



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE BOMBEO EN UNA DESTILERÍA DE ALCOHOL
ETÍLICO, USANDO UNA BOMBA DE PALETAS Y SU EVALUACIÓN
CONTRA SISTEMAS TRADICIONALES**

Pablo José Calderón Carranza

Asesorado por el Ing. Qco. Julio Enrique Chávez Montufar

Guatemala, junio de 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE BOMBEO EN UNA DESTILERÍA DE ALCOHOL
ETÍLICO, USANDO UNA BOMBA DE PALETAS Y SU EVALUACIÓN
CONTRA SISTEMAS TRADICIONALES**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

PABLO JOSÉ CALDERÓN CARRANZA

ASESORADO POR EL ING. QCO. JULIO ENRIQUE CHÁVEZ MONTUFAR

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, JUNIO DE 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Raúl Eduardo Ticún Córdova
VOCAL V	Br. Henry Fernando Duarte García
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Sidney Alexander Samuels Milson
EXAMINADOR	Ing. Carlos Salvador Wong Davi
EXAMINADOR	Ing. William Guillermo Álvarez Mejía
EXAMINADOR	Ing. Jaime Domingo Carranza González
SECRETARIO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

DISEÑO DE UN SISTEMA DE BOMBEO EN UNA DESTILERÍA DE ALCOHOL ETÍLICO, USANDO UNA BOMBA DE PALETAS Y SU EVALUACIÓN CONTRA SISTEMAS TRADICIONALES

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, el 05 de septiembre de 2007.



Pablo José Calderón Carranza

Guatemala, 12 de febrero del 2009

Ing. Williams Álvarez
Director de Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Ingeniero Williams Álvarez,
Presente:

Por este medio apruebo al estudiante Pablo José Calderón Carranza, con carné universitario No. 1999-11245, el trabajo de graduación, el cual estoy asesorando, cuyo título es: **“Diseño de un sistema de bombeo en una destilería de alcohol etílico usando una bomba de paletas y su evaluación contra sistemas tradicionales”**.

Agradeciendo de antemano su atención,

Atentamente,


Ing. Químico Julio Chávez

Julio Enrique
INGENIERO QUÍMICO
Colegiado No. 125



Guatemala, 31 de Agosto de 2009
Ref. EI.Q.468.2009

Ingeniero
Williams Guillermo Álvarez Mejía
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Presente.

Estimado Ingeniero Álvarez:

Como consta en el Acta TG-020-09-B-IF le informo que reunidos los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del **Informe Final del Trabajo de Graduación**, para optar al título de INGENIERO QUÍMICO al estudiante universitario **PABLO JOSÉ CALDERÓN CARRANZA**, identificado con carné No. **1999-11245**, titulado: **“DISEÑO DE UN SISTEMA DE BOMBEO EN UNA DESTILERÍA DE ALCOHOL ETÍLICO, USANDO UNA BOMBA DE PALETAS Y SU EVALUACIÓN CONTRA SISTEMAS TRADICIONALES”** el cual ha sido asesorado por el ingeniero Químico **Julio Enrique Chávez Montúfar**, como consta en el Acta.

Habiendo encontrado el informe final **satisfactorio**, se procede a recomendarle autorice al estudiante **Calderón Carranza**, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.



“ID Y ENSEÑAR A TODOS”

Inga. **Telesa Lisely de León Arana, M.Sc.**
COORDINADORA
Tribunal que revisó el protocolo
Del trabajo de graduación

C.c.: archivo



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

Ref.EIQ.TG.134.2013

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación del estudiante, **PABLO JOSÉ CALDERÓN CARRANZA** titulado: "**DISEÑO DE UN SISTEMA DE BOMBEO EN UNA DESTILERÍA DE ALCOHOL ETÍLICO, USANDO UNA BOMBA DE PALETAS Y SU EVALUACIÓN CONTRA SISTEMAS TRADICIONALES**". Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.


Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, mayo 2013

Cc: Archivo
VMMV/ale



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de graduación titulado: **DISEÑO DE UN SISTEMA DE BOMBEO EN UNA DESTILERÍA DE ALCOHOL ETÍLICO, USANDO UNA BOMBA DE PALETAS Y SU EVALUACIÓN CONTRA SISTEMAS TRADICIONALES**, presentado por el estudiante universitario: **Pablo José Calderón Carranza**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Decano



Guatemala, junio de 2013

/cc

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por su amor hacia nosotros
Mis padres	Por darme un ejemplo de vida
Mi esposa y mis hijos	Por convertirse en mis más preciados tesoros
Mis hermanos	Por su apoyo incondicional

AGRADECIMIENTOS A:

- Dios** Por su amor, cariño y ternura, ya que sin Él no somos nada.
- Mis padres** Por su amor, apoyo, paciencia y cariño en mi formación como la persona que soy.
- Mi esposa** Por su amor, apoyo incondicional y ayuda idónea en el caminar de la vida. Te amo.
- Mi hijo e hija** Por ser mi inspiración y deseo de superación.
- Mis hermanos** Por su amor incondicional.
- Mi familia** Por su amistad.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	III
LISTA DE SÍMBOLOS.....	V
GLOSARIO.....	VII
RESUMEN.....	IX
OBJETIVOS.....	XI
INTRODUCCIÓN.....	XIII
1. MARCO TEÓRICO.....	1
1.1. Melaza.....	1
1.2. Flujo de fluidos.....	5
1.2.1. Flujo laminar y flujo turbulento.....	7
1.2.2. Flujo turbulento.....	8
1.2.3. Flujo laminar.....	9
1.3. Bombas sujetas a estudio.....	11
1.3.1. Tipos de bombas.....	12
1.3.2. Bombas de desplazamiento positivo.....	13
1.3.2.1. Bombas alternativas-rotatorias.....	14
1.3.2.1.1. Bombas de paletas.....	15
1.3.2.1.2. Bombas de cavidades progresivas.....	16
1.3.2.2. Bombas reciprocantes.....	19
2. RESULTADOS.....	21
2.1. Cuantificación de tubería y accesorios por rutas posibles.....	21

2.2.	Cálculo de caída de	
2.3.	presión por medio del método de longitud equivalente para tubería de acero al carbón (<i>carbon steel</i>).....	22
2.4.	Comparación técnica de dos marcas de bombas a ser evaluadas.....	24
2.5.	Comparación por marca y modelo de consumo de energía eléctrica por bomba.....	26
2.6.	Cálculo de costos de operación y mantenimiento de bomba, por marca y modelo.....	27
2.7.	Cálculo de valor presente neto (VPN), para comparación económica de los posibles equipos a ser instalados a diferentes caudales.....	30
3.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	33
	CONCLUSIONES.....	39
	RECOMENDACIÓN.....	41
	BIBLIOGRAFÍA.....	43
	APÉNDICES.....	45
	ANEXO.....	47

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1. Bomba de paletas.....	16
2. Bomba de cavidades progresivas.....	17

TABLAS

I. Composición típica de la melaza.....	2
II. Tipos de melaza para la producción de etanol.....	3
III. Cuantificación de tubería y accesorios por rutas posibles.....	21
IV. Opciones de diámetro a ser utilizados para las dos distintas rutas a diferentes caudales de melaza.....	22
V. Factor “K” para el cálculo de caída de presión por el método de longitud equivalente para tubería y accesorios a diferentes diámetros.....	22
VI. Cálculo de caída de presión para diferentes flujos de melaza en las distintas opciones de diámetro propuesto y en las dos posibles rutas definidas.....	23
VII. Comparación técnica de opciones de bomba a evaluar para el caudal de 575 m ³ /h de melaza.....	25
VIII. Comparación por marca y modelo de bombas en consumo de energía eléctrica durante el período estimado de operación, a distintos caudales de melaza.....	26

IX. Cuadro comparativo de costos de operación y mantenimiento entre bomba de paletas y bomba de cavidades progresivas, a un caudal de 575 m ³ /h.....	28
X. Cuadro comparativo de costos de operación y mantenimiento entre bomba de paletas y bomba de cavidades progresivas, a un caudal de 1 150 m ³ /h.....	28
XI. Cuadro comparativo de costos de operación y mantenimiento entre bomba de paletas y bomba de cavidades progresivas, a un caudal de 1 750 m ³ /h.....	29
XII. Cuadro comparativo de VPN entre bomba de paletas y bomba de cavidades progresivas a un caudal de 575 m ³ /h.....	30
XIII. Cuadro comparativo de VPN entre bomba de paletas y bomba de cavidades progresivas a un caudal de 1 150 m ³ /h.....	31
XIV. Cuadro comparativo de VPN entre bomba de paletas y bomba de cavidades progresivas a un caudal de 1 750 m ³ /h.....	32

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
ρ	Densidad
D	Diámetro de tubería
Δh	Diferencial de altura
dy	Diferencial de dirección
Δp_f	Diferencial de pérdida de presión debida a la fricción superficial
dr	Diferencial de radio
dv	Diferencial de velocidad
ζ	Esfuerzo cortante
L	Longitud de tubo recto
N_{Re}	Número de Reynolds
V	Velocidad del fluido dentro de la tubería
μ	Viscosidad de líquido

GLOSARIO

Azúcares fermentables	Azúcares que pueden ser convertidos en alcohol.
Azúcares no fermentables	Azúcares residuales, los cuales no reducen el reactivo de Felling; son azúcares que no pueden ser convertidos en alcohol.
Azúcares reductores	Azúcares que reducen el reactivo de Felling.
Azúcares totales como invertido	Medida analítica de azúcares reductores en un material azucarado.
Brix	Término utilizado cuando un equipo refractométrica, con una escala basada en la relación entre índices refractarios a 20° C y el porcentaje de masa del total de sólidos soluble en una solución acuosa pura de sacarosa, es usado en lugar de un hidrómetro para verificar la concentración de sólidos de sacarosa contenidos en la solución.
Hp (mca)	Pérdida de presión (Hp) en la tubería, expresada en metros de columna de agua (mca).
Melaza	El licor madre separado de la última masacocida, en la producción de azúcar, por métodos mecánicos.

Pureza

El ratio porcentual de sacarosa (o pol), al total de sólidos solubles (o brix) en un producto azucarado.

TSAI

Azúcares totales como invertidas, por sus siglas en inglés.

RESUMEN

El presente trabajo está enfocado en la comparación técnico-económica de dos sistemas de bombeo para el trasiego de melaza desde el tanque de almacenamiento de la misma, hasta el punto en donde será utilizada para el proceso de fermentación en una destilería de alcohol etílico; con esta comparación se pretende ilustrar la manera en que debe realizarse un análisis previo a la compra de un equipo en la industria en general.

Para llevar a cabo dicha comparación, se definieron dos rutas posibles para el trasiego de la melaza (Ruta 1 y Ruta 2); dichas rutas difieren en dirección, trazo, longitud y accesorios necesarios para el armado de la misma; los criterios para la definición de ambas rutas fueron factibilidad de instalación y facilidad de instalación.

Establecida la ruta, se procedió a realizar un análisis de caída de presión a lo largo de cada una de ellas para diferentes caudales de melaza; como resultado de este análisis, se obtuvo que la mejor ruta para el trasiego de melaza es la ruta 1, ya que en promedio la caída de presión en los distintos escenarios evaluados es 40 % menor para la ruta 1 que para la ruta 2.

Una vez definida la ruta, se procedió a la evaluación de los equipos de bombeo a ser utilizados para dicha aplicación; las bombas evaluadas para este caso fueron:

- a. Bomba de paletas
- b. Bomba de cavidades progresivas

Inicialmente, se llevó a cabo una comparación técnica entre las dos bombas evaluadas, verificando que los materiales constructivos y las características hidráulicas de los equipos correspondieran a los requerimientos de diseño para el trasiego de 577 m³/h requeridos para la primera etapa de la planta de producción de alcohol; para futuros crecimientos de la planta de producción se procederá a la compra de bombas de iguales características para llegar a duplicar o triplicar la capacidad inicial de bombeo según sea la necesidad.

Luego de la comparación técnica, se procedió con una comparación económica de ambas opciones; para ello se utilizaron los siguientes criterios:

- a. Potencia consumida por bomba
- b. Costo inicial de los equipos puestos en la bodega de la destilería
- c. Costo de instalación de los equipos
- d. Costos de operación y mantenimiento por bomba para cada caudal por año de operación
- e. Evaluación de VPN

Al finalizar el análisis completo se pudo concluir que el mejor equipo de bombeo, para el caso analizado, es la bomba de paletas, obteniendo con ella un menor costo operativo a lo largo de su vida útil y manteniendo la eficiencia en la operación de la misma que una bomba de cavidades progresivas.

OBJETIVOS

General

Diseñar un sistema de bombeo usando una bomba de paletas y evaluar factores técnicos y económicos frente a sistemas tradicionales utilizados en la industria de producción de etanol.

Específicos

1. Establecer la ruta óptima del paso de tubería de trasiego de melaza, desde el tanque de almacenamiento de la misma hasta la primera etapa del proceso de destilación.
2. Cuantificar tubería y accesorios necesarios para la ruta óptima propuesta para el trasiego de melaza, usando el sistema propuesto ante los tradicionales.
3. Calcular la caída de presión generada por el flujo de melaza en la tubería propuesta para distintos flujos, para el sistema propuesto y para los sistemas tradicionales.
4. Hacer un análisis económico del sistema propuesto con base en los datos técnicos y económicos obtenidos en el estudio.

5. Establecer el mejor sistema de transporte de melaza en cuanto a ruta de tubería, diámetro de tubería y tipo de bomba a utilizar, con base en los datos técnicos y económicos para el sistema propuesto y los tradicionales.

INTRODUCCIÓN

El alcohol etílico (etanol) puede producirse comercialmente a partir de las mieles generadas en un ingenio azucarero; a diferencia de otras fuentes de materias primas para la producción de etanol. El contenido de carbohidratos en estas mieles ya se encuentra diluido en agua, por lo que la materia prima tiene las ventajas que no debe pre-tratarse con cocimiento ni una acción enzimática para disponer de azúcares fermentables; sin embargo, siendo las mieles de un ingenio azucarero un material de reología complicada, presenta un reto para el transporte de la misma desde los tanques de almacenamiento hacia la primera etapa del proceso de destilación. El caso a analizar es uno en el cual la materia prima para la destilación es melaza.

Debido a las características físico-químicas de la melaza (producto de alta viscosidad, alta densidad, con tendencia a tener sólidos en suspensión, entre otras), el mejor método para bombear este material es por medio de una bomba de desplazamiento positivo.

Este trabajo tiene como objetivo comparar un sistema de bombeo usando una bomba de paletas contra sistemas tradicionales en la industria del etanol, en donde generalmente se utilizan otro tipo de bombas conocidas como tornillo; para esta comparación se tomarán en cuenta criterios técnico-económicos. En el caso analizado, existe la opción de sustituir las bombas que se usan actualmente como unidad de proceso clave en el transporte de melaza por una bomba de paletas que ofrece avances en su funcionamiento; dicha sustitución debe ser justificada previamente de una manera técnica y económica, lo cual se demostrará en este trabajo.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Melaza

Muchas destilerías de alcohol están usando melaza como materia prima para la producción de etanol. La melaza se diferencia de otras fuentes de sustratos fermentables como maíz, sorgo, papas, vegetales, etc., las cuales tienen su contenido de carbohidratos en forma de almidón y celulosa, el cual debe ser precocinado e hidrolizado en azúcares simples, fácilmente fermentables. La melaza no requiere un pretratamiento, ya que sus carbohidratos desde un inicio se encuentran en forma de azúcares disueltos en agua. Durante el proceso de fabricación de azúcares uno de los subproductos importantes es la melaza, la cual puede utilizarse para la producción de etanol, ácido cítrico, levadura y como alimentación catalítica. Cerca de 20 billones de litros de etanol son producidos anualmente de esta fuente de alimentación (de acuerdo a JACQUES, K. et al, en su libro *The alcohol text book*, p. 3-15).

Tabla I. Composición típica de la melaza

No.	Parámetro	Unidad	Rango
A. Análisis químicos:			
1	Sólidos totales	% por peso	65 a 80
2	Azúcares totales	% por peso	45 a 50
3	Azúcares no fermentables	% por peso	4 a 5
4	Azúcares fermentables	% por peso	40 a 46
5	F/N ratio	-----	1 a 2.5
6	Total de inorgánicos	% por peso	8 a 12
7	Calcio como CaO	% por peso	1.5 a 3.5
8	Total de lodos sedimentables a 4.5 pH	% por peso	5 y menor
9	Gravedad específica @ 20° C	-----	1.38 a 1.55
10	Acidez en términos de ácido acético y sales de acetato	M1 de 0.1N NaOH	29mL
11	pH @ 40 Bx de dilución	-----	4.5 a 5.2
12	Partículas suspendidas > 100 micrones	% por peso	Hasta 0.05
13	Color en términos de densidad óptica (OD) a 375 nm con 0.01 %w/v de dilución	OD	0.15 a 0.4
14	Sulfatos solubles como SO ₄	-----	1.5 a 5
B. Microbiología			
1	Contenido bacterial total	CFU/gm	10E3 y menor
2	Contenido de levadura y hongos	CFU/gm	10E3 y menor

Fuente: JACQUES, K et al. *The alcohol text book*. P. 3-17

Existen al menos seis tipos básicos de melaza que pueden encontrarse como material prima para la producción de etanol, tal como puede verse en la tabla II. El caso a ser estudiado corresponde a la melaza de caña en la producción de azúcar.

Tabla II. **Tipos de melaza para la producción de etanol**

No	Tipo de melaza
1	Melaza de caña
2	Mieles fermentadas
3	Melaza de refineries de azúcar
4	Melaza de remolacha
5	Melaza de refineries de azúcar de remolacha
6	Melaza cítrica

Fuente: JACQUES, K. et al. *The alcohol text book*. p. No. 3-19.

En la producción de azúcar de caña esta es aplastada en molinos con el objetivo de exprimirla el jugo que contiene ésta. El jugo es calentado, clarificado por filtración y la adición de floculantes y otros productos químicos para remover la fibra de caña que va en el jugo y el lodo, luego es evaporado para concentrar el azúcar que va en dicho jugo para su cristalización. El jarabe que contiene los cristales de azúcar es centrifugado para separar los cristales del jarabe que no logró cristalizarse (el cual todavía contiene azúcares en un alto porcentaje).

Este residuo se conoce como miel A, el cual es nuevamente evaporado y centrifugado para recuperar más cristales de azúcar; el jarabe obtenido en la centrifugación de este nuevo jarabe se conoce como miel B; el proceso se repite nuevamente para una mayor eficiencia en la producción de azúcares, con lo que se obtiene la melaza como residuo de la tercera centrifugación.

La evaporación y centrifugación repetida provee que el contenido de azúcar en la melaza disminuya, aumentando también la viscosidad y la concentración de sales y otras impurezas, resultando un líquido café bastante pesado. La concentración de la melaza normalmente es medida en grados Brix. Esta escala es la misma que la escala de Baling, ésta mide cual sería el contenido de azúcares de un líquido si todos los sólidos disueltos y suspendidos fueran azúcares; expresado de esta manera, es el contenido de azúcares en la solución azucarada con la misma gravedad específica que la muestra. Con esto, una melaza de 80 Bx, tiene una gravedad específica de 1,416, lo cual es lo mismo que una solución azucarada conteniendo 80 % de azúcares por peso. El brix es medido utilizando un hidrómetro originalmente sugerido sólo para soluciones azucaradas.

La melaza en algunos casos es considerada el desperdicio de un ingenio azucarero y los ingenios, generalmente, no pueden garantizar el contenido de azúcares de una manera anticipada, todo dependerá de la eficiencia del ingenio en la producción de azúcar, la calidad de la materia prima que utilice el ingenio, problemas de centrifugación en la separación del producto final, entre otros factores; en fin, hay un sin número de factores que pudieran generar variación en la materia prima entregada por un ingenio.

El parámetro que comúnmente se utiliza para determinar la viabilidad de producción de etanol de una materia prima es el contenido de azúcares totales como invertidos (*TSAI* por sus siglas en inglés); la prueba normal que se realiza para medir los *TSAI*, es muy simple en cuanto a que mide el poder de reducción de la muestra, asumiendo que todos los componentes reductores son azúcares. De esta manera, si sulfato de sodio u otro compuesto reductor se adicionara a la melaza, el resultado tradicional para determinar los *TSAI* indicaría que hay mayor presencia de azúcares.

1.2. Flujo de fluidos

Los fluidos se transportan generalmente por el interior de tubos o tuberías de sección circular, las cuales pueden tener diferentes tamaños, espesores de pared y estar construidas con diferentes materiales. En general, las tuberías son aquellas que tienen pared gruesa y rugosa, diámetro relativamente grande y se fabrican en longitudes comprendidas entre 6 y 12 metros, mientras que los tubos son de pared delgada y lisa, y con frecuencia están dispuestos en forma de rollos de muchos metros de longitud. Otra diferencia importante es su construcción, ya que los tubos se fabrican por extrusión o laminación en frío, mientras que las tuberías se fabrican por soldadura, moldeo o taladro.

Reynolds estudió las características de flujo de los fluidos inyectando un trazador dentro de un líquido que fluía por una tubería. A velocidades bajas por el líquido, el trazador se mueve linealmente en la dirección axial. A mayores velocidades, las líneas del flujo del fluido se desorganizan y el trazador se dispersa rápidamente después de su inyección en el líquido. El flujo lineal se denomina laminar y el flujo errático obtenido a mayores velocidades del líquido se denomina turbulento.

Las características que condicionan el flujo laminar depende de las propiedades del líquido y de las dimensiones del flujo. Conforme aumenta el flujo másico aumenta las fuerzas del momento o inercia, las cuales son contrarrestadas por la fricción o fuerzas viscosas dentro del líquido que fluye.

Cuando estas fuerzas opuestas alcanzan un cierto equilibrio se generan cambios en las características del flujo. Con base en los experimentos realizados por Reynolds en 1874 se concluyó que las fuerzas del momento son función de la densidad, del diámetro de la tubería y de la velocidad media. Además, la fricción o fuerza viscosa depende de la viscosidad del líquido.

Según dicho análisis, el número de Reynolds se definió como la relación existen entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas (o de rozamiento):

Ecuación 1

$$N_{Re} = \frac{\text{Fuerzas Inerciales}}{\text{Fuerzas Vis cos as}} = \frac{\rho DV}{\mu}$$

Donde:

N_{Re}	Número de Reynolds
ρ	Densidad del líquido
D	Diámetro de la tubería
V	Velocidad del fluido dentro de la tubería
μ	Viscosidad del líquido

El número de Reynolds es adimensional y puede utilizarse para definir las características del flujo dentro de una tubería. El número de Reynolds proporciona una indicación de la pérdida de energía causada por efectos viscosos.

Observando la ecuación 1, cuando las fuerzas viscosas tiene un efecto dominante en la pérdida de energía, el número de Reynolds es pequeño y el flujo se encuentra en el régimen laminar. Si el número de Reynolds es 2 100 o menor el flujo será laminar. Un número de Reynolds mayor de 10 000 indica que las fuerzas viscosas influyen poco en la pérdida de energía y el flujo es turbulento.

Los fluidos se mueven por medio de bombas, ventiladores, soplantes y compresores, dependiendo del tipo de fluido y el uso que se requiera en cada aplicación. En el caso de los fluidos no compresibles, como los líquidos, se utilizan las bombas para trasegarlos.

1.2.1. Flujo laminar y flujo turbulento

Los flujos viscosos se pueden clasificar en laminares o turbulentos teniendo en cuenta la estructura interna del flujo. En un régimen laminar, la estructura del flujo se caracteriza por el movimiento de láminas o capas. La estructura del flujo en un régimen turbulento por otro lado, se caracteriza por los movimientos tridimensionales, aleatorios, de las partículas de fluido, superpuestos al movimiento promedio.

En un flujo laminar no existe un estado macroscópico de las capas de fluido adyacentes entre sí. Un filamento delgado de tinta que se inyecte en un flujo laminar aparece como una sola línea; no se presenta dispersión de la tinta a través del flujo, excepto una difusión muy lenta debido al movimiento molecular.

Por otra parte, un filamento de tinta inyectado en un flujo turbulento rápidamente se dispersa en todo el campo de flujo; la línea del colorante se descompone en una enredada maraña de hilos de tinta. Este comportamiento del flujo turbulento se debe a las pequeñas fluctuaciones de velocidad superpuestas al flujo medio de un flujo turbulento; el mezclado macroscópico de partículas pertenecientes a capas adyacentes de fluido da como resultado una rápida dispersión del colorante; este es fundamentalmente el experimento de Reynolds. El filamento rectilíneo de humo que sale de un cigarrillo expuesto a un ambiente tranquilo, ofrece una imagen clara del flujo laminar. Conforme el humo continúa subiendo, se transforma en un movimiento aleatorio, irregular; es un ejemplo del flujo turbulento.

1.2.2. Flujo turbulento

El flujo turbulento es comúnmente desarrollado, debido a que la naturaleza tiene tendencia hacia el desorden y esto en términos de flujos, significa tendencia hacia la turbulencia. Este tipo de flujo se caracteriza por trayectorias circulares erráticas, semejantes a remolinos.

El flujo turbulento ocurre cuando las velocidades de flujo son generalmente muy altas, o en fluidos en los que las fuerzas viscosas son muy pequeñas.

La turbulencia puede originarse por la presencia de paredes en contacto con el fluido o por la existencia de capas que se mueven a diferentes velocidades. Además, un flujo turbulento puede desarrollarse bien sea en un conducto liso o en un conducto rugoso.

El régimen de flujo depende de tres parámetros físicos que describen las condiciones del flujo. El primer parámetro es una escala de longitud del campo de flujo, como el espesor de una capa límite o el diámetro de una tubería. Si dicha escala de longitud es lo bastante grande, una perturbación del flujo podría aumentar y el flujo podría volverse turbulento. El segundo parámetro es una escala de velocidad tal como un promedio espacial de la velocidad; si la velocidad es lo bastante grande el flujo podría ser turbulento. El tercer parámetro es la viscosidad cinemática; si la viscosidad es lo bastante pequeña, el flujo puede ser turbulento.

1.2.3. Flujo laminar

Las partículas se desplazan siguiendo trayectorias paralelas, formando así en conjunto capas o láminas de ahí su nombre. El fluido se mueve sin que haya mezcla significativa de partículas de fluido vecinas. Este flujo se rige por la ley que relaciona la tensión cortante con la velocidad de deformación angular.

La viscosidad del fluido es la magnitud física predominante y su acción amortigua cualquier tendencia a ser turbulento.

Cuando un fluido fluye por la tubería con flujo laminar de estado estable, la siguiente ecuación expresa el esfuerzo cortante para un flujo newtoniano:

Ecuación 2

$$\tau = -\mu \cdot \frac{dv}{dy}$$

Donde:

τ	Esfuerzo cortante
μ	Viscosidad del fluido
Dv	Diferencial de velocidad
Dy	Diferencial de dirección

Esta ecuación puede re-escribirse para variaciones del radio, dr , en vez de la distancia, dy , como sigue:

Ecuación 3

$$\tau = -\mu \cdot \frac{dv}{dr}$$

Con esta expresión y por medio de un balance de momento de casco del fluido en un casco cilíndrico, se obtiene la ecuación de Hagen-Poiseville para el flujo laminar de un líquido en tubos circulares, la cual se expresa de la siguiente manera:

Ecuación 4

$$\Delta p_f = (p_1 - p_2)_f = \frac{32 \cdot \mu \cdot v(L_2 - L_1)}{D^2}$$

Donde:

Δp_f	Pérdida de presión debida a la fricción superficial
L	Longitud de tubo recto
D	Diámetro interno de la tubería

Con esta ecuación se representa la pérdida de energía mecánica debido a la fricción superficial de la tubería; este término es diferente a la Δp causada por cambios de carga de velocidad o carga potencial.

Con la ecuación 4 y tomando en cuenta las pérdidas generadas por el diferencial de altura entre el punto de succión de la bomba y hasta donde debe descargarse el producto, la ecuación de pérdida total queda de la siguiente manera:

Ecuación 5

$$\Delta p_f = \frac{32 \cdot \mu \cdot v(L_2 - L_1)}{D^2} + \Delta h$$

No se tomarán en cuenta los accesorios que conforman la tubería para determinar la longitud equivalente de los mismos debido a que el fluido es del tipo laminar, por lo tanto la circulación del líquido no se ve afectada por éstos.

1.3. Bombas sujetas a estudio

Una bomba es un dispositivo utilizado para transportar fluidos de un lugar a otro, el cual absorbe energía mecánica que puede provenir de un rotor eléctrico, térmico, etc., y la transforma en energía que es transferida a un fluido como energía cinética.

Esta energía permite que el fluido pueda ser transportado de un lugar a otro a diferentes velocidades.

Los principales medios para transferir energía al fluido para su movilización son:

- La gravedad
- Fuerza centrífuga
- Fuerza electromagnética
- Transferencia de momentum
- Impulso mecánico, y
- Una combinación de estos mecanismos de transferencia de energía.

Se han diseñado una variedad de bombas con la finalidad de cumplir con los diferentes requerimientos. Los requerimientos básicos que definen la aplicación de un tipo de bomba son la presión de succión y de descarga, la pérdida de presión y la velocidad del flujo requerida.

Algunas de las características generales de las bombas es que en ellas, la densidad del fluido es a la vez constante y elevada, las diferencias de presión son generalmente considerables y son aparatos pesados.

1.3.1. Tipos de bomba

Existen muchos tipos de bombas utilizadas para diferentes aplicaciones, debiéndose tomar en cuenta una serie de factores para la elección adecuada del sistema de bombeo a utilizar, entre los cuales se encuentran la presión de proceso, velocidad de bombeo, la carga neta de succión positiva y el tipo de fluido a bombear.

Las bombas pueden clasificarse en:

- Dinámicas o cinéticas (centrífugas, periféricas y especiales)
- De desplazamiento positivo (reciprocantes y rotatorios), y
- Electromagnéticas

Las bombas sujetas a este estudio son del tipo de desplazamiento positivo, las cuales serán descritas a continuación.

1.3.2. Bombas de desplazamiento positivo

Se dice que una bomba es de desplazamiento positivo, cuando su órgano propulsor contiene elementos móviles de modo tal, que por cada revolución se genera de manera positiva un volumen dado o cilindrada, independientemente de la contrapresión a la salida. En este tipo de bombas la energía mecánica recibida se transforma directamente en energía de presión que se transmite hidrostáticamente en el sistema hidráulico.

Estas bombas guían al fluido que se desplaza a lo largo de toda su trayectoria, el cual siempre está contenido entre el elemento impulsor, que puede ser un émbolo, un diente de engranaje, un aspa, un tornillo, etc., y la carcasa o el cilindro.

El movimiento del desplazamiento positivo consiste en el movimiento de un fluido causado por la disminución del volumen de una cámara. Por consiguiente, en una máquina de desplazamiento positivo, el elemento que origina el intercambio de energía no tiene necesariamente movimiento alternativo (émbolo), sino que puede tener movimiento rotatorio (rotor).

En las bombas de desplazamiento positivo siempre debe permanecer la descarga abierta, pues a medida que la misma se obstruya, aumenta la presión en el circuito hasta alcanzar valores que pueden ocasionar la rotura de la bomba; por tal causa, siempre se debe colocar inmediatamente a la salida de la bomba una válvula de alivio o de seguridad, con una descarga a tanque y con registro de presión.

Se dice que una bomba es de desplazamiento no positivo, cuando su órgano propulsor no contiene elementos móviles; es decir, que es de una sola pieza o de varias ensambladas en una sola.

Sin embargo, en las máquinas de desplazamiento positivo, tanto reciprocantes como rotatorias, siempre hay una cámara que aumenta de volumen (succión) y disminuye volumen (impulsión), por esto a estas máquinas también se les denomina volumétricas.

1.3.2.1. Bombas alternativas-rotatorias

Las bombas rotatorias, que generalmente son unidades de desplazamiento positivo, consisten de una caja fija que contiene engranajes, aspas, pistones, levas, segmentos, tornillos, etc., que operan con un claro mínimo. En lugar de “arrojar” el líquido, como en una bomba centrífuga, una bomba rotatoria lo atrapa, lo empuja contra la caja fija.

La bomba rotatoria descarga un flujo continuo. Aunque generalmente se les considera como bombas para líquidos viscosos, las bombas rotatorias no se limitan a este servicio únicamente, pueden manejar casi cualquier líquido que esté libre de sólidos abrasivos.

Dentro de este tipo se encuentran las bombas de paleta, las de tornillo y las de engranaje.

1.3.2.1.1. Bomba de paletas

Existen varios tipos de bombas de paletas, ellas podrán ser:

- De paletas deslizantes: con un número variante de ellas montadas en un rotor rasurado. Según la forma de la caja se subdividen en bomba simple, doble o triple cámara. La mayoría de las bombas de paletas deslizantes son de una cámara. Como estas máquinas son de gran velocidad de capacidades pequeñas o moderadas y sirven para fluidos poco viscosos, se justifica el siguiente tipo de clasificación.
- Bomba de paleta deslizante: con una sola paleta que abarca todo el diámetro. Se trata de una bomba esencialmente lenta, para líquidos muy viscosos.
- Bombas de paletas oscilantes: cuyas paletas se articulan en el rotor. Es otro de los tipos pesados de bomba de paleta.
- Bombas de paletas rodantes: también con ranuras en el rotor, pero de poca profundidad, para alojar rodillos de elastómero en el lugar de paletas, se trata de un modelo patentado.

- Bomba de leva y paleta: con una sola paleta deslizante en una ranura mecanizada en la caja cilíndrica y que, al mismo tiempo, encaja en otra ranura de un anillo que desliza sobre un rotor accionado y montado excéntricamente. El rotor y los anillos que ejercen el efecto de una leva que inicia el movimiento de la paleta deslizante. Así se elimina el rascado de las superficies. Se trata de una forma patentada que se emplea principalmente como bomba de vacío.
- Bomba de paleta flexible: que abraza un rotor de elastómero de forma esencial giratorio dentro de una caja cilíndrica. En dicha caja se encuentra un bloque en media luna que procura un paso excéntrico para el barrido de las paletas flexibles de rotor.

Figura 1. **Bomba de paletas**



Fuente: BLACKMER. *Ejemplo de bomba de paletas*. <http://www.blackmer.com/vane-hxl.jsp>.

Consulta: junio de 2007

1.3.2.1.2. Bomba de cavidades progresivas

Las bombas de cavidades progresivas, también conocidas como de tornillo, son un tipo especial de bombas rotatorias de desplazamiento positivo, en el cual el flujo a través de los elementos de bombeo es verdaderamente axial.

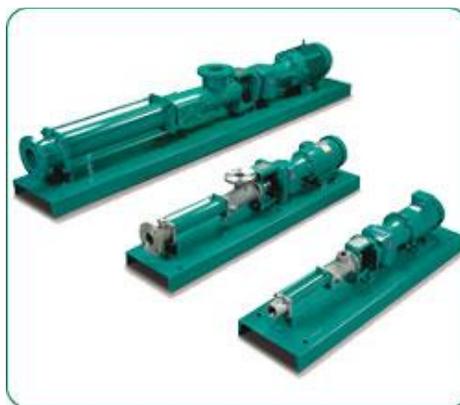
El líquido se transporta entre las cuerdas de tornillo de uno o más rotores y se desplaza axialmente a medida que giran engranados.

La bomba de tornillo puede manejar líquidos en una gama de viscosidad como la melaza hasta la gasolina, así como, los líquidos sintéticos en una gama de presiones de 50 a 5 000 lb/pulg² y los flujos hasta 5 000 gpm.

Debido a la relativamente baja inercia de sus partes en rotación, las bombas de tornillo son capaces de operar a mayores velocidades que otras bombas rotatorias o alternativas de desplazamiento comparable.

Algunas bombas de lubricación de aceite de turbina adjunta opera a 10 000 rpm y aún mayores. Las bombas de tornillo, como otras bombas rotatorias de desplazamiento positivo, son de autocebado y tienen una característica de flujo que es esencialmente independiente de la presión.

Figura 2. **Bomba de cavidades progresivas**



Fuente: Netzsch USA. *Ejemplo de bomba de cavidades progresivas.*

http://www.netzschusa.com/NemoPump/standard_series.htm. Consulta: junio de 2007

La bomba de tornillo simple existe sólo en número limitado de configuraciones. La rosca es excéntrica con respecto al eje de rotación y engrana con las roscas internas del estator (alojamiento del rotor o cuerpo). Alternativamente el estator está hecho para balancearse a lo largo de la línea de centros de la bomba.

Las bombas de tornillo múltiples se encuentran en una gran variedad de configuraciones y diseños.

Todos emplean un rotor conducido engranado con uno o más rotores de sellado. Varios fabricantes cuentan con dos configuraciones básicas disponibles, la construcción de extremo simple o doble, de las cuales la última es la más conocida.

Como cualquier otra bomba, hay ciertas ventajas y desventajas en las características de diseño de tornillo. Éstos deben reconocerse al seleccionar la mejor bomba para una aplicación particular.

Entre algunas ventajas de este tipo se tienen:

- Amplia gama de flujos y presiones.
- Amplia gama de líquidos y viscosidad.
- Posibilidad de altas velocidades permitiendo la libertad de seleccionar la unidad motriz.
- Bajas velocidades internas.
- Baja vibración mecánica, flujo libre de pulsaciones y operaciones suaves.
- Diseño sólido y compacto, fácil de instalar y mantener.
- Alta tolerancia a la contaminación en comparación con otras bombas rotatorias.

Entre algunas desventajas de este tipo de bombas se tienen:

- Costo relativamente alto debido a las cerradas tolerancias y claros de operación.
- Características de comportamiento sensibles a los cambios de viscosidad.

La capacidad para las altas presiones requiere de una gran longitud de los elementos de bombeo.

1.3.2.2. Bombas reciprocantes

Existen tres tipos de bombas reciprocantes, las cuales son: bombas de pistón, bomba de émbolo y bombas de diafragma. El funcionamiento de este tipo de bomba se basa en un pistón cilíndrico, un émbolo o un diafragma redondo que se mueve de adelante para atrás en un compartimiento. El dispositivo está equipado con válvulas para la entrada y la descarga del fluido que es bombeado y la operación de estas válvulas se relaciona directamente con los movimientos del pistón (9).

En todos los diseños modernos de bombas reciprocantes, las válvulas de succión y de descarga funcionan a partir de una diferencia de presiones.

2. RESULTADOS

Los resultados obtenidos luego de los análisis técnicos y económicos para la evaluación del bombeo de melaza en una destilería de alcohol etílico por medio de una bomba de paletas y su evaluación contra sistemas tradicionales, son los siguientes:

2.1. Cuantificación de tubería y accesorios por rutas posibles

Para cada una de las rutas posibles definidas para el trasiego de la meza, se llevó a cabo la cuantificación de la tubería necesaria, así como los accesorios, para el trasiego de la melaza desde el tanque de almacenamiento hasta el punto de descarga. A continuación se detalla esta cuantificación.

Tabla III. **Cuantificación de tubería y accesorios por rutas posibles**

Tubería / Accesorio	UM	Ruta 1	Ruta 2
Tubería	Metro	1 400	2 200
Codo 45°	Unidad	7	6
Codo 90°	Unidad	18	16
Válvula de mariposa	Unidad	2	2
Reducción a x b	Unidad	2	2
T, salida lateral	Unidad	1	2
T, pase directo	Unidad	1	1

Fuente: levantamiento topográfico en Finca Pantaleón, Santa Lucía Cotzumalguapa.

Tabla IV. **Opciones de diámetro a ser utilizados para las dos distintas rutas a diferentes caudales de melaza**

Opción	UM	Ø
Opción 1	Pulgada	8
Opción 2	Pulgada	10
Opción 3	Pulgada	12
Opción 4	Pulgada	14
Opción 5	Pulgada	16

Fuente: elaboración propia.

2.2. Cálculo de caída de presión por medio del método de longitud equivalente para tubería de acero al carbón (*carbon steel*)

Al finalizar la cuantificación de tubería y accesorios necesarios para cada una de las rutas definidas en este estudio, se procedió a calcular la caída de presión generada por cada una de las rutas. A continuación se presenta el detalle de este cálculo por cada ruta.

Tabla V. **Factor “K” para el cálculo de caída de presión por el método de longitud equivalente para tubería y accesorios a diferentes diámetros**

	Factor "K"				
	Ø Tub. (Pulg.)				
Accesorios	8	10	12	14	16
Tubería	1	1	1	1	1
Codo 45°	1.5	1.8	2.2	2.5	2.85

Continuación de la Tabla V.

	Factor "K"				
	ø Tub. (Pulg.)				
Accesorios	8	10	12	14	16
Codo 90°	3.3	4.1	4.8	5.4	6.15
Válvula de mariposa	1.4	1.7	2.1	2.4	2.75
Reducción 8 x 6	2				
Reducción 10 x 6		3.5			
Reducción 12 x 6			5		
Reducción 14 x 6				8	
Reducción 16 x 6					14
T, salida lateral	13	16	19	22	23
T, pase directo	4.3	5.5	6.1	5.3	6.2
Válvula de retención	25	32	38	45	51.5

Fuente: McNAUGHTON, Kenneth. *Bombas: selección, uso y mantenimiento*. p. 44

Tabla VI. **Cálculo de caída de presión para diferentes flujos de melaza en las distintas opciones de diámetro propuesto y en las dos posibles rutas definidas**

Caudal melaza (m ³ /h)	ø Tub. (Pulg.)	Hp (mca)	
		Ruta 1	Ruta 2
575.00	8.00	0.18	0.26
575.00	10.00	0.09	0.13
575.00	12.00	0.06	0.08
575.00	14.00	0.04	0.05

Continuación de la Tabla VI.

Caudal melaza (m ³ /h)	Ø Tub. (Pulg.)	Hp (mca)	
		Ruta 1	Ruta 2
575.00	16.00	0.02	0.03
1 150.00	8.00	0.71	1.05
1 150.00	10.00	0.37	0.54
1 150.00	12.00	0.22	0.31
1 150.00	14.00	0.14	0.20
1 150.00	16.00	0.10	0.13
1 750.00	8.00	1.63	2.43
1 750.00	10.00	0.87	1.24
1 750.00	12.00	0.52	0.72
1 750.00	14.00	0.33	0.45
1 750.00	16.00	0.23	0.30

Fuente: elaboración propia.

2.3. Comparación técnica de dos marcas de bombas a ser evaluadas

De acuerdo a las características del fluido a bombear fueron seleccionadas las bombas adecuadas para el trasiego de la melaza. A continuación se presenta un cuadro comparativo entre las bombas seleccionadas para este estudio.

Tabla VII. **Comparación técnica de opciones de bomba a evaluar para el caudal de 575 m³/h de melaza**

Tipo de bomba	Paletas	Cavidades progresivas
Marca	Blackmer	Netzsch
País de procedencia	USA	Brasil
Modelo	MLX4B	NM105SY02S14J
Cantidad	2	2
Capacidad (m ³ /h)	575	575
Material del rotor	Cuerpo de hierro dúctil, con camisa de desgaste reemplazable, paletas de bronce extra <i>clearance</i> (para altas viscosidades)	Hierro fundido
Tipo de sello	Sellos mecánicos de hierro/bronce/viton con cojinetes en ambos extremos	Estopa teflonada
Material del elastómero	NA	Vitón
Diámetro de succión (in)	6	8
Diámetro de descarga (in)	6	6
Reductor	Nord	Nord SK52W
Marca del motor	Reliance, TEFC	WEG, TEFC
Base	Base de acero tipo canal; frame del motor 256T	Acero al carbono SAE 1020, tipo "E"
Garantía (m)	18	18
Horas de operación para mantenimiento (según fabricante)	5 000	5 000
Tiempo estimado para mantenimiento (según fabricante)	8	6

Fuente: ofertas técnico-económicas presentadas por los proveedores.

2.4. Comparación por marca y modelo de consumo de energía eléctrica por bomba

De acuerdo a los datos del fabricante de cada bomba analizada en este estudio y la estimación del tiempo de operación diario que tendrá el equipo a ser seleccionado de acuerdo al proceso en que se aplicará, se procedió a calcular el consumo energético que tendrá cada una de las opciones analizadas. A continuación se presenta el resultado de este análisis.

Tabla VIII. **Comparación por marca y modelo de bombas en consumo de energía eléctrica durante el período estimado de operación a distintos caudales de melaza**

Parámetro	Bomba Blackmer			Bomba Netzsch		
	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
Caudal melaza (m ³ /h)	575	1 150	1 750	575	1 150	1 750
Potencia de motor (KW)	15,00	22,00	37,00	11,50	15,00	22,00
Potencia de motor (Hp)	20,00	29,52	49,65	15,43	20,13	29,52
Precio Q/KWh	1,43	1,43	1,43	1,43	1,43	1,43
Tiempo de operación (días/año)	196	196	196	196	196	196
Tiempo de operación (horas/día)	24	24	24	24	24	24

Continuación de la tabla VII

Parámetro	Bomba Blackmer			Bomba Netzsch		
	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
Tiempo de operación (horas/año)	4 704	4 704	4 704	4 704	4 704	4 704

Fuente: ofertas técnico-económicas presentadas por los proveedores.

Nota: valor de referencia del Kw/h de marzo de 2 008.

2.5. Cálculo de costos de operación y mantenimiento de bomba por marca y modelo

Tomando como punto de partida las ofertas técnico-económicas presentadas por los proveedores de los equipos analizados en este estudio, así como el consumo energético que tendría cada equipo debido a las condiciones de operación del proceso en que será aplicado el equipo seleccionado, fue estimado el costo de operación y mantenimiento que tendrá cada una de las opciones de bombas para cada uno de los escenarios planteados para el estudio. A continuación se presentan los resultados de estos cálculos.

Tabla IX. **Cuadro comparativo de costos de operación y mantenimiento entre bomba de paletas y bomba de cavidades progresivas a un caudal de 575 m³/h**

Tipo de bomba	Paletas	Cavidades progresivas
Caudal (m ³ /h)	575.00	575.00
Costo inicial del equipo (FOB Puerto)	US\$ 8 979,00	US\$ 13 850,00
Flete del equipo (hasta la destilería)	US\$ 1 250,00	US\$ 750,00
Impuesto a pagar	US\$ 1 227,48	US\$ 1 752,00
Seguro de transporte	US\$ 114,56	US\$ 163,52
Obra civil	US\$ 350,00	US\$ 250,00
Costo de instalación	US\$ 134,69	US\$ 138,50
Costo de energía eléctrica por año	US\$ 13 224,22	US\$ 10 138,57
Mano de obra, mantenimiento por año	US\$ 16,38	US\$ 12,29
Repuestos, mantenimiento por año	US\$ 750,00	US\$ 150,00

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Cuadro comparativo de costos de operación y mantenimiento entre bomba de paletas y bomba de cavidades progresivas a un caudal de 1 150 m³/h**

Tipo de bomba	Paletas	Cavidades progresivas
Caudal (m ³ /h)	1 150,00	1 150,00
Costo inicial del equipo (FOB Puerto)	US\$ 11 250,00	US\$ 15 500,00
Flete del equipo (hasta la destilería)	US\$ 1 250,00	US\$ 750,00
Impuesto a pagar	US\$ 1 500,00	US\$ 1 950,00

Continuación de la tabla X.

Tipo de bomba	Paletas	Cavidades progresivas
Seguro de transporte	US\$ 140,00	US\$ 182,00
Obra civil	US\$ 500,00	US\$ 400,00
Costo de instalación	US\$ 168,75	US\$ 155,00
Costo de energía eléctrica por año	US\$ 19 395,52	US\$ 13 224,22
Mano de obra, mantenimiento por año	US\$ 16,38	US\$ 12,29
Repuestos, mantenimiento por año	US\$ 825,00	US\$ 275,00

Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. **Cuadro comparativo de costos de operación y mantenimiento entre bomba de paletas y bomba de cavidades progresivas a un caudal de 1 750 m³/h**

Tipo de bomba	Paletas	Cavidades progresivas
Caudal (m ³ /h)	1 750,00	1 750,00
Costo inicial del equipo (FOB Puerto)	US\$ 15 000,00	US\$ 18 350,00
Flete del equipo (hasta la destilería)	US\$ 1 250,00	US\$ 750,00
Impuesto a pagar	US\$ 1 950,00	US\$ 2,292,00
Seguro de transporte	US\$ 182,00	US\$ 213,92
Obra civil	US\$ 750,00	US\$ 525,00
Costo de instalación	US\$ 225,00	US\$ 183,50
Costo de energía eléctrica por año	US\$ 32 619,74	US\$ 19 395,52
Mano de obra, mantenimiento por año	US\$ 16,38	US\$ 12,29

Continuación de la tabla XI.

Tipo de bomba	Paletas	Cavidades progresivas
Repuestos, mantenimiento por año	US\$ 1 250,00	US\$ 400,00

Fuente: elaboración propia.

2.6. Cálculo de valor presente neto (VPN), para comparación económica de los posibles equipos a ser instalados a diferentes caudales

Al concluir los análisis preliminares para cada una de las bombas analizadas en este estudio y para cada uno de los escenarios de caudal de melaza planteados en el mismo, se procedió a calcular el valor presente neto para cada una de las opciones, tomando como referencia un período de 5 años y como tasa de oportunidad la tasa de interés promedio ponderado del total de operaciones reportada por el Banco de Guatemala para marzo de 2008. A continuación se presentan los resultados obtenidos para estos cálculos.

Tabla XII. **Cuadro comparativo de VPN entre bomba de paletas y bomba de cavidades progresivas a un caudal de 575 m³/h**

Tipo de bomba	Paletas	Cavidades progresivas
Caudal (m ³ /h)	575.00	575.00
Año 0	US\$ 12 055,73	US\$ 16 904,02
Año 1	US\$ 13 990,60	US\$ 10 300,86
Año 2	US\$ 13 990,60	US\$ 10 300,86
Año 3	US\$ 13 990,60	US\$ 10 300,86

Continuación de la tabla XII.

Tipo de bomba	Cavidades progresivas	Paletas
Año 4	US\$ 13 990,60	US\$ 10 300,86
Año 5	US\$ 13 990,60	US\$ 10 300,86
VPN	US\$ 68 569,99	US\$ 58 513,76

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. **Cuadro comparativo de VPN entre bomba de paletas y bomba de cavidades progresivas a un caudal de 1 150 m³/h**

Tipo de bomba	Cavidades progresivas	Paletas
Caudal (m ³ /h)	1150,00	1150,00
Año 0	US\$ 14 808,75	US\$ 18 937,00
Año 1	US\$ 20 236,91	US\$ 13 511,51
Año 2	US\$ 20 236,91	US\$ 13 511,51
Año 3	US\$ 20 236,91	US\$ 13 511,51
Año 4	US\$ 20 236,91	US\$ 13 511,51
Año 5	US\$ 20 236,91	US\$ 13 511,51
VPN	US\$ 96 554,61	US\$ 73 515,98

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. **Cuadro comparativo de VPN entre bomba de paletas y bomba de cavidades progresivas a un caudal de 1750 m3/h**

Tipo de bomba	Cavidades progresivas	Paletas
Caudal (m3/h)	1750,00	1750,00
Año 0	US\$ 19 357,00	US\$ 22 314,42
Año 1	US\$ 33 886,13	US\$ 19 807,81
Año 2	US\$ 33 886,13	US\$ 19 807,81
Año 3	US\$ 33 886,13	US\$ 19 807,81
Año 4	US\$ 33 886,13	US\$ 19 807,81
Año 5	US\$ 33 886,13	US\$ 19 807,81
VPN	US\$ 156 238,12	US\$ 102 326,97

Fuente: elaboración propia.

3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Con la necesidad actual de reducir costos de operación para ser cada vez más competitivos en el mercado, no sólo es necesario realizar una evaluación técnica a la hora de instalar un nuevo equipo, sino también se necesita la evaluación económica, para evaluar el beneficio económico que traerá a la operación.

El principal objetivo de este trabajo es la comparación, tanto técnica como económica en dos opciones de equipos de bombeo de melaza, en la industria de producción de etanol, los cuales son: bomba de paletas y bomba de cavidades progresivas.

Tradicionalmente, se ha optado por utilizar bombas de cavidades progresivas para el manejo de líquidos viscosos en las industrias de azúcar y alcohol. Esto se debe al bajo costo inicial frente a una bomba de paletas.

El caso analizado es el de una destilería de alcohol etílico, con una capacidad nominal de 150 000 litros por día de producción de alcohol, lo cual demanda un consumo estimado de 575 m³/h de melaza para esta primera etapa. Está contemplado un crecimiento en dos etapas más, las cuales demandarán un estimado de 1 150 m³/h (total de melaza en segunda etapa), y 1 750 m³/h (total de melaza en tercera etapa), por lo que fue necesario comparar distintos diámetros de tubería para determinar el diámetro óptimo que soportará el trasiego de melaza para los distintos caudales mencionados anteriormente.

Con los caudales definidos y calculando el diámetro óptimo para el manejo de los tres caudales, se procedió a establecer la ruta óptima para la instalación de la tubería; los criterios fueron:

- a. Requerir menor trabajo, tanto de obra civil como electro-mecánico
- b. Que la caída de presión a lo largo de la tubería fuera menor

Tomando estos criterios se definió como ruta óptima la ruta 1 (ver tabla III); para esta ruta se requiere únicamente la fabricación de bancazos de soporte de tubería, ya que el 80 % del total de la línea (aproximadamente), será instalada a nivel de piso; en las áreas en la cual se enterrará la tubería, se utilizará un material aislante llamado *Tape Coat* (ver anexo 1), para protección de corrosión de la tubería; tomando como referencia los resultados de la tabla VI, se confirma que la ruta 1 es la que tiene menor caída de presión a lo largo de la misma, por lo que puede concluirse que en efecto es la mejor ruta, entre las dos posibilidades, para este sistema.

Una vez definida la ruta y calculada la caída de presión a lo largo de la misma, se procedió con la selección del equipo de bombeo para completar el sistema de trasiego de la bomba, solicitando la respectiva oferta técnica y económica a los fabricantes de las bombas previamente seleccionadas para el estudio; el análisis económico se basó únicamente en la comparación de los equipos de bombeo a utilizar, sea cual sea el equipo seleccionado, la ruta de tubería a utilizar será la misma, por lo que ésta no tendrá influencia en la comparación económica en este estudio.

Técnicamente, ambas ofertas cumplen con los requerimientos de equipos necesarios para el trasiego de melaza; además, cumplen con especificaciones de materiales solicitadas para la resistencia al ataque químico y de abrasión que pudiera ocasionar la melaza (ver tabla VII).

Concluida la comparación técnica, se procedió con la comparación económica, la cual se describe a continuación:

- a. Costo inicial del equipo: al comparar los precios *CIF* bodegas cliente de los equipos (*Cost, Insurance and Frieght*, lo cual significa que el precio dado por el proveedor incluye el costo del equipo, seguro de transporte y flete, con todos los gastos de nacionalización del equipo, desde la bodega del fabricante hasta la bodega del cliente), la bomba de cavidades progresivas es más económica que la bomba de paletas, con lo siguientes porcentajes de diferencia:
 - Bomba de cavidades progresiva 30 % más económica que bomba de paletas, para un caudal de 575 m³/h (ver tabla IX).
 - Bomba de cavidades progresiva 23 % más económica que bomba de paletas, para un caudal de 1 150 m³/h (ver tabla X).
 - Bomba de cavidades progresiva 15 % más económica que bomba de paletas, para un caudal de 1 750 m³/h (ver tabla XI).

- b. Obra civil: debido a la mejora tecnológica con la que cuenta la bomba de paletas al compararla con la bomba de cavidades progresivas, el tamaño y peso de la bomba de paletas se reduce, manteniendo la misma eficiencia en la operación; con la reducción de tamaño y peso, también se reduce los requerimientos de obra civil para la fabricación de la base, lo cual representa un ahorro en el costo inicial de equipo ya instalado en el sitio.

- c. Consumo de energía: al contar las bombas de paletas con un motor de menor caballaje, sin que esto afecte el rendimiento de la bomba, el consumo de energía eléctrica en el tiempo de operación establecido es menor, lo cual represente un ahorro en la operación anual del equipo.

- d. Mantenimiento: la frecuencia de mantenimiento para las bombas de cavidades progresivas es mayor que el de las bombas de paletas; esto se debe primordialmente al hecho que el elastómero que está en contacto con el rotor de acero inoxidable para impulsar la melaza, se encuentra sometido por lo general a fricción constante provocado tanto por el rotor como por la melaza que circula en la bomba, generando también altas temperaturas en la operativa normal de la bomba, lo cual podría provocar deformaciones en el elastómero y una pérdida en el rendimiento en la operación de las mismas. El proveedor sugiere contar con 2 bombas para no retrasar la operación, pero esto incrementa los costos iniciales del proyecto, por lo que esta opción fue rechazada. Esto obliga a que las bombas tengan que pararse para mantenimiento preventivo un período de 8 horas una vez por zafra, mientras que las bombas de paletas deben pararse únicamente 6 horas una vez por zafra.

- e. Repuestos: por razones similares indicadas en el párrafo anterior, para la bomba de cavidades progresivas anualmente es necesario reemplazar el elastómero completo, mientras que para el caso de la bomba de paletas, simplemente es necesario cambiar las paletas dañadas, si encaso hubiese alguna; de acuerdo con la experiencia del proveedor y referencia de clientes que actualmente utilizan este tipo de bombas, se estima que anualmente se deben cambiar de 5 a 6 paletas anuales, lo cual representa un ahorro anual de mantenimiento en comparación con la bomba de cavidades progresivas.

Una vez concluida la comparación económica entre ambos equipos evaluados, se procedió a un análisis de valor presente neto (VPN), para un período de 5 años, tomando como tasa de oportunidad la tasa de interés promedio ponderado del total de operaciones, reportada por el Banco de Guatemala para marzo 2008.

Al comprar los resultados obtenidos en estas evaluaciones (ver tablas XII, XIII y XIV), se concluye que la mejor bomba para completar el sistema de bombeo de melaza, es la bomba de paletas, ya que para los tres casos evaluados (distintos caudales), el VPN es menor y técnicamente ambos tipos de equipos cumplen con las especificaciones definidas.

CONCLUSIONES

1. La ruta uno es la mejor ruta de las opciones evaluadas, para el trasiego de melaza por facilidad de instalación, menor costo de instalación y menor caída de presión para los distintos diámetros evaluados a diferentes caudales.
2. El diámetro óptimo para el trasiego de melaza, tomando en cuenta las tres fases de construcción de la destilería, es de 8 pulgadas, ya que para un caudal futuro de 1 750 m³/h, con este diámetro de tubería la velocidad del fluido es de 0,0635 m/s, menor a la establecida como límite en la fase de diseño de construcción de destilería (1,5 m/s); ver apéndice 1.
3. El mejor equipo de bombeo para el caso analizado es la bomba de paletas, obteniendo con ella un menor costo operativo a lo largo de su vida útil y manteniendo la eficiencia en la operación de la misma que una bomba de cavidades progresivas.

RECOMENDACIÓN

1. Tomar como referencia este trabajo de graduación para futuras evaluaciones técnico-económicas antes de decidir la compra de un equipo nuevo.

BIBLIOGRAFÍA

1. BLACKMER Pumps. *Bomba de paletas*. [en línea]. <<http://www.blackmer.com/vane-hxl.jsp>>. [Consulta: junio de 2007].
2. FACIOLINCE, Andrea. *Flujo laminar*. [en línea]. <<http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articulosos/conceptosbasicosmfluidos/flujolaminar/flujolaminar.html>>. [Consulta: julio de 2007].
3. FACIOLINCE, Andrea. *Flujo turbulento*. [en línea]. <<http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articulosos/conceptosbasicosmfluidos/flujoturbulento/flujoturbulento.html>>. [Consulta: julio de 2007].
4. GEANKOPLIS, Christie J. *Procesos de transporte y operaciones unitarias*. 2a ed., México: Continental, 1995. 831 p.
5. JACQUES, K, et al. *The alcohol text book*. 3a ed., United Kingdom: Nottingham University Press, 1999. 346 p.
6. McNAUGHTON, Kenneth. *Bombas: selección, uso y mantenimiento*. México: McGraw-Hill, 1992. 373 p.

7. NETZSCH USA. *Bomba de cavidades progresivas*. [en línea]. <http://www.netzschusa.com/NemoPump/sy_series.htm>. [Consulta: junio de 2007].
8. PERRY, Robert H. *Manual del Ingeniero Químico*. 6a ed. México: McGraw-Hill, 1992. Tomo I.
9. PROINDEC, S. A. *Bomba de desplazamiento positivo*. [en línea]. <<http://www.proindecsa.com/news.htm>>. [Consulta: julio de 2007].
10. SUGAR Tech. *Densidad de la melaza*. [en línea]. <<http://www.sugartech.com/definiciones/indes.php>>. [Consulta: mayo de 2007].
11. SULZER Process Pumps. *Bombas centrífugas*. [en línea]. <<http://www.sulzerpumps.com/desktopdefault.aspx/tabid-169/>>. [Consulta: junio de 2007].

APÉNDICE

Apéndice 1. **Cálculo de velocidad por diámetro de tubería a diferentes caudales de melaza.**

Tabla I. **Velocidad de fluido en la tubería para distintos diámetro a diferentes caudales**

Caudal (m³/h)	Diámetro de tubería (plg)	Velocidad (m/s)
575,00	8,00	0,0209
575,00	10,00	0,0167
575,00	12,00	0,0139
575,00	14,00	0,0119
575,00	16,00	0,0104
1 150,00	8,00	0,0417
1 150,00	10,00	0,0334
1 150,00	12,00	0,0278
1 150,00	14,00	0,0238
1 150,00	16,00	0,0209
1 750,00	8,00	0,0635
1 750,00	10,00	0,0508
1 750,00	12,00	0,0423
1 750,00	14,00	0,0363
1 750,00	16,00	0,0317

Fuente: elaboración propia.

ANEXO

Anexo 1. Hoja técnica de cinta para aislamiento de corrosión de tuberías enterradas.



TAPECOAT® GRAY COATINGS

Tapecoat Gray coatings are innovative cold applied tapes that exceed all previous

Protect Pipeline and Infrastructure from Corrosion

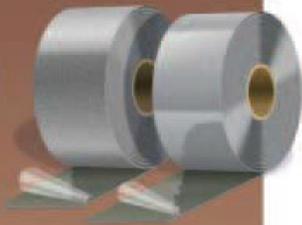
performance criteria for the protection from corrosion of above and below ground pipelines, joints and fittings. Tapecoat incorporates a patented integrated primer into these protective tapes and eliminated the dangers of emissions and hazardous waste associated with the application of liquid primers. Tapecoat Gray can be applied over a wide range of ambient temperatures for the protection of most metal surfaces.

ISO 9001 Certified

Release Liner
Integrated Primer
Adhesive
Backing

Tapecoat H35/H50 Gray
Durable cold-applied tape protection for above and below ground pipeline. Tapecoat Gray tapes incorporate an integrated primer and a specially formulated adhesive and an MAF® film back.

Tapecoat M50 RC
Heavy-duty Tapecoat Gray tape coating with a tough durable soil stress-resistant polypropylene mesh backing for reconditioning below ground pipeline.



TAPECOAT

Continuación anexo 1.

Tapecoat® Gray Corrosion Protection

Integrated Primer:

- replaces flammable and hazardous liquid primers
- eliminates VOC emissions
- eliminates dangers of a toxic material spill
- eliminates need to dispose of hazardous wastes
- labor-saving application
- aggressive tack gives consistent application
- successfully tested by independent labs

Adhesive Coating:

- aggressive bond to steel and other metal substrates
- cohesive strength as well as flexibility
- excellent resistance to cathodic disbondment

MAF® Backing: (H35 Gray or H50 Gray)

- pulls tight around fittings and irregular shapes
- formulated for durability
- thermally stable
- abrasion resistant
- UV resistant

Polypropylene Mesh Backing: (M50 RC Gray or Black)

- added durability to resist soil stress
- impact and abrasion resistant
- thermally stable

Features/Specifications/Application

Tapecoat H35 Gray* Tapecoat H50 Gray*

Cold-applied above and below ground coating in tape form with an integrated primer.

Composition

Tapecoat H35 Gray and Tapecoat H50 Gray are composed of a Gray specially formulated MAF® backing with a synthetic elastomeric adhesive. Impregnated into the adhesive is an integrated primer.

Technical Data

Color:	Gray
Shelf life:	Rotate stock yearly
Standards:	AWWA C-209
Recommended for use with:	Coal Tar, Extruded Polyethylene, FBE, 3 Layer Systems, Coal Tar and Urethane Plant Coatings
Low temp flex:	Excellent
Bacteria resistance:	Excellent
Thickness:	H35 35 ± 2 mils H50 50 ± 2 mils
Tests:	ASTM D1737, ASTM G22, ASTM D1000, ASTM G8

Surface Preparation

Surface must be clean and dry. SSPC-SP3 Power Tool Cleaning is recommended to remove any loose rust and scale, dust or dirt. A "Tack Cloth" for removal of fine dust particles is provided in each carton. Oil, grease and all other residue are to be removed from pipe surface per SSPC-SP1 Solvent Cleaning. SSPC-SP6 Commercial Blast Cleaning is optional.

Option

If the application is taking place in extreme cold (below 32°F/0°C) a liquid primer will enhance the immediate bond. TC Omniprime is the compatible primer for use with these products.

Tape Application

- Spiral Wrap: Tapecoat H35 Gray and Tapecoat H50 Gray are hand applied by removing the release liner and spirally wrapping in a single thickness with a continuous overlap of tape. Tension in wrapping should be enough to obtain conformability to the surface being coated.
- Cigarette Wrap: Pre-cut strips of Tapecoat H35 Gray or Tapecoat H50 Gray to a length equal to the circumference of the pipe plus a minimum of 4". Follow general tape applications described above.

Option: Tape wrapping machines available upon request.

Also available: Tapecoat 6025 cold-applied coating in tape form for use in high temperature pipeline service. TC 7010 Fast Set Gray Epoxy, TC 7000, TC 7100, TC 7030, and Epoxy Mastic high-build coating for welded joints. Tapecoat T-Tape Gray PE cold-applied coating for difficult to wrap areas. See individual product sheets or our website at tapecoat.com for more information.

Tapecoat M50 RC*

Heavy duty below ground pipeline recoating material in tape form with an integrated primer.

Composition

Tapecoat M50 RC is a pre-formed, cold-applied coating. The adhesive is manufactured from specially formulated elastomer and resins bonded to a woven highly puncture-resistant polymer. Impregnated into the adhesive is an integrated primer.

Technical Data

Color:	Gray or Black
Shelf life:	Rotate stock yearly
Standards:	AWWA C-209
Recommended for use with:	Coal Tar, Extruded Polyethylene, FBE, 3 Layer Systems, Coal Tar and Urethane Plant Coatings
Low temp flex:	Excellent
Bacteria resistance:	Excellent
Thickness:	50 ± 2 mils
Tests:	ASTM D1737, ASTM G22, ASTM D1000, ASTM G8

Surface Preparation

Surface must be clean and dry. SSPC-SP3 Power Tool Cleaning is recommended to remove any loose rust and scale, dust or dirt. A "Tack Cloth" for removal of fine dust particles is provided in each carton. Oil, grease and all other residue are to be removed from pipe surface per SSPC-SP1 Solvent Cleaning. SSPC-SP6 Commercial Blast Cleaning is optional.

Option

If the application is taking place in extreme cold (below 32°F/0°C) a liquid primer will enhance the immediate bond. TC Omniprime is the compatible primer for use with these products.

Tape Application

- Spiral Wrap: Tapecoat M50 RC is hand applied by removing the release liner and spirally wrapping in a single thickness with a continuous overlap of tape. Tension in wrapping should be enough to obtain conformability to the surface being coated.
- Cigarette Wrap: Pre-cut strips of Tapecoat M50 RC to a length equal to the circumference of the pipe plus a minimum of 4". Follow general tape applications above.

Option: Tape wrapping machines available upon request.

PO Box 631, Evanston, IL 60204-0631 • 1527 Lyons St. Evanston, IL 60201-3551 USA
800/758-6041 847/866-8500 Fax: 800/332-8273 Fax: 847/866-8596 www.tapecoat.com

Fuente: información técnica entregada por proveedor de Tapecoat.