA:

$$\text{tiempo} = \frac{\text{Capacidad}_{\text{TOLVA}}(\text{gal})}{(\text{Caudal}_{\text{BOMBA}}(\text{gal/s}) - \text{Velocidad}_{\text{EXHAUSTO}}(\text{gal/s}))}$$

$$\text{tiempo} = \frac{20\text{gal}}{(0.83333\text{gal/s} - 0.158165\text{gal/s})}$$

tiempo = 29.6237 s

**Tiempo que tarda la bomba en volver a llenar la tolva = 29.6237 s**

## CAPITULO 4 ESTRUCTURA Y VALIDACIÓN DEL PROGRAMA

TIEMPO DE VACIADO DEL TANQUE:

$$\text{tiempo de vaciado del tanque} = \frac{\text{Volumen}_{\text{VOL. DE VACIADO}}}{\text{Velocidad}_{\text{EXTRACTO gal/s}}}$$

$$\text{tiempo de vaciado del tanque} = \frac{5206.8\text{h}}{0.158165\text{gal/s}} = 32920.05184 \text{ lt s/gal}$$

$$32920.05184 \left[ \frac{\text{ls}}{\text{gal}} \right] \left[ \frac{1\text{gal}}{3.784\text{h}} \right] \left[ \frac{1\text{h}}{3600\text{s}} \right] = 2.4166 \text{ h}$$

**Tiempo de vaciado del tanque = 2.4166 h**

Para un fluido HERSCHEL-BULKLEY.

**Ejemplo 3:**

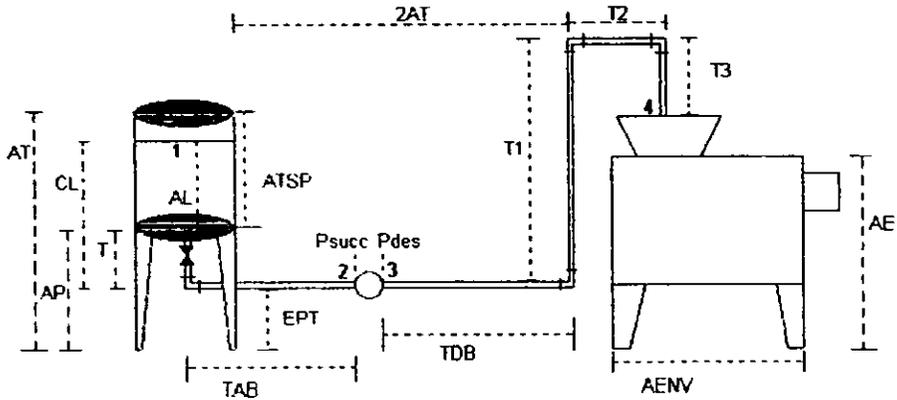
Se tiene un fluido H.B cuya densidad es de  $1250 \text{ kg/m}^3$ , índice de consistencia de  $2.5 \text{ Pas}^n$ , índice de comportamiento al flujo de 0.45, esfuerzo cortante inicial de  $5.2 \text{ Pa}$  y una presión de vapor igual a  $17519.77 \text{ Pa}_{\text{abs}}$ .

De acuerdo con el siguiente esquema, realizar los cálculos que permitan obtener la información necesaria para seleccionar un sistema de bombeo. La bomba enviará  $50 \text{ GPM}$  a la envasadora que tiene una altura de  $2.5 \text{ m}$ , la cual está provista de una tolva con una capacidad de  $20 \text{ galones}$ .

El nivel de producción de la envasadora es de  $90 \text{ env/min}$ , el envase que se va a utilizar tiene una capacidad de  $250 \text{ ml}$ . Considerar que el tiempo total del proceso es de  $2 \text{ h } 25 \text{ minutos}$ .

Nota: El tiempo total del proceso es un valor supuesto tomando como base que algunos procesos industriales de transformación de alimentos tardan en promedio tal tiempo.

**CAPITULO 4 ESTRUCTURA Y VALIDACIÓN DEL PROGRAMA**



- AT= Altura del tanque
- AL= Altura del liquido en el tanque
- AP= Altura de las patas del tanque
- ATSP= Altura del tanque sin patas
- CL = Columna de liquido
- EPT= Espacio entre piso y tubería
- TAB= Tubería antes de la bomba
- TDB= Tubería después de la bomba
- AENV= Ancho de la envasadora
- AE= Altura de la envasadora
- T= Tubería debajo del tanque
- T1= Tubería vertical.
- T2= Tubería horizontal hacia la envasadora
- T3= Tubería descendente hacia la envasadora

**Datos del fluido:**

$\rho = 1250 \text{ Kg/m}^3$

$k = 2.5 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$

$n = 0.45$

## CAPITULO 4 ESTRUCTURA Y VALIDACIÓN DEL PROGRAMA

$$\tau_0 = 5.2 \text{ Pa}$$

$$P_{\text{vapor}} = 17519.77 \text{ Pa}_{\text{abs}}$$

### Datos del sistema:

Gasto de la bomba propuesto = 50 GPM

Capacidad de la tolva = 20 Gal

Nivel de producción = 90 env/min

Capacidad del envase = 250 ml

$$AP = 0.6 \text{ m}$$

$$EPT = 0.15 \text{ m}$$

$$AE = 2.5 \text{ m}$$

$$AENV = 2.5 \text{ m}$$

$$T2 = 0.25 \text{ m}$$

$$T3 = 0.2 \text{ m}$$

$$T1 = AE + T3 - EPT = 2.5 \text{ m} + 0.2 \text{ m} - 0.15 \text{ m} = 2.55 \text{ m}$$

Para calcular las demás distancias de tubería es necesario seleccionar el tanque que se debe de utilizar, el cual se seleccionará posteriormente.

Las presiones en el tanque y a la altura de la envasadora son:

Presión en el punto 1 = 77007 Pa

Presión en el punto 4 = 77007 Pa

Esta presión corresponde a la presión atmosférica de Cuautitlán Izcalli, cabe hacer mención que la presión atmosférica es diferente en cada ciudad y dependiendo del lugar en donde se considere instalar la industria, la presión atmosférica que se utilice para realizar los cálculos debe ser la que corresponda a la ciudad respectiva.

Número de accesorios (ver figura al inicio del ejemplo)

Válvulas de compuerta = 1

#### CAPITULO 4 ESTRUCTURA Y VALIDACIÓN DEL PROGRAMA

Válvulas check = 0

Número de codos = 4

Antes de realizar los cálculos para el balance de energía mecánica, se procede a la selección del tanque de almacenamiento, para lo cual se realizan los siguientes cálculos:

+Para esto es necesario emplear los datos del nivel de producción y el tiempo total de proceso. Primero se calcula la cantidad de producto por hora que será envasado en ese tiempo:

$$\frac{90 \text{ env}}{\text{min}} \left| \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ hr}} \right| \frac{250 \text{ ml}}{\text{env}} \left| \frac{1 \text{ l}}{1000 \text{ ml}} \right| \left| \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ l}} \right| = 1.35 \frac{\text{m}^3}{\text{hr}}$$

Una vez calculado el volumen total de líquido que es envasado por hora, se calcula el volumen de líquido que será almacenado en el tanque para abastecer a la envasadora, mientras el siguiente lote de producto esta listo. Para esto es necesario, multiplicar el volumen por el tiempo total de proceso, como se muestra a continuación:

$$\therefore \frac{1.35 \text{ m}^3}{\text{h}} | 2.4166 \text{ h} | = 3.2624 \text{ m}^3 \approx 3262.4 \text{ l}$$

El dato de 2.4166 horas, corresponde al tiempo total del proceso que es de 2 horas 25 minutos.

**Volumen en lt del líquido = 3262.4**

#### CAPITULO 4 ESTRUCTURA Y VALIDACIÓN DEL PROGRAMA

Con este volumen se procede a la selección del tanque. El tanque se supone para fines de cálculos, con las siguientes dimensiones.

$$A_T = 3.3 \text{ m}$$

$$\text{Diámetro externo del tanque} = 3 \text{ m}$$

$$\text{Diámetro interno del tanque} = 2.85 \text{ m}$$

$$A_P = 0.8 \text{ m}$$

$$A_{TSP} = 2.5 \text{ m}$$

Una vez conocidas las dimensiones del tanque se pueden establecer las dimensiones de tubería faltantes, tales como:

$$T = 0.45 \text{ m}$$

$$T_{AB} = 3 \text{ m} = \text{Diámetro externo del tanque}$$

$$T_{DB} = 2 * A_E = 2 * 2.5 \text{ m} = 5 \text{ m}$$

Después de haber obtenido éstos valores se puede calcular la longitud de tubería total y la longitud de tubería antes bomba:

Para la longitud de tubería total:

$$\text{Longitud de tubería de tanque a envasadora} = 13.5 \text{ m}$$

Para la longitud de tubería del tanque a la bomba:

$$\text{Longitud de tubería del tanque a la bomba} = T + T_{AB}$$

$$\text{Longitud de tubería del tanque a la bomba} = 0.45 \text{ m} + 2.15 \text{ m} = 2.6 \text{ m}$$

Una vez calculadas las distancias que se utilizarán en el sistema, se puede comprobar que la bomba siempre estará funcionando, esto se realizará con el fin

#### CAPITULO 4 ESTRUCTURA Y VALIDACIÓN DEL PROGRAMA

de que el equipo no sufra daños posteriores por falta de alimentación del fluido, para esto se realizan los cálculos siguientes:

+Calculo para gasto de la bomba:

Se toma la capacidad de la tolva y se divide entre el tiempo de operación de la bomba, el cual debe de ser de preferencia menor al tiempo en que tarda en vaciarse la tolva.

Considerando que la bomba funciona a 50 GPM, se calcula el tiempo de vaciado de la tolva y el tiempo de llenado de la tolva, para verificar que los tiempos son los adecuados y que siempre habrá líquido en la tolva. Como se muestra a continuación:

$$\frac{\text{gal}_{\text{tolva}}}{\text{gpm}_{\text{Bomba}}} = \text{tiempo}$$

$$\frac{20_{\text{gal}}}{50_{\text{gpm}}} = 0.4_{\text{min}}$$

El tiempo que trabaja la bomba para llenar la tolva es de 0.4 minutos. Para determinar si este tiempo es adecuado es necesario calcular el tiempo que tarda en vaciarse la tolva.

**Tiempo que tarda la Bomba en llenar la Tolva = 24 segundos**

Para conocer el tiempo de vaciado de la tolva se debe partir del nivel de producción y la velocidad de envasado:

Velocidad de Envasado:

$$\text{Velocidad} = (\text{Nivel de Producción})(\text{Capacidad del envase})$$

$$\text{Velocidad} = (90 \text{ env/min})(250 \text{ ml/env}) = 22500 \text{ ml/min}$$

## CAPITULO 4 ESTRUCTURA Y VALIDACIÓN DEL PROGRAMA

$$\frac{22500 \text{ ml}}{\text{min}} \left| \frac{1 \text{ l}}{1000 \text{ ml}} \right| \left| \frac{1 \text{ gal}}{3.784 \text{ l}} \right| = 5.9460 \text{ GPM}$$

**Velocidad de envasado = 0.09910 gal/s**

$$\frac{\text{gal}}{\text{min}} \cdot \text{tiempo} = \text{velocidad de envasado} \quad \frac{20 \text{ gal}}{5.9460 \text{ gal/min}} = 3.3635 \text{ min}$$

**Tiempo de vaciado de la tolva = 3.3635 min**

+Diámetro del tanque :

Para conocer el diámetro del tanque se convierten los 50GPM a Kg/h y con ese valor se lee en la siguiente tabla:

$$50 \frac{\text{gal}}{\text{min}} \left| \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \right| \left| \frac{3.784 \text{ l}}{1 \text{ gal}} \right| \left| \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ l}} \right| \left| \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ h}} \right| \left| \frac{1250 \text{ Kg}}{\text{m}^3} \right| = 14190 \frac{\text{Kg}}{\text{h}}$$

**Flujo másico en kg/h = 14190**

#### CAPITULO 4 ESTRUCTURA Y VALIDACIÓN DEL PROGRAMA

Gasto Másico (Kg/h)	Diámetro de tubería cédula 80 (in)	Diámetro de tubería (mm)
<2,000	1½	25
2,001 a 6,600	2	40
6,601 a 15,000	2½	50
15,001 a 23,600	3	65
23,601 a 37,500	4	75

CUADRO 6: Diámetros Recomendados. (Hui, 1993)

Se utilizó el cuadro 6 con la cédula 80 ya que estos diámetros son muy similares a los diámetros que se utilizan para tuberías en acero inoxidable denominadas "tubing" (utilizadas en la industria alimentaria).

Para obtener la información necesaria para seleccionar una bomba es importante realizar los balances de energía mecánica entre los puntos 1 y 4 y del 1 al 2 (ver figura al inicio del ejemplo). El balance de energía mecánica entre los puntos 1 y 4, nos permiten calcular la energía necesaria que se requiere para mover el fluido por todo el sistema, y el balance de 1 a 2 nos permite corroborar que la presión de succión es mayor que la presión de vapor y por lo tanto no se presentarán problemas de cavitación en la bomba.

**REALIZANDO EL BALANCE DE ENERGÍA MECÁNICA DE (1 a 4):**

$$Wf = \frac{\Delta P}{\rho} + \frac{\Delta Zg}{gc} + \frac{\Delta V^2}{2\alpha gc} + Q + \Delta E + Hfs$$

Para calcular Wf es necesario calcular las Hfs, para esto es necesario contar con el factor de fricción y el Reynolds, por lo que se debe de conocer la velocidad media a la cual se mueve el fluido por la tubería. La velocidad media se calcula con el gasto de la bomba en m<sup>3</sup>/s y el diámetro interno de tubería en m, como se muestra a continuación:

$$50 \frac{\text{gal}}{\text{min}} \left| \frac{3.784 \text{ l}}{1 \text{ gal}} \right| \left| \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ l}} \right| \left| \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \right| = 3.15 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$V_4 = \frac{4Q}{\pi D^2}$$

$$V_4 = \frac{4(3.15 \text{E}^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{s}})}{\pi(0.065 \text{m})^2} = 0.9492791 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

<b>V en m/s = 0.9492791</b>
-----------------------------

Una vez obtenida la velocidad media, se calculará posteriormente el número de Reynolds y el factor de fricción. Antes de realizar éstos cálculos se obtendrá la altura del líquido necesaria para calcular la energía potencial. Esto se realiza como se muestra a continuación:

Del manual de tanques "Tank Insulated type MVRI" (Ver Anexo) se obtienen los siguientes datos para calcular el volumen del tanque:

$$h = 2975 \text{ mm} = 2.975 \text{ m}$$

$$V_{\text{TANQUE}} = \pi r^2 h$$

$$V_{\text{TANQUE}} = \pi(1.5 \text{m})^2 (2.975 \text{ m})$$

## CAPITULO 4 ESTRUCTURA Y VALIDACIÓN DEL PROGRAMA

$$Vol_{TANQUE} = 9.346 \text{ m}^3$$

Despejando h para calcular la altura del líquido con respecto al tanque, tenemos:

$$h = \frac{Vol_{LIQUIDO}}{\pi r^2}$$

$$h = \frac{10 \text{ m}^3}{\pi (1.5 \text{ m})^2} = 1.4147 \text{ m}$$

De ahí que:

$$\Delta Z = Z_4 - Z_1$$

$Z_1$  = altura del líquido con respecto al tanque + tramo de tubería (Tomando como referencia el piso)

$Z_4$  = altura de la envasadora

$$Z_1 = 1.4147 \text{ m} + \text{tramo de tubería}$$

$$Z_1 = 1.4147 \text{ m} + 0.6 \text{ m}$$

$$Z_1 = 2.0147 \text{ m}$$

Por lo tanto podemos obtener  $\Delta Z$  para el balance de Energía Mecánica:

$$\Delta Z = Z_4 - Z_1$$

$$\Delta Z = 2.5 - 2.0147$$

$$\Delta Z = 0.4853 \text{ m}$$

Para obtener las Hfs es necesario calcular el número de Reynolds y el factor de fricción de Fanning y  $\alpha$ .

Calculando el número de Reynolds generalizado:

$$\text{Re.gen} = \frac{D^n V^{2-n} \rho \left( \frac{4n}{3n+1} \right)^n}{8^{n-1} K (2.5 \mu^n)}$$

$$\text{Re.gen} = \frac{(0.065\text{m})^{0.45} (0.949279\text{m/s})^{2-0.45} (1250\text{Kg/m}^3) \left( \frac{4(0.45)}{3(0.45)+1} \right)^{0.45}}{8^{0.45-1} (2.5 \mu^n)}$$

<b>Re.gen = 375.1973</b>
--------------------------

El valor del número de Reynolds nos indica que el fluido fluye en régimen laminar.

Para conocer el factor de fricción es necesario calcular  $\epsilon_0$  y  $\varphi$ :

**\* Cálculo de  $\epsilon_0$**

- 1) suponer  $\epsilon_0$       $0 < \epsilon_0 < 1$
- 2) calcular el valor de  $\varphi$
- 3) calcular el  $\text{Re}_{H.B}$
- 4) comparar el  $\text{Re}_{H.B}$  vs  $\text{Re}_{gen}$
- 5) si el  $\text{Re}_{gen} = \text{Re}_{H.B}$   
 $\epsilon_0$  y  $\varphi$  **"son los correctos"**
- 6) si el  $\text{Re}_{H.B}$  es diferente al  $\text{Re}_{gen}$  se debe suponer un nuevo valor de  $\epsilon_0$  y repetir desde el punto (2).

**- CALCULANDO  $\epsilon_0$**

- 1) Valor supuesto de  $\epsilon_0$

$$\epsilon_0 = 0.5$$

- 2) Calcular el valor de  $\varphi$ :

$$\varphi = (1 + 3n)^n (1 - \epsilon_0)^{1+n} * \left[ \frac{(1 - \epsilon_0)^2}{1 + 3n} + \frac{2\epsilon_0(1 - \epsilon_0)}{1 + 2n} + \frac{\epsilon_0^2}{1 + n} \right]^n$$

$$\varphi = (1 + 3(0.45))^{0.45} (1 - 0.5)^{1+0.45} \left[ \frac{(1-0.5)^2}{1+3(0.45)} + \frac{2(0.5)(1-0.5)}{1+2(0.45)} + \frac{(0.5)^2}{1+0.45} \right]^{0.45}$$

$$\varphi = .4081$$

3) Calcular el  $Re_{H,V}$

$$Re_{H,V} = 2He \left( \frac{n}{1+3n} \right)^2 \left( \frac{\varphi}{\epsilon_0} \right)^{\frac{2}{n}-1}$$

Para calcular el  $Re_{H,V}$  es necesario conocer el número de Hedstrom (He):

$$He = \frac{D^2 \rho \left( \frac{\tau_0}{k} \right)^{2(n-1)}}{k}$$

$$He = \frac{(0.065m)^2 (1250Kg/m^3) \left( \frac{5.2Pa}{2.5} \right)^{2(0.45-1)}}{2.5}$$

$$He = \underline{\underline{26.2372}}$$

$$Re_{H,V} = 2(26.2372) \left( \frac{0.45}{1+3(0.45)} \right)^2 \left( \frac{0.4081}{0.5} \right)^{2(0.45)-1}$$

$$Re_{H,V} = 2.2464$$

4) Comparando:

$$Re_{gen} \neq Re_{H,V}$$

1) Suponiendo un nuevo  $\epsilon_0$ :

$$\epsilon_0 = 0.15$$

2) Calcular el valor de  $\varphi$ :

$$\varphi = (1 + 3(0.45))^{0.45} (1 - 0.15)^{1+0.45} \left[ \frac{(1-0.15)^2}{1+3(0.45)} + \frac{2(0.15)(1-0.15)}{1+2(0.45)} + \frac{(0.15)^2}{1+0.45} \right]^{0.45}$$

$$\varphi = 0.8159$$

3) Calcular el  $Re_{H.V}$ :

$$Re_{H.V} = 2(26.2372) \left( \frac{0.45}{1 + 3(0.45)} \right)^2 \left( \frac{0.8159}{0.15} \right)^{0.45-1}$$

$$Re_{H.V} = 657.3293$$

4) Comparando

$$Re_{gen} \neq Re_{H.V}$$

1) Suponiendo un nuevo  $\epsilon_{0.1}$ :

$$\epsilon_{0.1} = 0.17$$

2) Calcular el valor de  $\varphi$ :

$$\varphi = (1 + 3(0.45))^{0.45} (1 - 0.17)^{1-0.45} \left[ \frac{(1 - 0.17)^2}{1 + 3(0.45)} + \frac{2(0.17)(1 - 0.17)}{1 + 2(0.45)} + \frac{(0.17)^2}{1 + 0.45} \right]^{0.45}$$

$$\varphi = 0.79$$

3) Calcular el  $Re_{H.V}$ :

$$Re_{H.V} = 2(26.2372) \left( \frac{0.45}{1 + 3(0.45)} \right)^2 \left( \frac{0.79}{0.17} \right)^{0.45-1}$$

$$Re_{H.V} = 382.8707$$

4) Comparando

$$Re_{gen} = Re_{H.V}$$

5) Por lo tanto  $\epsilon_{0.1}$  y  $\varphi$  "son los correctos"

$$\epsilon_{0.1} = 0.17$$

$$\varphi = 0.7$$

Calculando el Factor de fricción de Fanning:

$$Ff_{\text{FANNING}} = \frac{16}{\text{Re}\phi}$$

$$Ff_{\text{FANNING}} = \frac{16}{(375.1973)(0.7901)} = 0.05397$$

$Ff_{\text{FANNING}} = \underline{0.05397}$
---

Calculando  $\alpha$ :

$$2\alpha = \frac{a}{h_0 h_2}$$

$$a = 2(1 + 3n + 2n^2 + 2n^2 \epsilon_0 + 2n\epsilon_0 + 2n^2 \epsilon_0^2)^3 (2 + 3n)(3 + 5n)(3 + 4n)$$

$$h_0 = (1 + 2n)^2 (1 + 3n)^2$$

$$h_1 = n^2 (243 + 306\epsilon_0 + 85\epsilon_0^2) + n^3 (279 + 522\epsilon_0 + 350\epsilon_0^2) + \dots$$

$$\dots + n^4 (159 + 390\epsilon_0 + 477\epsilon_0^2) + n^5 (36 + 108\epsilon_0 + 216\epsilon_0^2)$$

$$h_2 = 18 + n(105 + 66\epsilon_0) + h_1$$

SUSTITUYENDO :

$$a = 2(1 + 3(0.45) + 2(0.45)^2 + 2(0.45)^2(0.17) + 2(0.45)(0.17) + 2(0.45)^2(0.17)^2)^3 (2 + 3(0.45))(3 + 5(0.45))(3 + 4(0.45))$$

$$a = 4506.7024$$

$$h_0 = (1 + 2(0.45))^2 (1 + 3(0.45))^2$$

$$h_0 = 19.9362$$

$$h_1 = 0.45^2 (243 + 306(0.17) + 85(0.17)^2) + 0.45^3 (279 + 522(0.17) + 350(0.17)^2) + 0.45^4 (159 + 390(0.17) + 477(0.17)^2) + 0.45^5 (36 + 108(0.17) + 216(0.17)^2)$$

$$h_1 = 105.5930$$

$$h_2 = 18 + (0.45)(105 + 66(0.17)) + h_1$$

$$h_2 = 175.892$$

Por lo tanto:

$$2\alpha = \frac{4506.7024}{(19.9362)(175.892)} = 1.2851$$

$$\alpha = \underline{0.6425}$$

Calculo de las pérdidas de presión debidas a la fricción (Hfs) de 1 a 4:

$$H_{fs\text{TOTALES}} = H_{fs\text{TUBERIA}} + H_{fs\text{ ACCESORIOS}}$$

$$H_{fs\text{TUBERIA}} = \frac{2f \cdot l \cdot v^2}{D_{gc}}$$

$$H_{fs\text{ TUBERIA}} = \frac{2(0.05397)(13.5m)(0.9492791m/s)^2}{0.065m(1Kg/m \cdot Ns^2)}$$

$$H_{fs\text{TUBERIA TOTAL en Nm/kg}} = \underline{20.198}$$

Para obtener el valor de Le/D es necesario consultar el CUADRO 2 citado en la página 14.

ACCESORIOS:

4 codos 90°

1 válvula de compuerta

## CAPITULO 4 ESTRUCTURA Y VALIDACIÓN DEL PROGRAMA

Calculo de longitud equivalente:

codo 90°

$$Le/D = 30$$

$$Le/D = 30 \times 4 \text{ codos} = 120$$

válvula de compuerta

$$Le/D = 9$$

$$Le/D = 9 \times 1 \text{ válvula} = 9$$

$Le/D \text{ total} = 129$

$$H_{fs\text{ACCESORIOS}} = \frac{2(0.05397)(129)(0.9492791\text{m/s})^2}{1\text{kgm/ Ns}^2}$$

$H_{fs\text{ACCESORIOS TOTAL en Nm/kg}} = \underline{12.5475}$

$H_{fs \text{ TOTALES en Nm/kg}} = \underline{32.73}$

Energía potencial:

$$\frac{\Delta Zg}{gc} = \frac{0.4853\text{m}(9.81\text{m/s}^2)}{1\text{kg/ Ns}^2} = 4.7607\text{Nm/ Kg}$$

$\text{Energía Potencial en Nm/kg} = \underline{4.76}$

Energía cinética:

Es importante tomar en cuenta que la velocidad en el punto 1 es cero, ya que, el fluido permanece sin movimiento.

$$\frac{\Delta V^2}{2\alpha gc} = \frac{(0.9492791\text{m/s})^2}{2(0.6425)(1\text{kgm/ Ns}^2)} = 0.7012\text{Nm/ kg}$$

$\text{Energía Cinética en Nm/kg} = \underline{0.7012}$

**NOTA:** La energía de presión ( $\Delta P$ ) es cero, ya que se considera que los tanques están abiertos a la presión atmosférica.

Los valores de  $\Delta Q$  y  $\Delta E$  se eliminan debido a que no hay transferencia de calor ni de energía.

$$\text{Energía de Presión en Nm/kg} = \underline{0}$$

Sustituyendo en el Balance de Energía Mecánica los valores obtenidos, y eliminando los términos, tenemos que el trabajo de flecha es:

$$W_f = \frac{\Delta Z g}{g_c} + \frac{\Delta V^2}{2\alpha g_c} + H_{fs}$$

$$\therefore W_f = 4.7607 \text{ Nm/kg} + 0.7012 \text{ Nm/kg} + 32.73 \text{ Nm/kg}$$

$$W_f \text{ en Nm/Kg} = \underline{38.19}$$

Calculo de las pérdidas de presión debidas a la fricción ( $H_{fs}$ ) de 1 a 2:

$$H_{fs\text{TUBERIA}} = \frac{2fL V^2}{D g_c}$$

$$H_{fs\text{TUBERIA}} = \frac{2(0.05397)(3.45\text{m})(0.949279\text{m/s})^2}{(0.065\text{m})(1\text{Kg/m}^3/\text{Ns}^2)}$$

$$H_{fs\text{TUBERIA}} \text{ en Nm/kg} = \underline{5.1618}$$

$$H_{fs\text{ACCESORIOS}} = \frac{2K/V^2}{g_c}$$

## CAPITULO 4 ESTRUCTURA Y VALIDACIÓN DEL PROGRAMA

Para obtener el valor de  $L_e/D$  es necesario consultar el CUADRO 2 citado en la página 14.

ACCESORIOS:

1 codo 90°

1 válvula de compuerta

codo 90°

$L_e/D = 30$

$L_e/D = 30 \times 1 \text{ codos} = 30$

válvula de compuerta

$L_e/D = 9$

$L_e/D = 9 \times 1 \text{ válvula} = 9$

$$K_f = 30 + 9 = 39$$

$$H_{fs_{\text{ACCESORIOS}}} = \frac{2(0.05397)(39)(0.949279 \text{ m/s})^2}{1 \text{ kgm/Ns}^2}$$

$H_{fs_{\text{ACCESORIOS}}} \text{ en Nm/kg} = \underline{3.7934}$

Es importante conocer la presión de succión y de descarga cuando el tanque se encuentre vacío y lleno, ya que de esta manera, se asegura el funcionamiento del equipo de bombeo, previniendo así que el equipo no se dañe. Además, al conocer estos valores se evita que se presente el fenómeno de cavitación en la bomba.

**PARA TANQUE LLENO:**

$$P_{\text{SUCCION}} = P_2$$

$$0 = \frac{P_2 - P_1}{\rho} + \frac{\Delta Z g}{gc} + \frac{\Delta V^2}{2\alpha gc} + H_{fs_{\text{TOTAL}}}$$

Calculando  $\Delta Z$  de (1 a 2), se tiene:

$$\Delta Z = Z_2 - Z_1$$

$$\Delta Z = 0.15 - 2.0147$$

$$\Delta Z = - 1.8647 \text{ m}$$

Despejando la presión de succión:

$$P_2 = P_1 - \left( \frac{\Delta Z_{1-2} \rho}{\gamma} + \frac{\Delta V^2}{2\alpha g} + Hf_{s_{tanks}} \right) \rho$$

$$P_2 =$$

$$77007 - \left( \frac{-1.8647 \text{ m} (9.81 \text{ m/s}^2)}{1 \text{ Kg/m}^3 \text{ Ns}^2} + \frac{(0.9492791 \text{ m/s})^2}{2(0.6425)(1 \text{ Kg/m}^3 \text{ Ns}^2)} + 8^{0.534} \text{ Nm/Kg} \right) * 1250 \text{ Kg/m}^3$$

$$P_2 = 87841.9062 \text{ Pa}_{abs}$$

**Presión de succión tanque lleno en  $P_{abs} = 87841.9062$**

Calculo de presión de descarga =  $P_3$

$$P_3 = Wf \rho + P_2$$

$$P_3 = (38.1919 \text{ Nm/Kg})(1250 \text{ Kg/m}^3) + 87841.9062 \text{ Pa}_{abs}$$

$$P_3 = 135581.7812 \text{ Pa}_{abs}$$

**Presión de descarga tanque lleno en  $P_{abs} = 135581.7812$**

NIPA tanque lleno:

$$NIPA = P_{\text{succión}} - P_{\text{vapor}}$$

$$NIPA = 87841.9062 - 17519.77$$

<b>NIPA tanque lleno en Pa = <u>70328.1362</u></b>
--

La mayoría de las veces los fabricantes manejan este dato en ft H<sub>2</sub>O

$$1\text{Pa} = 3.3 \times 10^{-4} \text{ ft H}_2\text{O} \text{ por lo tanto NPSHd} = \underline{23.2082 \text{ ft H}_2\text{O}}$$

POTENCIA DE LA BOMBA (tanque lleno)

$$\text{Potencia} = Wf * \text{Flujo másico}$$

$$\text{Potencia} = (38.1919 \text{ Nm/Kg})(14190 \text{ Kg/h}) = 541943.061 \text{ Nm/h}$$

Multiplicando por el factor de conversión a HP

$$\text{Potencia} = 541943.061 \text{ Nm/h} (3.7086 \times 10^{-7})$$

$$\text{Potencia} = 0.2009 \text{ HP}$$

$$\text{POTENCIA DE LA BOMBA (tanque lleno) en HP} = \underline{0.2009}$$

PARA TANQUE VACIO

$$P_{\text{succión}} = P_2$$

$$P_1 = 77007 \text{ Pa}$$

$$P_2 =$$

$$77007 - \left( \frac{-0.45m(9.81m/s^2)}{1Kg/m^3 \cdot Ns^2} + \frac{(0.9492791m/s)^2}{2(0.6425)(1Kg/m^3 \cdot Ns^2)} + 8.9534Nm/Kg \right) * 1250Kg/m^3$$

$$P_{succión} = 70456.7886 Pa_{abs}$$

Presión de succión tanque vacío en  $Pa_{abs} = \underline{\underline{70456.7886}}$

$$P_{descarga} = P_3$$

$$P_3 = Wf_1 \rho + P_2$$

$$Wf_1 = \frac{\Delta Zg}{gc} + \frac{\Delta V^2}{2\alpha gc} + Hf_{SOMMESU}$$

$$\Delta Z = ((L_3 - 0.6)m)g / gc$$

$L_3$  = altura de la envasadora

$$\Delta Zg = (2.5m - 0.6m)(9.81m/s^2) = 18.639 m^2/s^2$$

$$Wf_1 = \frac{18.639m^2/s^2}{1Kg/m^3 \cdot Ns^2} + \frac{(0.9492791m/s)^2}{2(0.6425)(1Kg/m^3 \cdot Ns^2)} + 32.73Nm/Kg$$

$$Wf_1 = 52.0702 Nm/Kg$$

$$P_3 = (52.0702 Nm/Kg)(1250 Kg/m^3) + 70456.7886 Pa_{abs}$$

$$P_{descarga} = 135544.5386 Pa_{abs}$$

**Presión de descarga tanque vacío en  $P_{a_{abs}} = \underline{135544.5386}$**

NIPA tanque vacío:

$$\text{NIPA tanque vacío} = P_{\text{succion}} - P_{\text{vapor}}$$

$$\text{NIPA} = 70456.7886 \text{ Pa}_{\text{abs}} - 17519.77 \text{ Pa}_{\text{abs}}$$

$$\text{NIPA} = 52937.0186 \text{ Pa}$$

**NIPA tanque vacío en Pa = 52937.0186**

La mayoría de las veces los fabricantes manejan este dato en ft H<sub>2</sub>O

$$1 \text{ Pa} = 3.3 \times 10^{-4} \text{ ft H}_2\text{O} \text{ por lo tanto NPSHd} = \underline{217.4692 \text{ ft H}_2\text{O}}$$

POTENCIA DE LA BOMBA (tanque vacío):

$$\text{Potencia} = Wf_1 * \text{Flujo másico}$$

$$\text{Potencia} = (52.0702 \text{ Nm/Kg})(14190 \text{ Kg/h}) = 738876.138 \text{ Nm/h}$$

Multiplicando por el factor de conversión a HP

$$\text{Potencia} = 738876.138 \text{ Nm/h} ( 3.7086 \times 10^{-7} )$$

$$\text{Potencia} = 0.2740 \text{ HP}$$

**POTENCIA DE LA BOMBA (tanque vacío) en HP = 0.2740**

PARA EL FLUIDO H.B

TIEMPO DE REINICIO DE LLENADO DE LA TOLVA

tiempo de reinicio = tiempo de vaciado+ tiempo que tarda la bomba en llenar tolva

tiempo de reinicio = 3.3635 min + .4 min = 3.7635 min

**Tiempo de reinicio de llenado de la tolva = 3.7635 min**

TIEMPO QUE TARDA LA BOMBA EN VOLVER A LLENAR LA TOLVA:

$$\text{tiempo} = \frac{\text{Capacidad}_{\text{TOLVA}}(\text{gal})}{(\text{Gasto}_{\text{BOMBA}}(\text{gal/s}) - \text{Velocidad}_{\text{ENCASADO}}(\text{gal/s}))}$$

$$\text{tiempo} = \frac{20\text{gal}}{(0.83333\text{gal/s} - 0.09910\text{gal/s})}$$

tiempo = 27.24 s

**Tiempo que tarda la bomba en volver a llenar la tolva = 27.24 s**

TIEMPO DE VACIADO DEL TANQUE:

$$\text{tiempo de vaciado del tanque} = \frac{\text{Volumen}_{\text{LIQUIDO en el TANQUE}}}{\text{Velocidad}_{\text{ENCASADO}}(\text{gal/s})}$$

CAPITULO 4 ESTRUCTURA Y VALIDACIÓN DEL PROGRAMA

$$\text{tiempo de vaciado del tanque} = \frac{10000l}{009910gal / s} = 100908.1735 \text{ lt s/gal}$$

$$100908.1735 \left| \frac{lts}{gal} \right| \left| \frac{1gal}{3.784l} \right| \left| \frac{1h}{3600s} \right| = 7.4075 \text{ h}$$

**Tiempo de vaciado del tanque = 7.4075 h**

**COMPARACIÓN Y VALIDACIÓN**

\* Fluido Newtoniano:

**R E S U L T A D O S**

	Manual	Programa	%Variación
Flujo másico (kg/h)	11919.6	11919.6	0
Diámetro nominal (in)	2	2	0
Diámetro interno (m)	0.05	0.05	0
Velocidad (m/s)	1.6042	1.606	0.112
Reynolds	71983.33	72063.013	0.110
F <sub>f</sub> FANNING	0.0094	0.00972	3.4
$\alpha$	1	1	0
Hf <sub>STUB ANTES BOMBA</sub> (Nm/kg)	2.5196	2.607	3.4
Hf <sub>SACC ANTES BOMBA</sub> (Nm/kg)	1.8897	1.955	3.4
Hf <sub>STUB TOTALES (1-4)</sub> (Nm/kg)	10.5865	10.954	3.4
Hf <sub>SACC TOTALES (1-4)</sub> (Nm/kg)	6.2507	6.468	3.4
L/D válvula compuerta	9	9	0
L/D " check	0	0	0
L/D codos	120	120	0
Energía Potencial (Nm/kg)	1.4459	1.44537	0.0366
Energía Cinética (Nm/kg)	1.2867	1.28958	0.223
Energía de Presión (Nm/kg)	0	0	0
Trabajo de Flecha (Nm/kg)	19.5696	20.15720	3.0
Potencia de la bomba tanque lleno (HP)	0.086	0.0891	3.6
P <sub>SUCCION tanque lleno</sub> (Pa <sub>abs</sub> )	92684.001	92520.662	0.17
P <sub>DESCARGA " " (Pa<sub>abs</sub>)</sub>	113232.081	113685.717	0.4
Potencia de la bomba tanque vacío (HP)	0.1581	0.1607	1.6
P <sub>SUCCION tanque vacío</sub> (Pa <sub>abs</sub> )	75661.394	75497.400	0.216
P <sub>DESCARGA " " (Pa<sub>abs</sub>)</sub>	113232.41	113685.717	0.4
NPSHd tanque lleno (Pa)	87060.601	86897.262	0.18
NPSHd tanque vacío (Pa)	70037.994	69874	0.234
Cabezal tanque lleno (Pa)	20548.08	21165.055	3.0
Cabezal tanque vacío (Pa)	37571.025	38188.316	1.6

**CUADRO 7: COMPARACIÓN Y VALIDACIÓN DEL FLUIDO NEWTONIANO**

\* Fluido de la Potencia:

**R E S U L T A D O S**

	<b>Manual</b>	<b>Programa</b>	<b>%Variación</b>
Flujo másico (kg/h)	14984.64	14984.64	0
Diámetro nominal (in)	2.5	2.5	0
Diámetro interno (m)	0.065	0.065	0
Velocidad (m/s)	0.9492	0.950	0.0842
Reynolds	270.5934	271.093	0.184
$f_{FANNING}$	0.0591	0.05902	0.135
$\alpha$	0.6938	0.694	0.0288
$H_{fSTUB \text{ ANTES BOMBA (Nm/kg)}}$	4.0167	4.018	0.0323
$H_{fSACC \text{ ANTES BOMBA (Nm/kg)}}$	4.1547	4.157	0.0553
$H_{fSTUB \text{ TOTALES (1-4) (Nm/kg)}}$	20.2476	20.089	0.783
$H_{fSACC \text{ TOTALES (1-4) (Nm/kg)}}$	13.7470	13.751	0.029
L/D válvula compuerta	9	9	0
L/D " check	0	0	0
L/D codos	120	120	0
Energía Potencial (Nm/kg)	2.3828	2.38014	0.111
Energía Cinética (Nm/kg)	0.6507	0.65072	0.003
Energía de Presión (Nm/kg)	0	0	0
Trabajo de Flecha (Nm/kg)	37.0191	36.87059	0.401
Potencia de la bomba tanque lleno (HP)	0.2055	0.2049	0.291
$P_{SUCCION \text{ tanque lleno (Pa}_{abs})}$	92654.9883	92645.892	0.981
$P_{DESCARGA \text{ " " (Pa}_{abs})}$	141520.200	141315.066	0.144
Potencia de la bomba tanque vacío (HP)	0.2957	0.29525	0.152
$P_{SUCCION \text{ tanque vacío (Pa}_{abs})}$	71197.0215	71184.2	0.018
$P_{DESCARGA \text{ " " (Pa}_{abs})}$	141520.427	141315.066	0.145
NIPA tanque lleno (Pa)	83070.1538	83061.058	0.0109
NIPA tanque vacío (Pa)	61612.1855	61599.366	0.0208

**CUADRO 8: COMPARACIÓN Y VALIDACIÓN DEL FLUIDO DE LA LEY DE LA POTENCIA**

Fluido de la H.B:

**R E S U L T A D O S**

	<b>Manual</b>	<b>Programa</b>	<b>%Variación</b>
Flujo másico (kg/h)	14190.0	14190.0	0
Diámetro nominal (in)	2.5	2.5	0
Diámetro interno (m)	0.065	0.065	0
Velocidad (m/s)	0.9492	0.95028	0.113
Reynolds	375.1973	375.875	0.180
Fi	0.7901	0.79088	0.098
$\epsilon_0$	0.17	0.17071	0.417
F <sub>FANNING</sub>	0.0539	0.0538	0.185
$\alpha$	0.6425	0.644279	0.276
Hf <sub>STUB ANTES BOMBA</sub> (Nm/kg)	5.1618	5.160	0.034
Hf <sub>SACC ANTES BOMBA</sub> (Nm/kg)	3.7934	3.791	0.063
Hf <sub>STUB TOTALES (1-4)</sub> (Nm/kg)	20.198	20.189	0.044
Hf <sub>SACC TOTALES (1-4)</sub> (Nm/kg)	12.5475	12.540	0.059
L/D válvula compuerta	9	9	0
L/D " check	0	0	0
L/D codos	120	120	0
Energía Potencial (Nm/kg)	4.7607	4.76069	0.00021
Energía Cinética (Nm/kg)	0.7012	0.70244	0.176
Energía de Presión (Nm/kg)	0	0	0
Trabajo de Flecha (Nm/kg)	38.19	38.19238	0.006
Potencia de la bomba tanque lleno (HP)	0.2009	0.2009	0
P <sub>SUCCION tanque lleno</sub> (Pa <sub>abs</sub> )	87841.906	87806.678	0.04
P <sub>DESCARGA " " (Pa<sub>abs</sub>)</sub>	135581.78	135547.146	0.025
Potencia de la bomba tanque vacío (HP)	0.2740	0.27402	0.0007
P <sub>SUCCION tanque vacío</sub> (Pa <sub>abs</sub> )	70456.788	70458.781	0.002
P <sub>DESCARGA " " (Pa<sub>abs</sub>)</sub>	135544.53	135547.146	0.001
NIPA tanque lleno (Pa)	70328.136	70286.908	0.058
NIPA tanque vacío (Pa)	52937.018	52939.019	0.003

**CUADRO 9: COMPARACIÓN Y VALIDACIÓN DEL FLUIDO H.B.**

#### CAPITULO 4 ESTRUCTURA Y VALIDACIÓN DEL PROGRAMA

En los cuadros anteriores (7, 8 y 9) se analiza de una forma numérica la variación en porcentaje de los resultados obtenidos manualmente y por el Programa, en los cuales se pueden observar variaciones muy pequeñas que van de 0% al 3.6% en la mayoría de los casos. Por lo que esto le da una validez del 96.4% al Programa.

Por otra parte, éste porcentaje de variación además de ser mínimo, se puede justificar ya que los resultados que presentan estas variaciones son valores que varían, en general, en centésimas o milésimas, esto se debe a que los cálculos con el Programa son mucho más exactos ya que utiliza una mayor cantidad de cifras decimales.

# CAPITULO 5

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

## **CONCLUSIONES:**

De acuerdo con la comparación entre los resultados obtenidos de forma manual y los del programa en los cuadros 7, 8 y 9, se puede concluir que éstos son muy confiables ya que como se observa en los cuadros comparativos de la validación el porcentaje de error es mínimo, y en la mayoría de los casos los resultados presentan una variación menor al 4%. El mayor % se presenta en el fluido Newtoniano, debido a que para calcular el factor de fricción es necesario hacer iteraciones, las cuales manualmente siempre tienen menor exactitud y en el Programa se itera hasta que los valores sean iguales, por lo que los resultados presentan una mayor variación, la cual se puede reducir realizando más iteraciones de forma manual. El menor % de diferencia entre los cálculos manuales y los del Programa se tiene tanto en el fluido Herschel-Bulkley como en el fluido de la ley de la Potencia y esto se debe a que solo existen diferencias insignificantes de decimales.

Por lo antes mencionado se puede decir que se ha logrado elaborar un programa de simulación con un 96.4% de confiabilidad, permitiendo así tomar decisiones adecuadas y con rapidez.

Además, es importante mencionar las grandes ventajas que nos ofrece la programación, ya que este programa reduce el tiempo de cálculo aproximadamente de 5 horas a menos de 5 minutos si se entra al Programa y solo se introducen los datos y se ven los resultados; o máximo 10 minutos si además se consulta toda la información que contiene el Programa, lo cual significa que el tiempo de 5 horas aumentaría casi al doble si el estudiante tiene que buscar en diferentes libros las definiciones y fórmulas que necesite. De ésta forma se pueden resolver más rápidamente los problemas de mecánica de fluidos, dedicando más tiempo a entender los conceptos y fenómenos involucrados durante el transporte de fluidos en tuberías.

## CAPITULO 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Esta Tesis además de presentar en el texto todos los conceptos básicos de Mecánica de Fluidos y Programación en Visual Basic, incluye un disquette con el Programa en el cual se encuentran además de las pantallas de datos y resultados, pantallas de información la cual se apoya en este texto.

## **RECOMENDACIONES:**

° Es recomendable que se incluyan en el Plan de Estudios materias de programación para que los alumnos se familiaricen con el uso de computadoras ya que es una parte fundamental que debe cubrir el perfil de un egresado.

° Es necesario que el alumno tome conciencia de la importancia del uso de las computadoras, no solamente para realizar trabajos y darles una buena presentación, sino también la considere como una herramienta que le facilite la resolución de problemas y de esta manera se vea reducido el tiempo destinado a la realización de los cálculos.

° Este programa solo cubre la etapa final de los balances de energía mecánica de un proceso (tanque a envasadora); sin embargo, se pueden realizar toda una serie de programas en los cuales se abarquen otras etapas del proceso como por ejemplo: balances de energía mecánica de tanque a tanque, de tanque a tanque con un determinado equipo (filtro, intercambiador de calor, etc.) entre ellos.

° Se recomienda validar el programa con resultados que se obtengan experimentalmente y de esta manera ver si el comportamiento del fluido en los equipos es similar al que predice el programa.

° Este trabajo puede proyectarse a Nivel Industrial ya que proporciona una ayuda reduciendo el tiempo en la realización de cálculos para la selección de equipo, así como para predecir el comportamiento de los fluidos alimenticios en una tubería o equipo en particular.

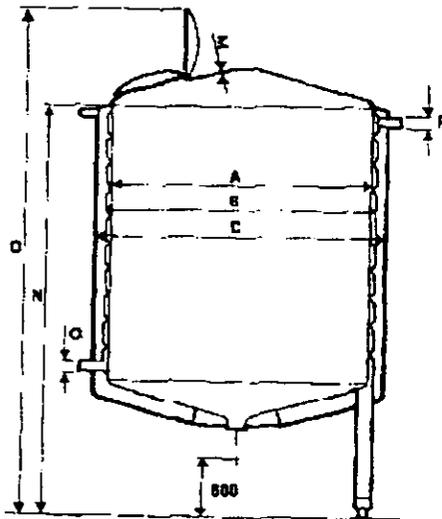
## BIBLIOGRAFÍA

**BIBLIOGRAFIA**

- Alfa – Laval. 1994. Food and Dairy Engineering. Manual U.S.A.
- Bird R., Stewart W and Lightfoot E. 1990. Fenómenos de Transporte. Editorial Reverté, México.
- Ceballos S. 1992. Visual Basic. Aplicaciones para Windows. Editorial Addison-Wesley Iberoamericana. U.S.A.
- Crane, 1990 Flow of Fluids. Through valves, fittings and pipe. Ed. McGraw – Hill, México.
- Cheremisinoff, N. 1988. Encyclopedia of Fluid Mechanics. Rheology and Non-Newtonian Flows Vol. 7. Gulf Publishing Company, U.S.A.
- Dover Resources Company. 1987. Blackmer. Hydraulic Data For Pump Applications. Manual, U.S.A.
- García J., Steffe F. 1986. Optimum Economic Pipe Diameter for Pumping Herschel-Bulkley Fluids in Laminar Flow. Journal of Food Engineering. U.S.A. Vol (12 ), No. 8. 117:135
- Geankoplis C. 1993. Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias. Compañía Editorial Continental S.A. de C.V., México.
- Glicksman Martin. 1969. Gum Technology in the Food Industry. Academic Press Inc., London.
- Hui Y. 1993. Dairy Science and Technology Handbook. Applications Science, Technology, and Engineering Vol 3. VCH Publishers Inc. U.S.A.
- Halvorson M. 1996. Aprenda Visual Basic Ya. McGraw-Hill, España.

- Hughes W. 1978. Brighton J. Teoría y Problemas de Dinámica de Fluidos. Ed. McGraw-Hill, México.
- Martínez P. 1994. Diseño y Optimización de redes de Fluidos Newtonianos y No-Newtonianos. Apuntes de la materia de flujo de fluidos. FESC UNAM, México.
- Mott L. 1996. Mecánica de Fluidos Aplicada. Prentice-Hall Hispanoamericana, S.A. México.
- Rao. M., Rizvi S. 1995. Engineering Properties of Foods. Ed. Marcel Dekker, Ins U.S.A
- Sanchís P., Martínez L., Canet A. 1997. Visual Basic. Guía práctica para programadores. Ediciones Anaya Multimedia. México.
- Saunders E. 1988. Heat Exchangers. Selection, Design and Construction. Ed. Logman Scientific and Technical. Great Britain.
- Stanley M. 1988. Chemical Process Equipment. Selection and Design. Ed. Butterworth. U.S.A.
- Steffe J. 1992. Rheological Methods in Food. Process Engineering. Freeman Press U.S.A.
- Steffe J., Morgan. R.1986. Pipeline Design and Pump Selection for Non-Newtonian Fluid Foods. Food Technology, Vol (40), No.12, 78:85.
- Voss G. 1996. Programación Orientada a Objetos: Una Introducción. McGraw-Hill, México.

ANEXO



**TANQUE MODELO (MVRI)**

A = Diámetro interno del Tanque

B = Diámetro del Tanque

C = Diámetro del Enchaquetado

M = Espesor del Tanque

N = Altura útil del tanque

O = Altura del Tanque

P = Diámetro de la conexión a la entrada

Q = Diámetro de la conexión a la salida

CAPACIDAD (Litros)	A (mm)	B (mm)	C (mm)	M (mm)	N (mm)	O (mm)	P	Q
1000	1200	1219	1350	2	1900	2640	1"	1"
1500	1200	1219	1350	2	2350	3090	1"	1"
2000	1400	1419	1550	2	2360	3100	1 ¼"	1 ¼"
3000	1400	1419	1550	2	3000	3740	1 ¼"	1 ¼"
4000	2000	2019	2150	2.5	2400	3140	2x2"	2x2"
5000	2000	2019	2150	2.5	2650	3410	2x2"	2x2"
6000	2000	2019	2150	2.5	2975	3715	2x2"	2x2"
7000	2200	2219	2350	2.5	3185	3925	2x2"	2x2"
8000	2200	2219	2350	2.5	3685	4425	3x2"	3x2"