

308917

2



UNIVERSIDAD PANAMERICANA

ESCUELA DE INGENIERIA

CON ESTUDIOS INCORPORADOS A LA
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**“DISEÑO DE UNA LÍNEA DE PRODUCCIÓN DE BOTELLAS DE PET PARA
REFRESCOS”**

T É S I S P R O F E S I O N A L
P A R A O B T E N E R E L T Í T U L O D E :
I N G E N I E R O M E C Á N I C O E L E C T R I C I S T A

A R E A : I N G E N I E R Í A M E C Á N I C A

P R E S E N T A N :

P E D R O / A M A D O R L A N D A

E D U A R D O B A R R E D O P R I E T O

A L F R E D O L E G O R R E T A B A S U R T O

B E N J A M I N A R I E L R O B L E S M I T R E

J O S É L U I S V I Ñ O L A S G O N Z Á L E Z

DIRECTOR DE TESIS: M.I. LEOPOLDO A. GONZÁLEZ GONZÁLEZ

MÉXICO, D.F.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

2002



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.

Agradecimientos

A Dios.

Por darme la fuerza de voluntad para terminar lo que un día empecé.

A mis Padres.

Por su ejemplo y por el gran esfuerzo que realizaron al darme la mejor herramienta que un hombre puede poseer: una Buena Educación Universitaria.

A Adriana mi Esposa

Quien además de su amor me ha brindado un gran apoyo moral para la realización de este trabajo.

A Andrea mi Hija.

Quien desde su nacimiento me motiva día a día a ser mejor.

A mi Hermana, Cuñado y Sobrinos.
Por sus constantes palabras de aliento.

A la Universidad Panamericana.
Por preocuparse en formar profesionales con valores.

A mis Profesores.
Por haber compartido conmigo sus valiosos conocimientos.

A mis Compañeros de Tesis.
Por su gran trabajo y dedicación.

Al M.I. Leopoldo González.
Por su valiosa colaboración para la realización de esta tesis.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

Pedro Amador Landa

Dedicatorias

A mi papá y mi mamá,
Por su cariño, apoyo y confianza que siempre me han dado

A Luis Eduardo,
Porque me has motivado a ser mejor y porque te quiero mucho

A Beba, Nono y Silvia
Porque sé que siempre han estado conmigo

A Xavier, Janel y Eduardo
Por su amistad, sus bromas y todos los momentos que hemos pasado juntos

A mis compañeros de Tesis
Por su paciencia y dedicación

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

Eduardo Barredo Prieto

Agradecimientos y dedicatorias:

A Dios por su infinita bondad.

A mi papá, C.P. Alfredo Legorreta Betancourt,
porque desde el cielo nos bendice y acompaña en todo momento.

A mi mamá, Maczabfalda Basurto de Legorreta,
por todo su amor, apoyo y comprensión incondicional.

A mi hermana, Beatriz Legorreta Basurto,
por su confianza y por todos los momentos que compartimos juntos.

A mi sobrina, Jéssica Viñolas Legorreta,
a quien quiero mucho y deseo lo mejor en la vida.

A mi esposa Alejandra Espinoza Celis,
por haber llegado a mi vida y darme todo su amor.

A la Universidad Panamericana por la formación que me otorgó.

A mis compañeros en este trabajo:
Pedro, Eduardo, José Luis y Benjamín.

A nuestro Director de Tesis, M.I. Leopoldo A. González González,
por su apoyo en la realización de este trabajo.

A mis profesores, personal administrativo y compañeros de la Universidad.

A mi familia, compañeros de trabajo y amigos.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Alfredo Legorreta Basurto

Aprovecho este trabajo, para expresar mi agradecimiento.

A ti mamá, que no solo me diste la vida y todo tu amor, sino tu ejemplo que me ha ayudado a ser quien hoy soy. A ti papá, que me has apoyado siempre en todo, y además me diste la oportunidad de la gran educación que me heredaste, que es con lo que me enfrento al mundo. A ti María Elena que siempre has sido mi compañera, además de ser mi ejemplo de cómo enfrentar a la vida con entereza. A ti Angélica que eres en muchas cosas como mi otro yo, tu firmeza, tu dedicación y tu pasión por vivir me hacen esforzarme mas cada día. A ti Andrés que me das alegría para vivir. A ti Héctor por todo el apoyo que siempre nos has dado. A ti Jorge que tu ejemplo me hace, aún después de mucho tiempo, terminar este proyecto. A todos ustedes que son una lista interminable de personas que me quieren y me han aceptado tal como soy. A ti que eres y seguirás siendo inspiración y luz de mi vida. A Leopoldo, Eduardo, José Luis, Pedro, Alfredo y Karla, por que sin ustedes no hubiera logrado este sueño. Finalmente, a ti Padre, que me diste la gracia de ser Tu hijo, y que gracias a Ti tengo he podido vivir una vida llena de dones en la cual he disfrutado de tantas cosas que agradecer.

Benjamín Robles Mitre

Agradezco

A Dios por permitirme existir.

A mis padres José y Laura por su cariño y apoyo.

A mis hermanos.

A mi esposa Beatríz e hija Jéssica.

Al Dr. Salvador Aburto M.

A mis profesores.

A mi director de tesis Ing. Leopoldo González G.

A Ing. Karla Rivera por su apoyo.

A mis compañeros de tesis.

José Luis Viñolas González

Índice

Introducción.	4
Capítulo 1 Antecedentes y situación actual.	7
1.1. Antecedentes.	7
1.2. Situación actual.	14
Capítulo 2 Marco teórico.	21
2.1. El PET.	21
2.1.1. El PET como materia prima.	21
2.1.2. Estructura molecular.	23
2.1.3. Obtención.	24
2.1.4. Grados de PET.	29
2.1.5. Propiedades del PET grado botella.	29
2.1.5.1. Densidad.	30
2.1.5.2. Propiedades mecánicas.	31
2.1.5.3. Apariencia física.	32
2.1.5.4. Barrera a gases o permeabilidad.	33
2.1.5.5. Propiedades térmicas.	35
2.1.5.6. Resistencia química.	37
2.2. Desarrollo del mercado para las botellas de PET.	38
2.2.1. Situación mundial.	38
2.2.2. Situación nacional.	39
2.3. Sistemas.	42
2.3.1. Sistemas de Soplado.	42
2.3.1.1. Introducción.	42
2.3.1.2. Inyección soplado biorientado del PET.	43
Ventajas del proceso de inyección soplado biorientado.	44
2.3.1.3. Condiciones de operación.	47
Inyección de la preforma.	47
Recalentamiento y biorientación de preformas.	49
2.3.1.4. Molde de soplado.	50
2.3.1.5. Equipos adicionales.	50
2.3.1.6. Parámetros de selección.	51
2.3.2. Compresores de alta presión.	52
2.3.2.1. Generalidades.	52
2.3.2.2. Clasificación de compresores.	53
Compresores de desplazamiento positivo.	53
Compresores dinámicos.	53
2.3.2.3. Criterios para seleccionar un compresor.	54
2.3.2.4. Compresores reciprocantes.	55
Regulación de los compresores reciprocantes.	57
2.3.2.5. Selección del sistema más adecuado.	60
2.3.2.6. Consideraciones especiales para el cálculo de un compresor.	62
2.3.2.7. Selección del tipo de compresor más adecuado.	63
2.3.3. Sistemas de enfriamiento y acondicionamiento térmico en la industria de la transformación del plástico.	63
2.3.3.1. Introducción.	63
2.3.3.2. Parámetros a considerar en la selección de un sistema de enfriamiento.	64
2.3.3.3. Torres de enfriamiento.	66
Clasificación de las torres de enfriamiento.	69

Criterio de selección de una torre de enfriamiento.	71
2.3.3.4. Chillers.	71
Tipos de chillers.	73
Métodos de selección de un chiller.	73
2.3.3.5. Termorreguladores.	76
Principales tipos de termorreguladores.	76
Capítulo 3 Cálculo y selección de componentes.	80
3.1. Cálculo y selección del sistema de soplado.	80
3.1.1. Introducción.	80
3.1.2. Cálculo de la sopladora.	80
3.1.3. Selección del modelo de la sopladora.	81
3.2. Cálculo de requerimiento de caudal de aire y selección del compresor de alta presión.	84
3.2.1. Introducción.	84
3.2.2. Cálculo de requerimiento de caudal efectivo.	84
3.2.3. Selección del compresor.	90
3.3. Selección del sistema de enfriamiento para el compresor de aire.	90
3.4. Sistema de enfriamiento de moldes.	92
3.4.1. Cálculo de la capacidad del chiller.	93
3.5. Equipos Periféricos.	97
3.5.1. Transportadores neumáticos.	98
3.5.2. Paletizador de botellas.	99
3.5.3. Envolvedor de pallets.	100
Capítulo 4 Propuesta de diseño de la línea.	102
4.1. Distribución de la planta.	102
4.1.1. Sala de soplado.	102
4.1.2. Sala de compresor.	104
4.1.3. Mezanine para torre de enfriamiento.	104
4.1.4. Cisterna.	104
4.1.5. Área de chiller.	105
4.1.6. Zona de paletizado de botellas y envoltura de pallets.	105
4.2. Cálculo de tuberías de aire a alta presión.	110
4.2.1. Materiales de las tuberías.	111
4.2.2. Cálculo del diámetro de la tubería.	112
4.3. Diseño de la red de tubería de suministro de agua para los equipos de enfriamiento y selección de las bombas.	116
4.3.1. Generalidades.	116
4.3.2. Red de tubería de circulación de agua de la torre de enfriamiento para el compresor de aire.	124
4.3.2.1. Generalidades.	124
4.3.2.2. Selección de la tubería y accesorios.	125
4.3.2.3. Selección de la bomba centrífuga.	127
Comprobación del NPSH disponible.	132
4.3.2.4. Cisterna.	134
4.3.3. Red de tubería de circulación de agua del chiller para enfriamiento de la sopladora.	134
4.3.3.1 Generalidades.	134
4.3.3.2. Selección de la tubería y accesorios.	135
4.3.3.3. Bomba centrífuga del chiller.	137
Capítulo 5 Análisis costo beneficio.	138
5.1. Análisis de costos.	138
5.2. Análisis operativo.	142

5.2.1. Generalidades.	142
5.2.2. Mano de obra.	143
5.2.3. Manejo de Materiales.	146
5.2.4. Mantenimiento.	147
5.3 Análisis Financiero.	150
5.3.1. Introducción.	150
5.3.2. Consideraciones para el análisis.	150
5.3.2.1. Cálculo de la producción anual.	150
5.3.2.2. Cálculo de consumo eléctrico.	152
5.3.3. Resultados del análisis financiero.	153
Conclusiones.	155
Bibliografía.	157

Introducción.

El uso del PET (**Tereftalato de Polietileno**) como un material para la fabricación de botellas para bebidas se inició en los últimos años de la década de los setenta, sin embargo, no fue sino hasta el inicio de los años noventa cuando su uso tuvo un crecimiento realmente acelerado al desarrollarse una resina con excelentes propiedades de barrera al CO₂ que permitió que dichas botellas pudieran utilizarse para el embotellado de bebidas gasificadas, mejor conocidas como refrescos.

En México, el embotellado de refrescos en envases de PET se inició en 1993, cuando el embotellador líder del mercado nacional lanzó la presentación de 1.5 l no retornable. Dada la conveniencia que el envase de PET ofrece a los consumidores, dicho lanzamiento tuvo un éxito rotundo, por lo que el resto de los embotelladores iniciaron también el embotellado en ese tipo de envase. Muy pronto se lanzaron también otras presentaciones en botella de PET, tanto familiares como de consumo personal, que rápidamente han ido desplazando del mercado a sus similares en botella de vidrio, a tal grado que hoy en día la participación de mercado de los productos en PET es de aproximadamente un 60%, mientras que las de los productos de vidrio y lata son de 35% y 5% respectivamente.

Dentro de los embotelladores importantes en el mercado nacional que en la actualidad tienen altas ventas en presentaciones de PET, se encuentra un grupo embotellador de aguas minerales a quien en lo sucesivo nos referiremos como la Compañía Embotelladora.

La Compañía Embotelladora cuenta con tres plantas, de las cuales la más importante se localiza en la Ciudad de Tehuacán, Puebla. Dicha planta cuenta con tres líneas de embotellado en envases de PET, para las cuales actualmente se compra el 100% de las botellas a dos proveedores que se encuentran a 300 Km. de la planta. El costo de la botella, por tanto, tiene un componente importante relacionado con el flete. Adicionalmente al costo, se requieren grandes áreas para su almacenaje y manejo.

Este trabajo tiene como objetivo presentar la propuesta de diseño de una línea de producción de botellas de PET para satisfacer la demanda de una de las líneas de embotellado de la planta. Con ello se pretende reducir significativamente el costo de la botella utilizada, asegurar el abasto de la misma y optimizar las áreas de almacenaje para empaques en la planta, mediante la sustitución de compra de botella por producción de la misma con equipos propios localizados en planta.

Para lograr lo anterior, el trabajo presenta el siguiente contenido:

En el Capítulo 1 se presentan los antecedentes que llevaron a la planta más importante de la Compañía Embotelladora a adaptar tres de sus líneas de producción de refrescos en vidrio para producir en ellas refrescos en botella de PET, así como de las consecuencias que dicha medida provocó en la operación de la planta.

En el Capítulo 2 se presenta el marco teórico general sobre el PET, en el que se hará especial énfasis en las propiedades que lo hacen ideal para la fabricación de botellas para refrescos. De igual manera se presenta un marco teórico de los diferentes procesos de fabricación de botellas de PET, así como de los equipos y componentes principales de una línea de producción de botellas, lo que permitirá contar con elementos para la selección de los mejores equipos para la propuesta de diseño de la línea.

En el Capítulo 3 se presentan los cálculos y selección de todos y cada uno de los equipos con que contará la línea de producción de botellas y se definirán los modelos comerciales que se propone adquirir.

En el Capítulo 4 se presenta el diseño del *layout* de la línea y el diseño del sistema de tuberías para la alimentación del aire a presión y fluido de enfriamiento, tanto para el compresor de alta presión como para los moldes de la sopladora.

En el Capítulo 5 se presenta el análisis económico, operativo y financiero que permitirá saber si realmente la línea propuesta tendrá los beneficios financieros y operativos esperados. También se obtendrán los elementos para decidir si se construye o no la línea de soplado de botellas de PET en la planta.

Finalmente se presentan las conclusiones sobre el presente trabajo.

Capítulo 1 Antecedentes y situación actual.

1.1. Antecedentes.

La Compañía Embotelladora contaba hasta 1993 con 5 líneas para la producción de refrescos en botella de vidrio retornable y no retornable en su planta de Tehuacán, Puebla. Dicha planta es la más importante de la Compañía Embotelladora, cuyo principal producto es el agua mineral tanto natural como saborizada. Con su producción se abastece a los siguientes estados de la República Mexicana: Distrito Federal, Estado de México, Morelos, Guerrero, Hidalgo, Puebla, Veracruz, Tabasco, Quintana Roo, Campeche, Chiapas y Oaxaca.

Debido a la introducción en México de la botella de PET para el embotellado de refrescos no retornables, realizada por el grupo embotellador líder en el mercado nacional y debido también a la gran aceptación que dicho envase tuvo por parte de los consumidores, en 1994 la Compañía Embotelladora tuvo que reaccionar a las tendencias del mercado adaptando una de sus líneas de embotellado para producir en ella refrescos en botellas de PET.

Con este fin se decidió transformar la línea de menor producción, invirtiendo en ella lo mínimo indispensable para embotellar en envases de PET. Con ello se buscaba por un lado explorar un nuevo nicho de mercado y por el otro dejar la línea en condiciones de volver a manejar los envases de vidrio, si el proyecto del embotellado en PET fracasaba.

La figura 1.1 muestra la distribución original de la línea para botellas de vidrio que fue adaptada para la producción de refrescos en botellas de PET.

La adaptación se enfocó básicamente en los conceptos contenidos en la tabla 1.1

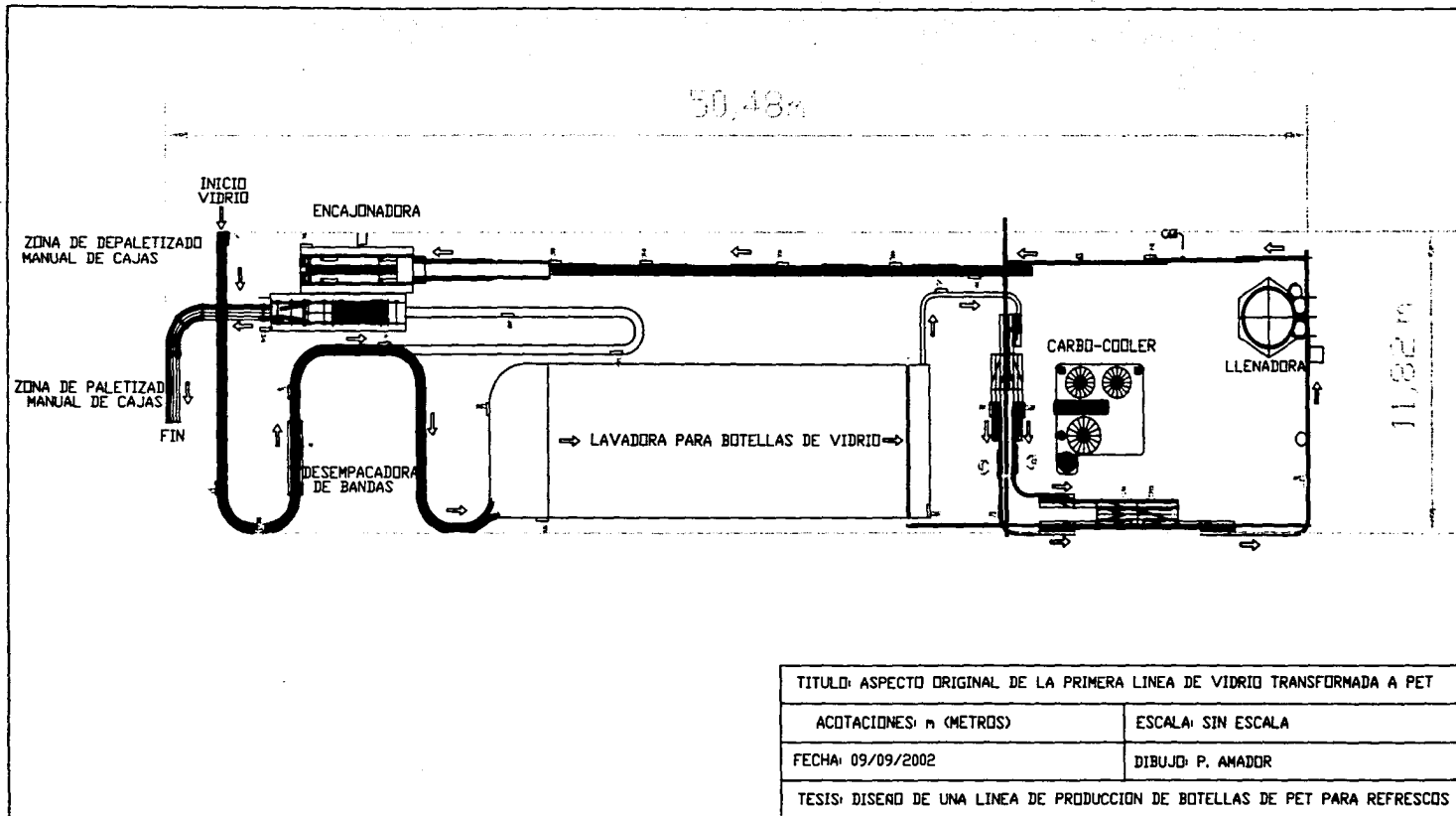


Figura 1.1 Aspecto Original de la Primera Línea de Embotellado en Vidrio Transformada a PET

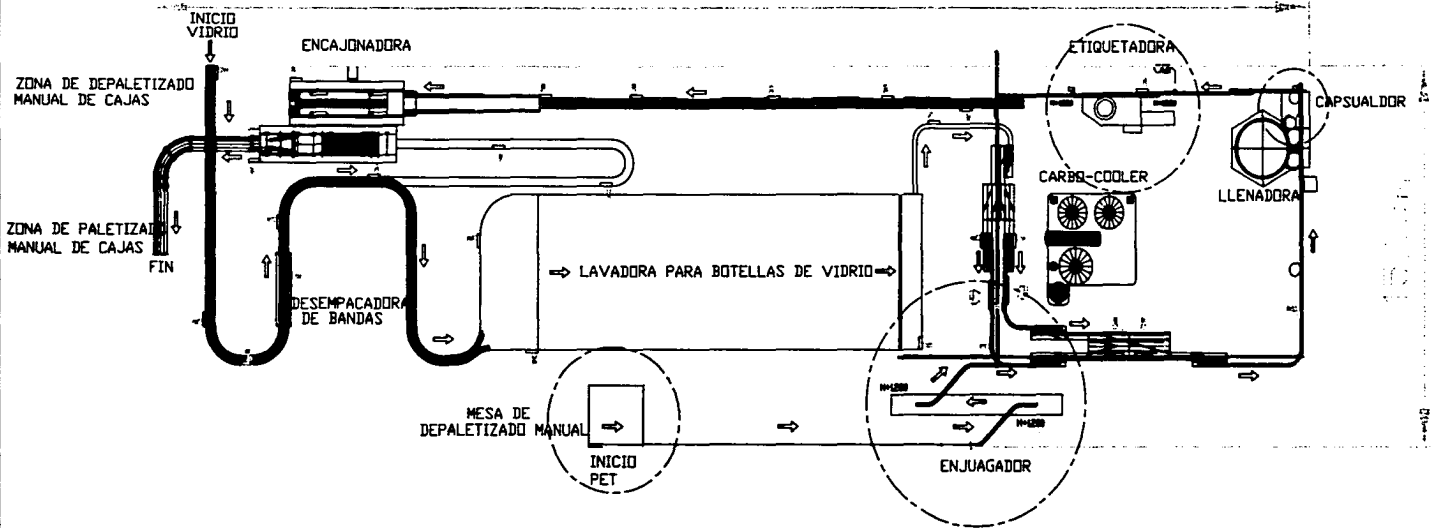
CONCEPTO	OBJETIVO
Construcción de una mesa de depaletizado manual de botellas de PET.	Dotar a la línea de un sistema para la alimentación de botellas de PET vacías.
Adquisición de un enjuagador lineal para botellas de PET.	Dotar a la línea de un sistema de lavado de botellas de PET con solución clorada.
Modificaciones a la llenadora.	Adaptar la llenadora para el manejo adecuado de botellas PET.
Adquisición de capsulador.	Dotar a la línea de un sistema posicionador de tapa-rosca de plástico para botellas de PET.
Adquisición de etiquetadora.	Dotar a la línea de una sistema automático de colocación de etiquetas.
Adquisición de manejos para encajadora.	Dar posibilidad al equipo existente de encajado de manejar un nuevo formato de botella.

Tabla 1.1 Modificación a línea de vidrio.

En la figura 1.2 se puede apreciar la forma en que fue adaptada la primera línea de PET en la planta.

El proyecto inició produciendo en la línea adaptada únicamente el formato de 1.5 l, cuyo empaque se realizaba en cajas de plástico para 12 botellas. Con este formato, la línea trabajaba a una velocidad de 100 bpm (botellas por minuto). Dado que se trataba de una botella alta y delgada, su manejo en los transportadores de cadena metálica diseñados para botellas de vidrio era complicado, teniéndose un gran número de caídas de botella, con lo que la eficiencia de la línea difícilmente rebasaba el 60% aun contando con personas dedicadas únicamente a levantar las botellas que caían.

50,8 m



TITULO: PRIMERA LINEA DE PRODD. EN VIDRIO MODIFICADA PARA PRODUCTOS EN PET	
ACOTACIONES: m (METROS)	ESCALA: SIN ESCALA
FECHA: 09/09/2002	DIBUJO: P. AMADOR
TESIS: DISEÑO DE UNA LINEA DE PRODUCCION DE BOTELLAS DE PET PARA REFRESCOS	

Figura 1.2 Primera Línea de Productos en Vidrio Modificada para Productos en PET

La introducción al mercado de la nueva presentación en botellas de PET realizada por la Compañía Embotelladora tuvo tanto éxito, que comenzó a desplazar del mercado a la presentación de 720 ml de vidrio, provocando que antes de 18 meses la producción de la línea de PET dejara de ser suficiente para abastecer la demanda, no obstante que se operaba durante 3 turnos los siete días de la semana.

En 1995 el embotellador líder del mercado introdujo la presentación de 500 ml en botella de PET, lo que aumentó la demanda de este tipo de botella, forzando a la Compañía Embotelladora en ese mismo año a tomar la decisión de transformar dos líneas más, pues gradualmente las presentaciones personales en vidrio de 500 ml y 355 ml empezaron a reducir también su participación en el mercado. Una de estas líneas sería dedicada a la producción del formato de 1.5 l, operando a una velocidad de 150 bpm y la otra a la producción del formato de 500 ml operando a una velocidad de 300 bpm. Para estas líneas el sistema de alimentación de botellas siguió siendo manual, sin embargo se utilizó la tecnología del transportador neumático para el manejo de la botella vacía y en lugar de utilizar cajas de plástico como empaque secundario, se utilizó una charola de cartón y envoltura de película plástica termoencogible. Por seguir manejando la alimentación manual de botella, la eficiencia de operación no pudo superar el 70%.

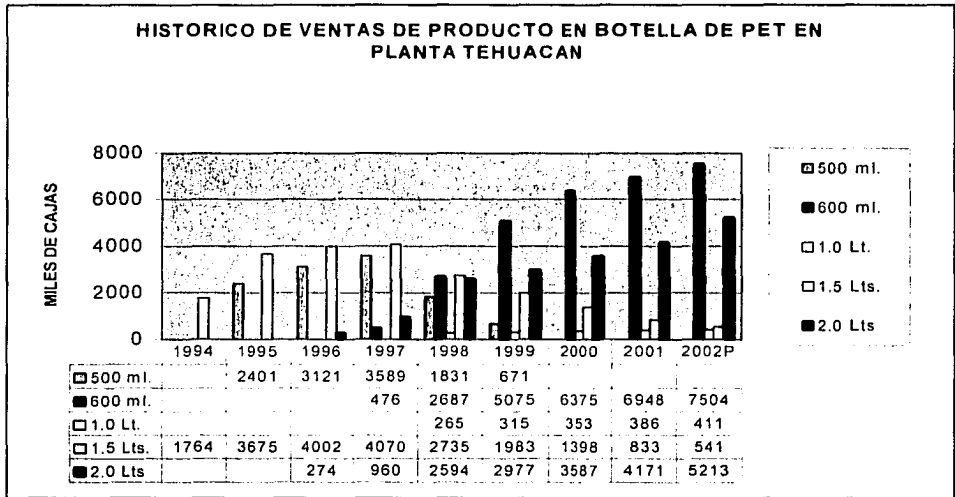
La creciente demanda de los refrescos en botella de PET ha exigido elevar la eficiencia de operación, por lo que las tres líneas debieron modificarse invirtiendo en sistemas de alimentación de botella automáticos llamados depaletizadores y en la reestructuración de los transportadores tanto de botella vacía como llena para generar acumulaciones adecuadas entre los equipos. Al día de hoy las tres líneas trabajan con eficiencias que fluctúan entre el 80% y 85%, eficiencia bastante aceptable cuando se trabaja con llenadoras adaptadas de botella de vidrio a botella de PET.

La demanda ha provocado también que los equipos de llenado de mayor capacidad con los que cuenta la planta, hayan sido adaptados para el manejo de botellas de PET, mientras que los equipos de menor capacidad trabajan ahora en las líneas de botella de

vidrio. Por otro lado, ha sido también necesario reducir el costo de empaque secundario, adquiriendo equipos para la formación de paquetes formados únicamente con película plástica termoencogible.

La figura 1.3 muestra un comparativo del arreglo actual de la primera línea que fue adaptada para producir PET contra su primera fase de adaptación.

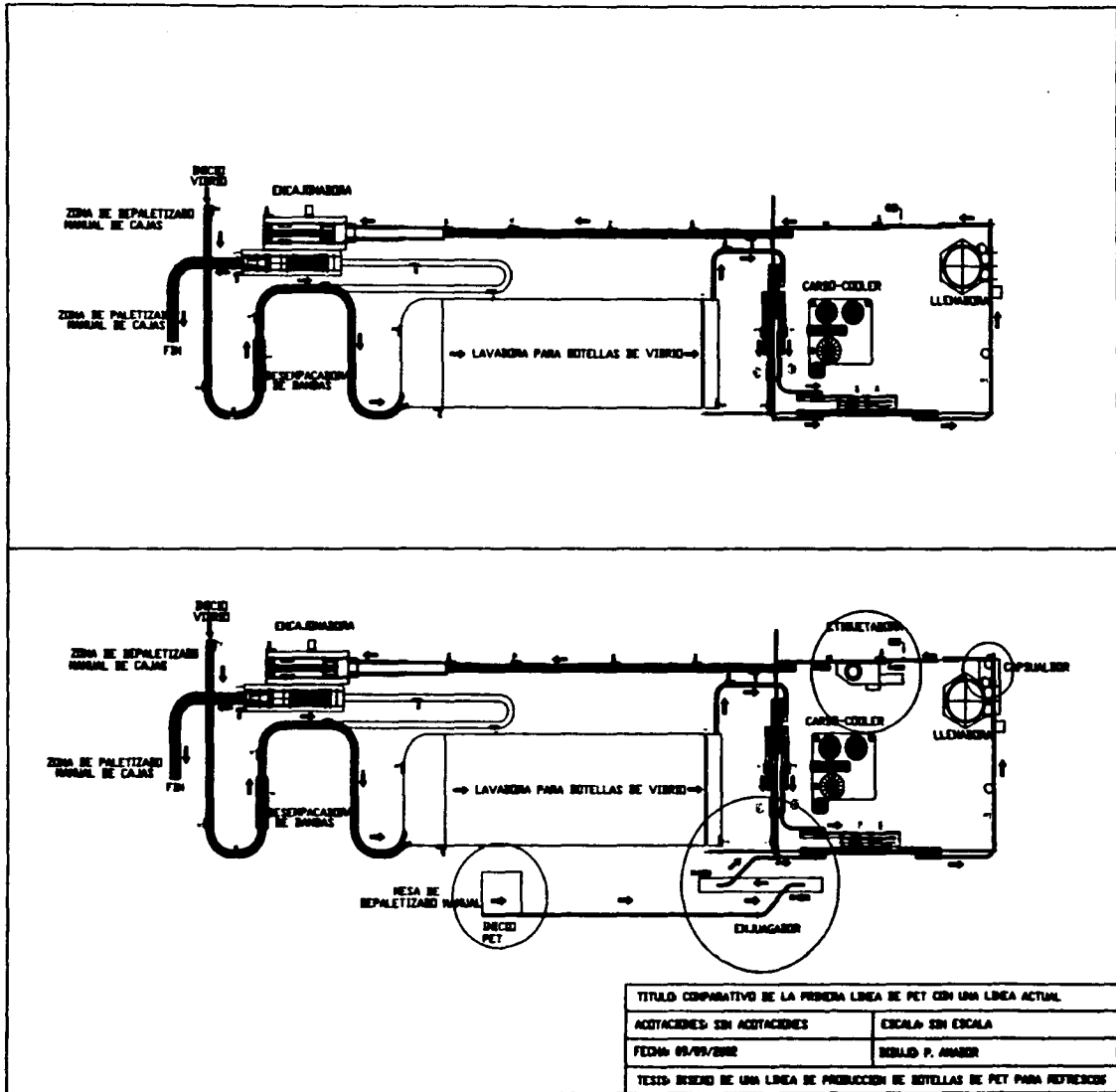
La gráfica 1.1 muestra el comportamiento de las ventas de productos en botella de PET que se han tenido en la planta desde 1994.



Gráfica 1.1 Histórico de ventas de producto en botella de PET
 * 2002P, presupuesto de ventas para el año 2002.

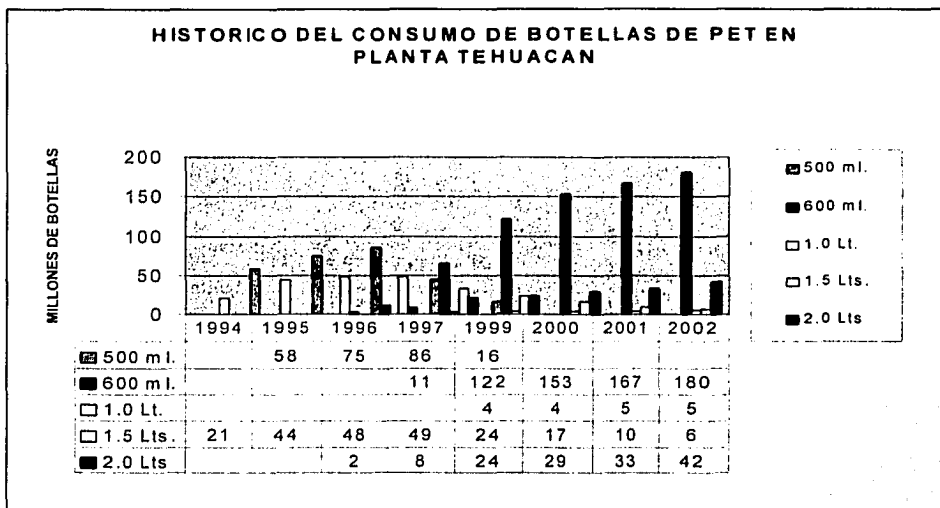
La gráfica 1.2 muestra el volumen de ventas de productos en PET, traducido en consumo de botellas.

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN



TITULO COMPARATIVO DE LA PRIMERA LINEA DE PET CON UNA LINEA ACTUAL	
ACOTACIONES SIN ACOTACIONES	ESCALA SIN ESCALA
FECHA: 09/05/2002	SEÑAL P. AMAR
TESIS: DISEÑO DE UNA LINEA DE PRODUCCION DE BOTELLAS DE PET PARA REFRESCOS	

Figura 1.3 Comparativo de Distribuciones Entre la Primera Línea de PET con una Línea Actual



Gráfica 1.2 Histórico de consumos de botella PET

1.2. Situación actual.

La tendencia del mercado de refrescos orilló a la Compañía Embotelladora a transformar tres de sus líneas de embotellado de vidrio a PET. La primera fase de dicha transformación consistió en hacer que las líneas para vidrio utilizaran formatos en botellas de PET, sin importar la eficiencia de operación. El éxito que se tuvo con el nuevo envase dio origen a una segunda fase que consistió en mejorar la eficiencia de las líneas, sustituyendo los sistemas manuales de alimentación de botella por sistemas automáticos, reemplazando los transportadores para botella de vidrio por transportadores adecuados para botellas de PET, reestructurando las líneas a fin de que cuenten con acumulaciones adecuadas entre equipos y adquiriendo también equipos para el estibado automático del producto para dos de las tres líneas de PET.

En la actualidad, la Compañía Embotelladora está desarrollando una tercera fase que consiste en la reducción de costos. La primera medida adoptada fue la sustitución de los equipos empacadores que producían paquetes de charola de cartón con envoltura plástica por equipos que producen paquetes únicamente con película plástica termoencogible. La segunda medida que se evaluará y que es la que da lugar a la elaboración de este trabajo, consiste en la reducción del costo de la botella y en el aseguramiento del abasto de envase a las líneas de PET. Dicha medida se resume como la sustitución de la compra por la producción de botella con equipo propio instalado dentro de la planta.

Actualmente la botella que se consume en la planta de Tehuacán es abastecida por dos proveedores que se encuentran en la Ciudad de Toluca (a 300 Km. de Tehuacán), por lo que el costo de la botella tiene un componente significativo del flete, considerando que las botellas ocupan mucho espacio pero pesan muy poco. Por otro lado, en los últimos años ha sido frecuente que en las temporadas de alta demanda, los proveedores incurran en fallas en el abasto de botella, lo que se traduce en pérdidas de venta para la Compañía Embotelladora. Esto ha provocado que a fin de contar con un stock confiable de botellas, se ocupen grandes áreas de la planta para su almacenamiento, teniéndose problemas para almacenar otros materiales requeridos por las líneas de producción.

La figura 1.4 muestra la distribución actual de las tres líneas de PET, así como las áreas que actualmente son ocupadas para el almacenaje de botella.

Para llevar a cabo el proyecto de optimización del costo de botella, inicialmente se hará el análisis para la adquisición de un equipo de soplado de botellas que abastecerá a una de las líneas que actualmente producen bebidas en PET. Si el proyecto resulta financieramente rentable y operativamente factible, se instalará el equipo en la línea seleccionada; dependiendo de los resultados obtenidos durante un año se podrá analizar la instalación de los equipos de soplado para las dos líneas restantes.

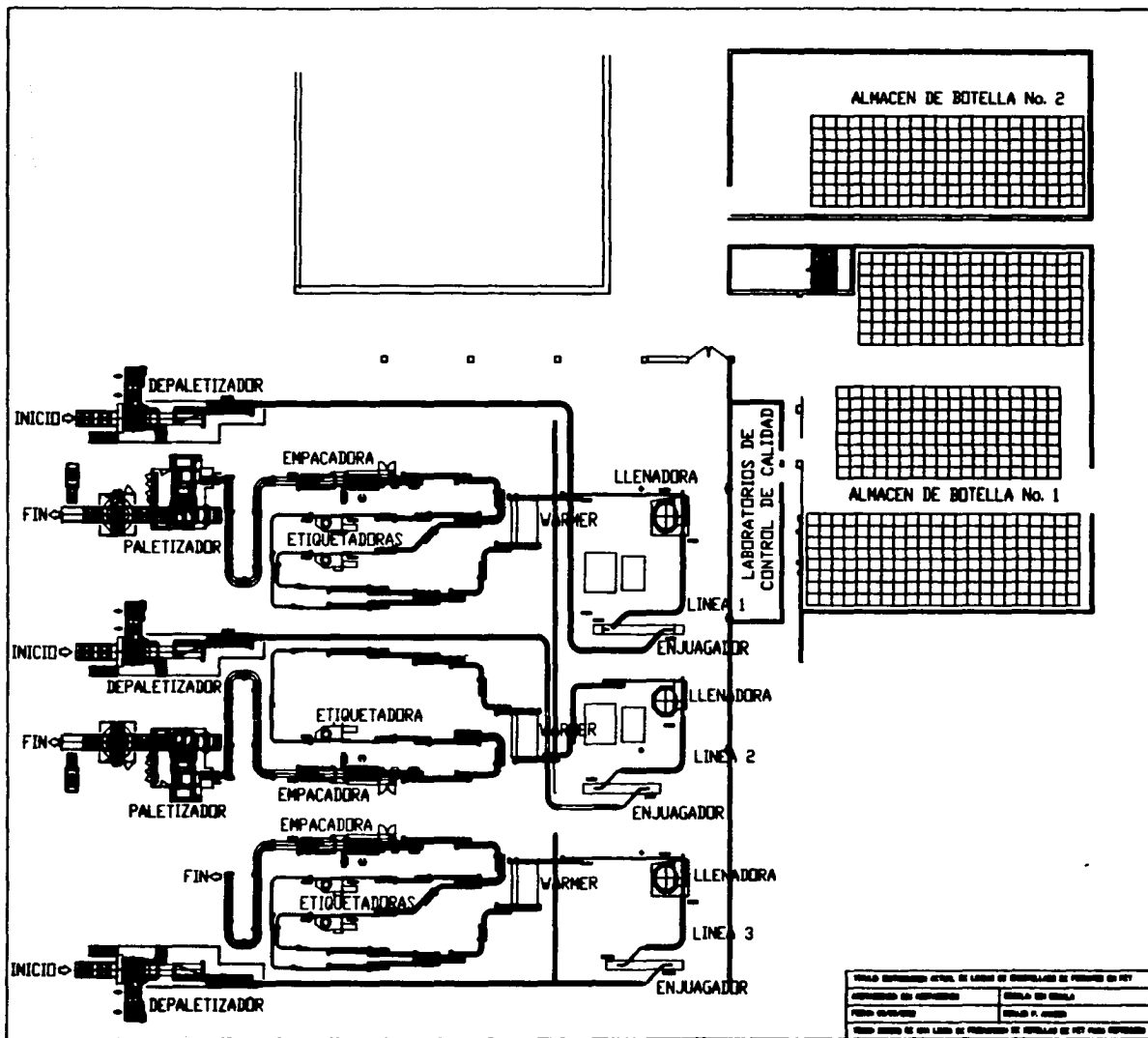


Figura 1.4 Distribución Actual de Líneas de Embotellado de Formatos en PET

Hoy en día en la planta de Tehuacán se producen las siguientes presentaciones en botella de PET: 600 ml, 1.0 l, 1.5 l y 2.0 l. Como se muestra en la gráfica 1.1, las presentaciones de mayor demanda son el 600 ml y el 2.0 l, por lo que de las tres líneas que actualmente producen bebidas en botellas de PET, la de mayor velocidad se ha dedicado a la producción de la presentación de 600 ml, la que le sigue a las presentaciones de 2.0 l y 1.5 l; quedando la línea de menor capacidad disponible para la producción de cualquiera de las cuatro presentaciones.

La tabla 1.2 muestra las capacidades y eficiencias de las tres líneas actualmente dedicadas a la producción de refrescos en botella de PET.

Línea	Presentación	Capacidad	Eficiencia
1	600 ml.	500 bpm	85%
2	1.5 Lts.	180 bpm	85%
	2.0 Lts.	135 bpm	
3	600 ml.	300 bpm	80%
	1.0 Lt.	160 bpm	
	1.5 Lts.	100 bpm	
	2.0 Lts.	80 bpm	

Tabla 1.2 Capacidades de líneas de PET

Observando la gráfica de consumo de botella, gráfica 1.2, se concluye que lo más conveniente es evaluar el proyecto de adquisición del equipo de soplado para la línea dedicada a la presentación de 600 ml (línea 1), pues el volumen de botella demandado por dicha presentación, es casi 5 veces mayor al volumen correspondiente a la presentación de 2.0 l.

La línea 1, dedicada a la producción de la presentación de 600 ml, está completamente automatizada desde la alimentación de botella hasta el estibado de producto como se muestra en la figura 1.4, además tiene una capacidad de 500 bpm, siendo operada durante tres turnos generalmente de lunes a sábado, aunque en ocasiones es necesario operarla también los domingos.

Diariamente al iniciar el primer turno, la línea es sometida a un saneamiento general de la llenadora y de las tuberías de alimentación de producto, tiempo en el cual debe permanecer parada una hora. Debido a que se manejan varios sabores en la presentación de 600 ml, diariamente se realiza en la línea un cambio de sabor para el cual se detiene su operación por espacio de 30 minutos. Un día por semana se programa un mantenimiento general de la línea con duración de 8 horas, en el cual se limpia completamente la línea, se lubrican todas sus partes en movimiento y se corrigen las fallas que se encuentran durante la revisión de cada equipo. De acuerdo a lo anterior, el promedio diario de tiempo de operación de la línea es de 21.16 horas.

Teniendo en cuenta que la eficiencia de operación de la línea es en promedio del 85% y asumiendo para fines prácticos que los días laborables del año son 305 (eliminando domingos y días festivos) es posible calcular mediante la siguiente relación la Demanda Anual de Botellas (DAB) para la línea 1.

$$\text{DAB} = \text{bpm} \times 60 \times \text{hrs. de operación al día} \times \text{eficiencia} \times \text{días laborables del año}$$

$$\text{DAB Línea 1} = 500 \text{ bpm} \times 60 \times 21.16 \text{ hrs} \times .85 \times 305 = 164,571,900 \text{ botellas}$$

Como puede apreciarse en la gráfica 1.2, la demanda de la presentación de 600 ml superó desde el año 2001 la capacidad de la línea 1, sin embargo, como se mencionó, la línea 3 se utiliza para producir el excedente.

Redondeando el DAB de la línea 1 a 165 millones de botellas por año y teniendo un costo por millar de botellas de \$610.00 MXN (incluyendo flete) el costo anual de botella para dicha línea 1 es de aproximadamente 101 millones de pesos.

A esto hay que adicionar el costo correspondiente a la merma de botella que actualmente asciende al 0.2% la cual tiene su origen principalmente en el manejo del envase desde la recepción hasta su alimentación a la línea de producción. La mayor parte de esta merma se tiene en la zona de depaletización de botella, en la cual antes

de introducir las tarimas de botella al depaletizador automático interviene una persona que manualmente retira el plástico y el fleje que sujetan las estibas de botella. Durante dicha operación el trabajador puede provocar la caída de algunas botellas que frecuentemente son aplastadas por los montacargas que circulan en esa zona. Otra parte de la merma se produce durante la operación misma del depaletizador, pues al tratarse de un envase ligero e inestable, estibado a una altura superior a los 2.0 m, su manejo a altas velocidades provoca que algunas botellas caigan dentro de las partes móviles de la máquina que las aplastan o las ensucian de grasa, dejándolas inservibles.

De acuerdo a los datos proporcionados por algunos fabricantes de sopladoras de botellas, el hecho de contar con uno de estos equipos en planta, alimentando directamente a la línea de producción, reduce cuando menos en un 10% el costo de la botella que ésta consume, por lo que en el presente trabajo se evaluará la adquisición de un equipo que satisfaga en su totalidad la demanda de la línea 1, esperándose al menos un ahorro anual de 10 millones de pesos. Por otro lado, el hecho de enviar la botella directamente de la sopladora a la línea, reducirá también la generación de merma, pues se eliminará la manipulación de la botella por parte del personal de la línea y se minimizará el manejo de tarimas con botella estibada.

En lo que se refiere a la operación de almacenaje actual de la botella en planta, basta decir que tan sólo para la línea 1 en las temporadas de alta demanda se mantiene un stock de tres días de producción, es decir, 1.6 millones de botellas en planta a fin de evitar riesgos por problemas en el abasto. Tomando en cuenta que los proveedores suministran la botella en tarimas de madera de 1.22 m x 1.00 m, conteniendo cada una de ellas 2,376 botellas y pudiéndose formar estibas de dos tarimas en el almacén, el área ocupada por el stock antes mencionado es de 410 m². Para el resto del año el stock es de 2 días de producción, requiriéndose 270 m².

Hasta ahora el problema de espacio en planta para almacenar botellas se ha solucionado utilizando una nave industrial cercana a la planta que es también propiedad de la Compañía Embotelladora, sin embargo, es muy probable que el próximo año

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

dicha nave sea vendida, lo que reducirá considerablemente la capacidad de almacenaje de botellas de la planta, haciendo indispensable tomar medidas como la que se está analizando en el presente trabajo.

Al contar con equipos de producción de botellas en planta, no sólo se reducirá la necesidad de espacio de almacén de empaques sino que además se tendrá un menor tránsito de montacargas tanto en el área de producción como en el patio de maniobras, reduciéndose así el riesgo de accidentes que actualmente es alto.

Hasta aquí se han comentado los factores más importantes de la planta Tehuacán que dan origen al proyecto que se maneja en el presente trabajo, cuyos objetivos serán la generación de ahorros significativos en los costos de botellas de PET de 600 ml, el aseguramiento del abasto de este tipo de botella dejando de depender de los actuales proveedores y la optimización de las áreas de almacén de la planta.

Capítulo 2 Marco teórico.

2.1. El PET.

2.1.1. El PET como materia prima.

La creciente demanda por parte de los consumidores ha impulsado de manera importante el desarrollo de nuevas tecnologías para el empaque de diversos productos de uso diario. La industria del empaque es muy importante en nuestro país, debido al lugar que ésta tiene dentro de la industria manufacturera nacional.

Los materiales que son utilizados más comúnmente dentro de la industria del empaque son el vidrio, metal, papel, cartón y el plástico, y de éstos, el plástico ocupa un lugar muy importante, ya que posee características muy particulares que favorecen el manejo y distribución de una amplia gama de productos, además de su alta resistencia a pesar de ser un material liviano. Estas características entre otras, han favorecido el desarrollo de esta industria, la mayor diversificación de estos productos y por supuesto, su consumo.

Actualmente, la regla general de que los envases debían ante todo proteger el producto y facilitar su transporte ya no es aplicable en su totalidad. Los envases tienen que reunir los nuevos requisitos que exigen los consumidores, el comercio, y la protección del medio ambiente. Además de ser aptos para su función elemental, los envases han de ofrecer la posibilidad de ser fabricados muy económicamente, de ser reutilizados razonablemente y de eliminarlos al final de su ciclo de vida sin daño al medio ambiente. El PET reúne un alto porcentaje de dichos requisitos. Es el material con que se hacen las botellas; no todas, pero cada vez más. El PET está remplazando al vidrio y en medida creciente al PVC y a otros plásticos con los que todavía se fabrican botellas y envases similares. Las características del PET convencen cada día más a los consumidores.

El PET gracias a sus propiedades de resistencia mecánica, transparencia y la gran barrera que presenta ante los gases, es aplicado exitosamente en la fabricación de envases para muchos productos como refrescos, aceites, aguas, licores y algunos otros productos en presentaciones en polvo, sólidos y líquidos.

La aplicación más importante está en la industria refresquera ya que como se mencionó anteriormente, presenta considerablemente una mejor barrera al oxígeno y al CO₂ que la mayoría de los otros plásticos; estas ventajas abren el mercado para las bebidas carbonatadas sustituyendo con altas ventajas al vidrio.

El PET fue descubierto durante la Segunda Guerra Mundial como un polímero termoplástico, basándose en las investigaciones del químico norteamericano Wallace Hume Carothers cuando trabajaba para la empresa DuPont de Nemours Company.

En 1946 se inició la producción de PET, destinado a la producción de fibras textiles. A mediados de los años sesenta se utilizó para fabricar películas flexibles biorientadas para empaques de diversos productos, cintas, cassettes y película biorientada para su aplicación en fotografía y rayos X.

La primera aplicación fue la fibra textil, que reemplazó al algodón y al lino, como ejemplo se pueden mencionar las primeras camisas 100% poliéster que no era necesario plancharlas y, aunque esta nueva versión no resultó muy exitosa, en la actualidad se confeccionan con fibras de mezclas de algodón y poliéster.

La industria del plástico buscaba desarrollar un material irrompible, ligero y transparente para producir botellas para bebidas carbonatadas y al inicio de la década de los 70, el PET surge como un material muy importante para la elaboración tanto de botellas y envases para contener alimentos que requieran una vida larga.

Mediante aditivos y procesos idóneos se consiguió fabricar productos de alto grado de cristalinidad, llamados C-PET, con estructura microcristalina uniforme. Posteriormente, se logró fabricar los grados amorfos completamente transparentes A-PET.

A principios de los años ochenta el PET atravesó por una expansión vertiginosa por el gran mercado de aplicación que este material tiene, por lo que año con año se han mejorado sus propiedades y ampliado sus áreas de oportunidad de aplicación.

El PET es el polímero con mayor tendencia de crecimiento en el mundo, ya que ha pasado de ser un plástico de ingeniería a ser un artículo de consumo en un tiempo muy corto. El incremento en el consumo del PET definitivamente comenzó cuando se sustituyó radicalmente el vidrio de las botellas por el plástico. Debido a las características que el PET tiene, se ha convertido en una de las resinas más importantes.

2.1.2. Estructura molecular.

De acuerdo al orden de la estructura molecular del PET se puede tener PET amorfo, el cual se caracteriza porque sus moléculas filamentosas y ramificadas están en completo desorden, lo cual permite el paso de la luz. Por esta razón el PET amorfo es transparente. En la figura 2.1 se presenta la estructura del PET amorfo.

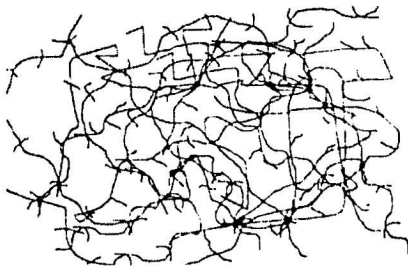


Figura 2.1 Estructura del PET amorfo.

El PET cristalino tiene un orden molecular bueno, en este orden se presenta un paralelismo dentro de los filamentos moleculares y sus ramificaciones son más cortas. Este ordenamiento paralelo equivale al ordenamiento de moléculas en forma de cristales, los cuales se oponen al paso de la luz provocando una apariencia lechosa o translúcida.

En la figura 2.2 se presenta la estructura de un PET cristalino.

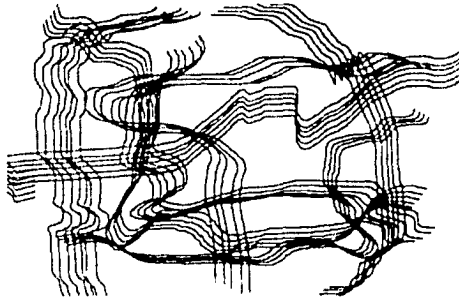


Figura 2.2 Estructura del PET cristalino.

Existen diferentes grados de PET, los cuales se diferencian por su peso molecular y su cristalinidad; los que presentan menor peso molecular se denominan grado fibra, los de peso molecular medio se denominan grado película y los de mayor peso molecular se denominan grado ingeniería, los cuales poseen mayor cristalinidad.

2.1.3. Obtención.

El PET es un polímero de cadena larga. Durante su procesamiento para fabricar un envase las cadenas se orientan para lograr características de resistencia mecánica y transparencia.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Existen dos métodos por los cuales se puede obtener el PET, uno es a partir de ácido tereftálico y el etilenglicol y el otro es partiendo del dimetil tereftalato y etilenglicol.

El método más simple para la obtención del PET, es la reacción directa de esterificación del ácido tereftálico con el etilenglicol, formando bis-B-hidroxietil tereftalato, monómero que se somete a una policondensación para obtener un polímero de cadena larga.

Mientras la reacción de esterificación tiene lugar por la eliminación del agua como subproducto, la fase de policondensación que se realiza en condiciones de alto vacío libera una molécula de etilenglicol, cada vez que la cadena se alarga por una unidad repetida.

Cuando la cadena va alargándose, el aumento del peso molecular va acompañado por un incremento en la viscosidad, proporcionando mayor resistencia química.

Una vez que se tiene la longitud de la cadena requerida, el PET fundido se solidifica, esto se efectúa a través de una extrusora con dado de orificios múltiples, para obtener un espagueti que se enfría en agua. En forma semisólida es cortado en un pelletizador y se obtiene el granulado.

En la figura 2.3 se muestra el diagrama de producción de PET.

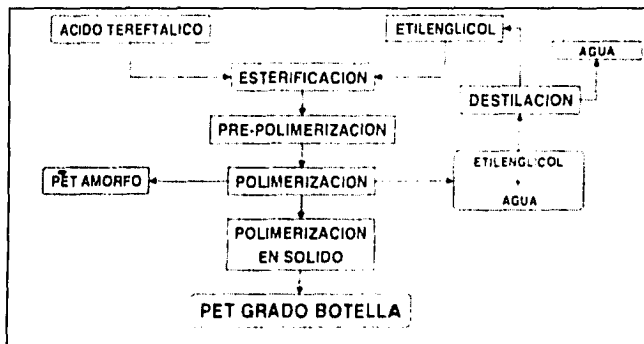


Figura 2.3 Diagrama de producción de PET.

La síntesis para la elaboración del PET se encuentra resumida en la siguiente reacción, figura 2.4:

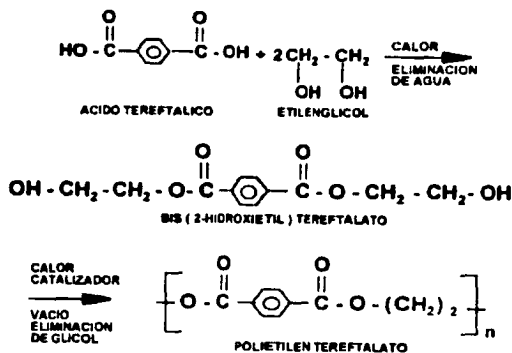


Figura 2.4 Reacción para la elaboración de PET.

En cuanto al PET grado botella, los *pellets* solidificados tienen tres factores que limitan su uso en la industria y como consecuencia se requiere de un proceso final en la fase de fabricación. Estos factores son su estructura amorfa, el contenido alto de acetaldehído y el bajo peso molecular por tener cadenas cortas.

El proceso final que ayuda a mejorar los factores anteriores recibe el nombre de polimerización sólida y consiste en calentar el granulado en una atmósfera inerte, con lo que se mejoran simultáneamente las tres propiedades, proporcionando mayor facilidad y eficiencia en el secado, moldeado de la preforma, producción y calidad de la botella.

El proceso de polimerización en estado sólido se lleva a cabo en seis etapas:

- **Transporte.** Es muy importante un sistema que permita un traslado cuidadoso del granulado. El tamaño uniforme del granulado es una condición para lograr una calidad continua en el producto final.

- **Cristalización preliminar.** Se efectúa generalmente utilizando sistemas de lecho fluidizado, que operan con altas velocidades de gas y operaciones de mezclado con retorno. La mezcla del granulado amorfo con el ya cristalizado, impide la formación de aglomerados.
- **Cristalización.** En esta etapa el material se debe seguir moviendo para evitar la formación de aglomerados, para lo cual, también se utilizan preferentemente sistemas de lecho fluidizado, ya que en esta etapa se evita el uso de elementos mecánicos móviles y se asegura un tratamiento más cuidadoso del granulado.
- **Calentamiento.** El material cristalizado debe ser calentado antes de entrar al reactor y simultáneamente durante esta etapa; también se seca para obtener las condiciones iniciales necesarias para la reacción. El calentador de lecho fluidizado proporciona muy buena transmisión de calor al material, o un intercambiador de calor vertical que presenta menor consumo de energía.
- **Reacción.** Para obtener una calidad homogénea con respecto a la longitud de cadena molecular, color y contenido de acetaldehído se debe mantener un control exacto de la reacción durante la policondensación en estado sólido. Esto es posible manteniendo el óptimo equilibrio entre la corriente y la calidad del gas, así como la uniformidad en el tiempo de residencia del material en el reactor. Para este fin se utiliza gas nitrógeno purificado.
- **Enfriamiento.** En esta etapa se detiene la reacción para posteriormente empaquetar el material en sacos o para su transporte a granel.

La figura 2.5 muestra el esquema de una planta de Policondensación en estado sólido para producción de PET.

POLICONDENSACION EN ESTADO SOLIDO

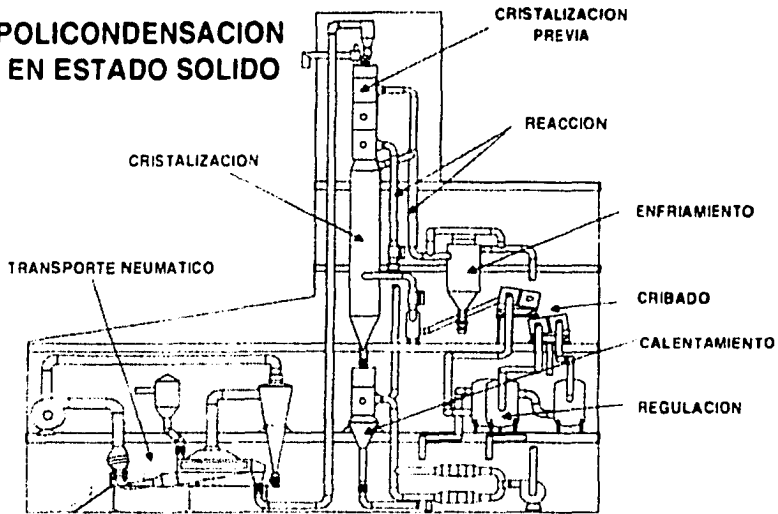


Figura 2.5. Planta de Policondensación en Estado Sólido.

El acetaldehído es un subproducto inofensivo generado durante la producción del PET y su posterior moldeo. Es un vapor incoloro a temperaturas mayores a 21 °C y tiene olor a frutas.

El contenido de acetaldehído debe tomarse en cuenta no por razones de seguridad o salud, sino porque puede afectar el sabor de las bebidas o alimentos que se envasen en botellas de PET. Por esta razón, el contenido de acetaldehído debe minimizarse a través de procesar correctamente el polímero a la mínima temperatura de masa fundida posible, tiempo de residencia, esfuerzo de corte y calentamiento uniforme.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

2.1.4. Grados de PET.

Para el estudio de la resina PET se requiere saber la clasificación que ésta tiene dentro de los termoplásticos y de acuerdo a su contenido de monómero se tiene lo siguiente.

Homopolímeros

- PET
- PBT

Copolímeros

- PETG; Modificado con Glicol.
- PETG; Modificado con Hexanodimetanol y Glicol.

Por su grado de cristalinidad se pueden clasificar como sigue.

Semicristalino

- PBT
- C-PET

Amorfo

- A-PET
- Copoliésteres de Glicol

2.1.5. Propiedades del PET grado botella.

En particular, el PET es un material muy sensible a la hidrólisis a elevadas temperaturas, de manera que los pellets deben secarse antes de su procesamiento. El

PET en general se caracteriza por su elevada pureza, alta resistencia y tenacidad. Cuando se orienta, presenta excelentes propiedades de transparencia y claridad, buena estabilidad dimensional, buena barrera a gas, temperatura de servicio máxima de 75°C, buena resistencia química, aceptación por la FDA (Food and Drugs Administration), mayor ligereza que el vidrio, resistencia a los rayos U.V. y seguridad en el manejo de envases.

2.1.5.1. Densidad.

El PET amorfo tiene una densidad de 1.33 g/cm³ y el PET cristalino de 1.38 g/cm³. La densidad varía como producto terminado en un promedio de 1.35 g/cm³ dependiendo del nivel de biorientación, por lo que, utilizando PET se puede producir un envase del mismo volumen que uno de vidrio pero utilizando menos cantidad de material.

En la figura 2.6 se puede observar la comparación de la densidad del PET con la de otros materiales.

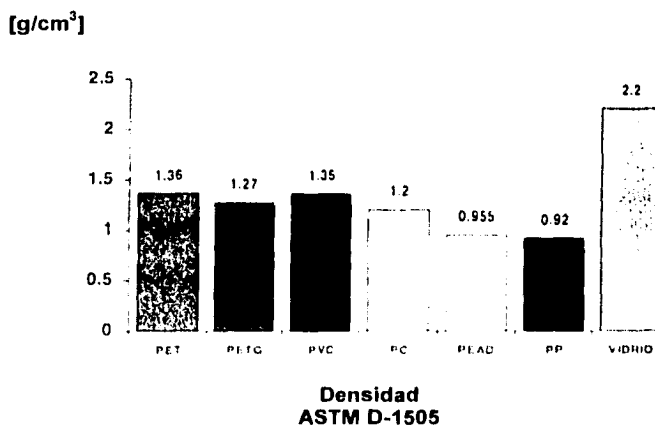


Figura 2.6 Comparación de la densidad del PET con otros materiales.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

En términos de protección ambiental ésta es una ventaja muy importante debido al menor consumo de energía que se requiere para la transformación del PET e inclusive, se ahorra en el costo de combustible para la transportación, tanto de los envases vacíos, como con producto, como se muestra en la figura 2.7

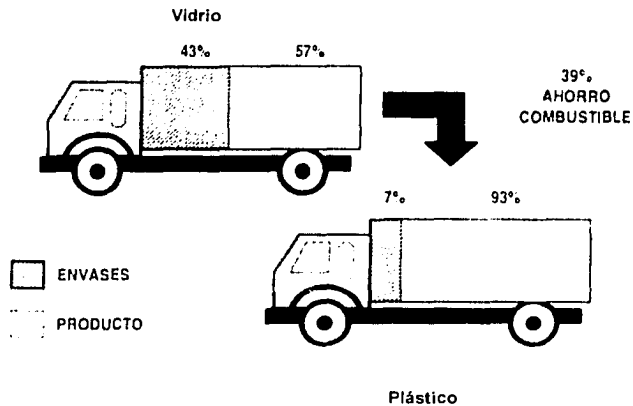


Figura 2.7 Representación de ahorro de combustible.

2.1.5.2. Propiedades mecánicas.

El PET cristalino tiene dureza, rigidez y resistencia mecánica elevadas, su buena rigidez, se mantiene incluso a temperaturas de -30°C . El PET amorfo se comporta de manera similar pero con menor dureza y rigidez.

Una vez transformados y biorientados, ambos tipos de PET adquieren propiedades similares.

El nivel de resistencia al impacto del PET, comparado con otros plásticos es el más indicado para las aplicaciones a donde se dirige y se considera prácticamente irrompible, siendo esta una ventaja importante con respecto a los envases de vidrio.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Dentro de los desarrollos más recientes en PET, se tienen los garrafones de 19 l de agua purificada que pasan las pruebas comunes de impacto que consisten en dejar caer el envase lleno a una altura de un metro y que éste no se rompa después de tres o cinco veces.

En la figura 2.8 se puede observar la resistencia al impacto del PET en comparación con otros materiales.

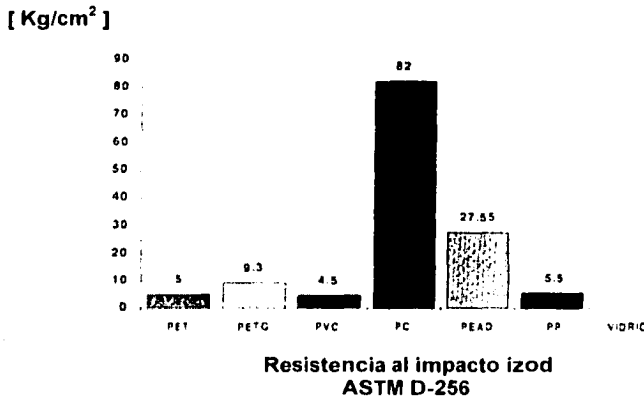


Figura 2.8 Resistencia al impacto.

2.1.5.3. Apariencia física.

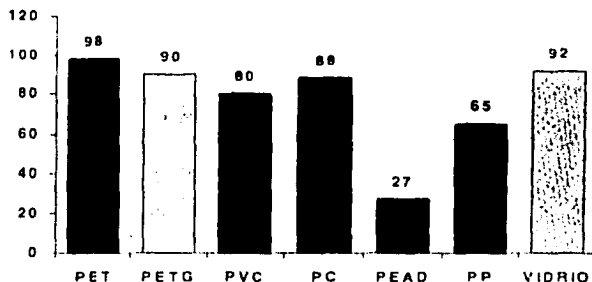
El PET en estado amorfo es transparente. El PET en estado cristalino es opaco y blanco, pero una vez biorientado el material alcanza un alto nivel de transmitancia. La transmitancia es la propiedad que tienen los materiales para permitir el paso de la luz.

Normalmente el PET se utiliza en su forma natural sin pigmentar, presentando una excelente claridad y brillo superficial. Cuando el producto a envasar es sensible a la luz, los envases de PET pueden colorearse para proteger el contenido utilizando una gran variedad de pigmentos comunes.

En comparación con otros plásticos, el PET está situado entre los más transparentes, superando al vidrio en este aspecto.

En la figura 2.9 se muestra la propiedad de la transmitancia del PET comparándola con otros materiales.

[%]



Transmitancia ASTM D-1003

Figura 2.9 Transmitancia del PET.

2.1.5.4. Barrera a gases o permeabilidad.

La barrera a gases o permeabilidad es la propiedad que tienen los plásticos para evitar el paso de gases a través de ellos.

El PET presenta mejor barrera al oxígeno y al CO₂ que cualquiera de los plásticos. Esta propiedad se mejora considerablemente como resultado de la biorientación del material, lo cual permite el desarrollo de envases para bebidas carbonatadas sustituyendo con muchas ventajas al vidrio, principalmente seguridad en el manejo de envases, ligereza y economía.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

La vida de anaquel de un producto se refiere al tiempo en que éste puede mantenerse en condiciones aceptables para su venta, y los envases de PET previenen la pérdida de los constituyentes deseables o ganancia de sustancias que adversamente pueden afectar la calidad del contenido, por su propiedad de barrera a gases.

La figura 2.10 muestra la propiedad de barrera del PET.

Capacidad para impedir el paso de gases a través del material.

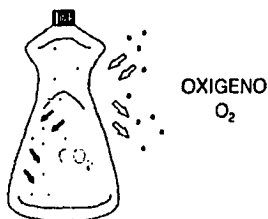


Figura 2.10 Propiedad de barrera del PET.

La tabla 2.1 presenta los valores de propiedad de barrera que el PET presenta comparándolo con otros materiales.

MATERIAL	TRANSMISION		
	OXIGENO	CO ₂	VAPOR DE AGUA
EVAL.	...	0.13	6
PVDC	0.016	0.47	0.16
PAN	1.24	1.7	7.8
PET	2.6	31	1.7
PA	2.6	4.7	...
PVC	12	24	2
PETG	40	200	6
PEAD	213	900	0.5
PP	360	950	0.8
PEBD	600	300	2

cm³/0.001 pulg/100 pulg² 24 h a 1 atm

Tabla 2.1 Propiedad de barrera

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

La tabla anterior reporta los valores para la propiedad de barrera para diferentes materiales, para el PET es 2.6 cm^3 de oxígeno que pasan a través de una pared con una área de 100 in^2 y un espesor de 0.001 in durante 24 horas a una presión de 1 atmósfera.

La figura 2.11 muestra la propiedad de barrera que el PET presenta para el CO_2 y su comparación con otros materiales.

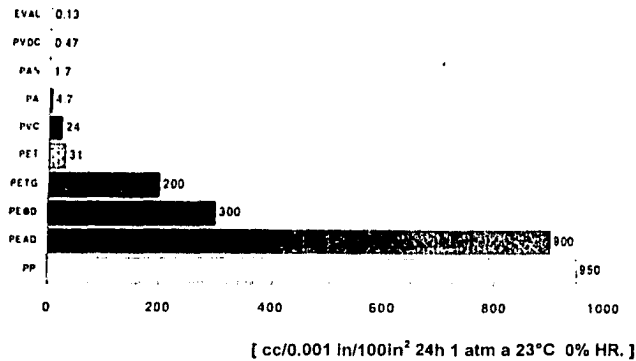


Figura 2.11 Propiedades de barrera para CO_2 .
cc/0.001 in/100in² 24h 1 atm a 23°C 0% HR.

2.1.5.5. Propiedades térmicas.

Los envases de PET son normalmente llenados a temperatura ambiente o a temperaturas menores de 70°C , sin embargo, algunos alimentos como los jugos, deben ser llenados entre 85 y 90°C .

Las temperaturas de llenado en caliente se emplean con el objetivo de esterilizar al producto envasado así como prevenir la decoloración y oxidación después de que las botellas se llenan.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Cuando se efectúa el proceso de llenado en envases comunes de PET con alimentos calientes, es posible que las botellas presenten una distorsión haciéndolas inaceptables para su uso comercial.

La distorsión térmica ocurre debido a que la temperatura de transición vítrea del PET es de 67 a 81°C y la temperatura de distorsión de 70°C.

Existen métodos de tratamiento especiales que permiten elevar la resistencia térmica para así poder penetrar en otros mercados como son los de jugos de cítricos, bebidas isotónicas, cerveza y conservas.

Debido a que cada alimento y bebida a envasar requiere de diferentes niveles de barrera y temperatura de llenado, el envase a elegir debe cubrir los requisitos.

La figura 2.12 muestra la temperatura de distorsión del PET y se puede observar la comparación con otros materiales.

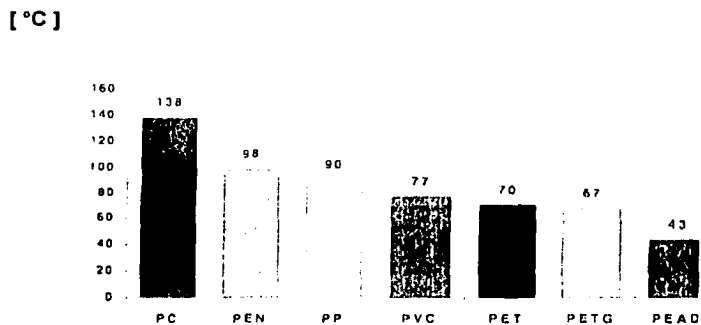


Figura 2.12 Temperatura de distorsión.
ASTM - 648

En la figura 2.13 se muestra la temperatura máxima de llenado de producto en envases de PET y de otros materiales.

[°C]

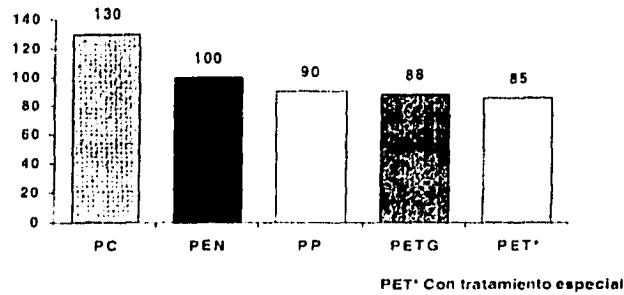


Figura 2.13 Temperatura máxima de llenado en caliente.

2.1.5.6. Resistencia química.

El PET presenta una elevada resistencia a los alcoholes, ácidos inorgánicos y orgánicos, permitiendo con excelentes resultados el envasado de vinos, licores, vinagres, cosméticos y productos farmacéuticos. Resiste grasas y agua por lo que es adecuado para el envasado de aguas minerales y aceites.

Pero, algunas sustancias alcalinas, hidrocarburos clorados y algunas cetonas pueden afectar al PET provocando la fragilización de las paredes del envase.

La tabla 2.2 muestra la resistencia química que el PET y otros materiales tienen para algunas sustancias.

	PET	PETG	PVC	PC	PEAD	PP	VIDRIO
Aceites y Grasas	BUENA	BUENA	BUENA	BUENA	BUENA	BUENA	BUENA
Alcohol	BUENA	BUENA	BUENA	BUENA	BUENA	BUENA	BUENA
Acidos	BUENA	BUENA	MUY BUENA	LIMITADA	MUY BUENA	MUY BUENA	MUY BUENA
Alcalis	BUENA	BUENA	MUY BUENA	MALA	MUY BUENA	MUY BUENA	MUY BUENA

Tabla 2.2 Resistencia química del PET.

2.2. Desarrollo del mercado para las botellas de PET.

2.2.1. Situación mundial.

El PET es el polímero de más rápido crecimiento en el mundo. La industria del empaque representa alrededor del 19% del total de plásticos empleados.

El consumo de PET para envase fue de 5.9 millones de toneladas donde Estados Unidos y Canadá consumen 1.8 millones, Asia 1.2 millones y Europa 1.1 millones de toneladas anuales.

Existen en el mundo alrededor de 30 empresas productoras de PET donde las más conocidas son Eastman, DuPont, Shell e ICI.

En la figura 2.14 se muestra el consumo que se tiene del PET por región a nivel mundial.

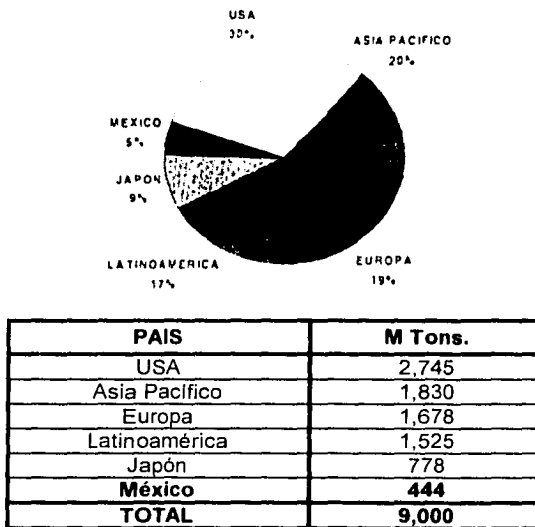


Figura 2.14 Consumo mundial por región.

Las numerosas inversiones que se llevaron a cabo en los últimos cinco años para aumentar la capacidad de producción, llevaron a un exceso de oferta y a la disminución de precios. La oferta se saturó antes de lo previsto y los precios disminuyeron. Los patrones de uso de PET son crecientemente globales y cuando aparece una innovación en alguna parte del mundo inmediatamente se transmite a otras regiones. Esto se debe al pequeño número de proveedores y a que las empresas mundiales de bebidas carbonatadas han impulsado el consumo de PET en muchos países.

2.2.2. Situación nacional.

El PET es un polímero que actualmente representa alrededor del 10% del consumo total de plásticos en México.

Ha sido el plástico de mayor crecimiento en consumo de los últimos 15 años y aún se espera que su consumo siga aumentando.

Todas las empresas productoras han superado su capacidad instalada original, esto como consecuencia del incremento de la demanda nacional y compromisos internacionales para exportación.

En México existen alrededor de 180 empresas transformadoras de PET y se espera que este número aumente a 250 en los próximos tres años.

En la figura 2.15 se muestra la capacidad instalada y mercado del PET en México.

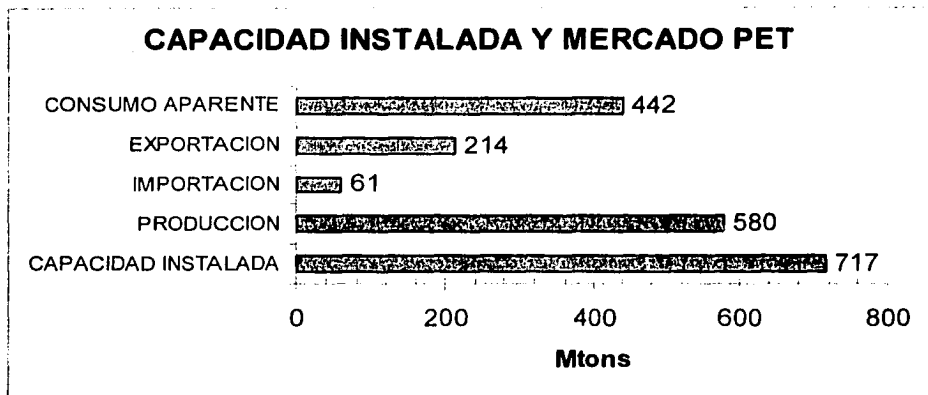


Figura 2.15 Capacidad instalada y mercado del PET en México.

La segmentación del mercado del PET se describe en función del producto envasado, siendo el segmento más importante el de bebidas carbonatadas que a su vez se divide en no retornables y retornables. Normalmente la capacidad de las botellas empleadas en este sector varía de 355 ml a 2.5 l.

En segundo lugar lo ocupa el aceite comestible donde se emplean botellas de un litro.

El mercado de las aguas embotelladas ha experimentado un crecimiento vertiginoso en los últimos años gracias a las propiedades de los envases de PET encontrándose botellas desde 500 ml hasta 20 l.

En México existen alrededor de 100 empresas que fabrican botellas de PET, de las cuales el 60% son empresas integradas al envasado de productos principalmente refrescos, aceites y aguas, y el 40% restante son transformadores que venden envases de diferentes tipos al mercado abierto.

En la figura 2.16 se observa la segmentación del mercado de PET en México.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

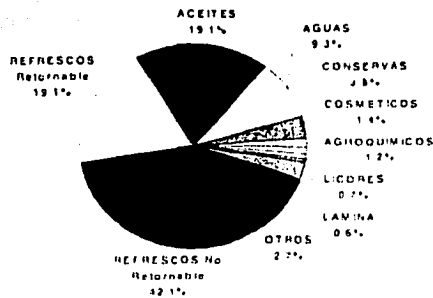


Figura 2.16 Segmentación del mercado del PET en México.

En 1998, México ocupó el tercer lugar mundial en consumo de envases PET después de Estados Unidos y Brasil.

El crecimiento nacional de la demanda de PET superó desde 1995 la capacidad instalada, favoreciendo los negocios de reciclaje de la misma.

El crecimiento estimado para el año 2005 es de 16% anual lo cual alcanzaría una demanda global de 15 millones de toneladas, teniéndose que aumentar la capacidad productiva actual en 4 millones que equivalen a unas 30 nuevas plantas de 130,000 toneladas cada una.

El crecimiento anual por región se estima será para Estados Unidos y Canadá del 8.5%, Europa, Medio Oriente y África 10%, Asia Pacífico 18% y México y América Latina 20%. Estas proyecciones están basadas en la sustitución del PVC y vidrio en envases para agua purificada que actualmente siguen siendo utilizados en Europa.

En México se esperan incrementos de la producción por arriba de la capacidad nominal en varias de las plantas fabricantes instaladas en el país. Por lo que se puede hacer la siguiente pregunta: ¿Están preparadas para incrementar su capacidad si la demanda doméstica y de exportación siguen creciendo a los niveles de los últimos años?

2.3. Sistemas.

En este apartado se revisarán los principales sistemas que componen la solución propuesta en el presente trabajo.

Los sistemas que se revisarán son:

- Sopladora
- Compresor de aire
- Sistemas de enfriamiento para el compresor y los moldes.

Para cada uno de estos sistemas se mencionarán sus principales características, se hará una breve descripción de su funcionamiento y así mismo se revisarán los criterios o métodos de selección de los mismos.

2.3.1. Sistemas de Soplado.

2.3.1.1. Introducción.

El moldeo por soplado ofrece varias ventajas técnicas y económicas en la manufactura de artículos de plástico. Algunas de estas ventajas son: la posibilidad de manufacturar piezas con diseños complicados (cavidades) y la posibilidad de realizar piezas que tengan espesores de pared variables.

El proceso básico de soplado involucra: la creación de una preforma plástica o parison; colocar esta preforma en un molde cerrado de dos piezas (la cavidad del molde representa la forma externa de la parte que se producirá); inyección de aire en la preforma caliente para inflarla y tomar la forma de la cavidad del molde; permitir el enfriamiento de la preforma extendida; abrir el molde y retirar la parte moldeada ya rígida.

Las técnicas de moldeo por soplo pueden dividirse en tres categorías principales que son extrusión soplo, inyección soplo y el proceso de estiramiento soplo. Este último puede comenzar ya sea con los procesos de extrusión o de inyección en los cuales se generará la preforma.

Estas técnicas proporcionan distintas ventajas para producir todo tipo de productos, así que es necesario analizar el proceso que se utilizará basado en los requerimientos del producto y su desempeño, así como la cantidad que se producirá del mismo, estos factores son los que determinarán el tipo de técnica que se empleará en la producción del producto y las botellas destinadas a contener bebidas carbonatadas como refrescos, aguas minerales, cervezas y champaña deben de ser diseñadas para soportar hasta cinco volúmenes de CO₂.

2.3.1.2. Inyección soplo biorientado del PET.

El moldeo por inyección soplo biorientado de PET, también llamado moldeo de orientación biaxial por soplo, es usado con sistemas de extrusión o inyección. En este método la preforma es estirada radialmente por el aire soplado y a lo largo del eje vertical por medios mecánicos. El resultado es que las moléculas están alineadas a lo largo de dos planos.

Al estirar el material a ciertas temperaturas (temperatura de orientación) se pueden mejorar notablemente las propiedades de ciertos plásticos, proporcionando ventajas en el costo-desempeño de las piezas terminadas.

Los beneficios de esta técnica son entre otros: una mejor claridad del producto, resistencia al impacto, mejoras en las barreras de gas y vapor de agua.

La inyección soplo biorientado es el proceso más importante para la transformación del PET, con éste se elaboran envases, botellas, tarros y frascos. Consiste en la inyección de una preforma que posteriormente se calienta de 10 a 20°C arriba de su temperatura

de transición vítrea, para posteriormente estirarla y simultáneamente introducirle aire a presión, lográndose una biorientación de las moléculas en dirección longitudinal y transversal. Dichas moléculas se ordenan en forma de "red", proporcionando a los productos moldeados un incremento notable en sus propiedades de barrera y propiedades mecánicas.

En la tabla 2.3 se pueden observar las diferentes temperaturas utilizadas durante el proceso de inyección sople biorientado para el PET.

Material	Fusión (°C)	Estiramiento (°C)	Relación de estiramiento.	Temperatura de estiramiento (°C)
PET	280	107	16/1	88-116

Tabla 2.3. Temperaturas de procesamiento del PET..

Ventajas del proceso de inyección sople biorientado.

Este proceso ofrece varias ventajas, los envases poseen propiedades mecánicas superiores. Gracias al estirado biaxial de la botella no hay desperdicio, no existen costuras y la superficie es de alta calidad.

Los envases presentan gran precisión dimensional en la cuerda, longitud y espesor de la pared. Se tienen variaciones mínimas de peso y tolerancia dimensional.

Este proceso se puede llevar a cabo en uno o dos pasos.

- Método de un paso
- Método de dos pasos

Se denomina método de un paso, cuando las preformas se inyectan, estiran y soplan en la misma unidad.

En este sistema se fabrican preformas y botellas en una misma máquina. Existen varios fabricantes que ofrecen equipos que permiten realizar esta tarea. Estos equipos resultan generalmente de menor costo de inversión. La producción de botellas normalmente va desde 200 hasta 800 botellas por hora por cavidad de soplado y es posible producir envases desde 10 ml hasta 10 l.

El sistema de un paso es adecuado para operaciones donde se requieren varios tipos de diseños de envases en cantidades bajas.

Las ventajas del proceso de un paso son:

- La historia térmica se minimiza.
- La preforma puede ser diseñada para lograr la mejor distribución del material en el producto final.

Cada etapa del proceso debe controlarse para alcanzar las propiedades óptimas del producto soplado.

Para el método de dos pasos, en una máquina se inyectan las preformas y se enfrían a temperatura ambiente, posteriormente en otra se soplan y estiran.

En este método las botellas se producen en dos máquinas distintas. En la primera se lleva a cabo la inyección de las preformas, enfriamiento, extracción del molde y subsecuentemente se transfieren a la segunda máquina donde se efectúa el estirado y soplado para obtener botellas.

Ambas máquinas pueden colocarse en la misma planta productiva unidas por un sistema de banda transportadora de preformas, o bien en centros de producción diferentes.

Este sistema ofrece alta productividad, el capital de inversión inicial puede minimizarse adquiriendo únicamente la unidad de soplado y comprando preformas a fabricantes dedicados a este negocio.

Las ventajas del proceso de dos pasos son:

- Mínima producción de desperdicios.
- Mejor acabado superficial y de la rosca.
- Mayores rangos de producción.
- Capacidad de almacenar las preformas, evitando así la dependencia entre la preforma y la maquinaria de botella.

El proceso de dos pasos es el que se propone en este proyecto por las ventajas anteriores y sobre todo a que es el más adecuado para elevadas producciones. Los fabricantes que producen botellas para bebidas carbonatadas y aceites comestibles han optado por este proceso.

En la figura 2.17 se observa de manera esquemática el proceso de soplado biorientado: en el paso 1 se produce la preforma, en el paso 2 la preforma es calentada hasta la temperatura de estiramiento y en el paso 3 esta preforma es estirada y soplada, obteniendo finalmente el producto terminado.

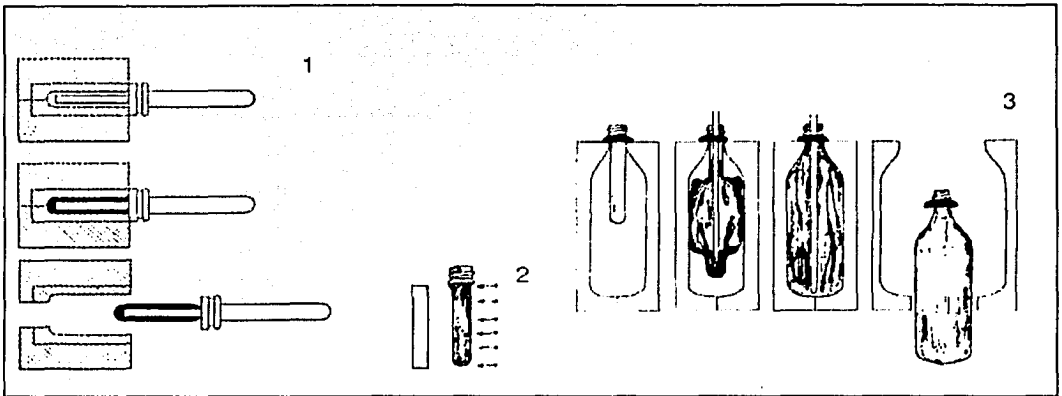


Figura 2.17. Proceso de soplado biorientado.

2.3.1.3. Condiciones de operación.

Inyección de la preforma.

El principal objetivo de moldear una preforma es fundir adecuadamente un polímero altamente cristalino, como el PET, para producir un producto de calidad. La preforma debe de ser clara, amorfa y con nivel aceptable de acetaldehído, tal como se mencionó anteriormente.

Cuando se dice fundir adecuadamente, no significa que todos los cristales deben de ser eliminados por fusión. Se deben fundir un número adecuado de cristales para no generar nubosidad en la preforma.

La preforma o "parison" es un tubo de diámetro pequeño, cerrado en uno de sus extremos. Se moldea con geometría precisa en el tamaño y espesor de pared, de acuerdo a los requerimientos del diseño del envase ya sean botellas, tarros o frascos.

Las especificaciones del envase, selección del material y geometría son las variables de diseño que afectan el peso de la preforma. El moldeo de las preformas consiste en

la inyección del polímero fundido a la cavidad del molde. Una vez llena, se enfría rápidamente para obtener una pieza con excelente transparencia, libre de deformaciones y magnífica exactitud dimensional, que es esencial para obtener botellas de calidad.

El proceso del moldeo de preformas está dividido en las siguientes fases:

- Secado del granulado hasta lograr que el contenido de humedad sea menos de 40 ppm.
- Fusión del polímero en un equipo de inyección, utilizando un husillo diseñado especialmente para PET.
- Inyección del material dentro de las cavidades del molde que normalmente es de colada caliente.
- Enfriado rápido del material dentro del molde para obtener piezas transparentes.
- Apertura del molde y expulsión de las preformas.

Durante el moldeo de la preforma se deben controlar los siguientes aspectos:

- Retención de la viscosidad intrínseca.
- Generación mínima de acetaldehído.
- Transparencia máxima de la preforma.

El PET ofrece un buen rendimiento en cada una de las etapas del proceso. Sin embargo, las ventajas principales inherentes pueden quedar destruidas durante la inyección de la preforma si no se tiene una buena operación. Los moldes se deben enfriar con agua lo más rápido posible. En el proceso de un paso, la temperatura del líquido de enfriamiento debe ser menor a 5°C para evitar que las preformas se vuelvan nebulosas y pierdan propiedades mecánicas.

Las temperaturas de fusión de 280 a 300°C son apropiadas para el procesamiento del PET. En este rango se forma acetaldehído, que es un gas con punto de ebullición de

20.8°C y olor a frutas. Un contenido elevado de este gas puede modificar el sabor del producto que se envase. Se debe procurar que el nivel de acetaldehído formado sea de 3 ppm como máximo, esto se puede lograr minimizando el tiempo que el PET está en estado de fusión.

Recalentamiento y biorientación de preformas.

Las preformas se sacan del molde y se enfrían a temperatura ambiente, cuando el proceso es de dos pasos. Se pueden almacenar o enviar por medio de una banda transportadora a la máquina de estirado-soplado para su biorientación y formación de botellas.

Las preformas se sujetan boca abajo y se transportan a través de la zona de calefacción reblandeciéndose a una temperatura de 90 a 95°C. Posteriormente se pasan a la zona de soplado donde están los moldes que darán la forma final a la botella. En éstos, una vez ya cerrados, las preformas se estiran con un pistón graduable y simultáneamente se soplan hasta tomar la forma de la botella.

Los pistones de dilatación impulsados por aire comprimido garantizan la formación simétrica de las botellas y su estiramiento, logrando una distribución óptima del espesor de la pared. El proceso de soplado se controla por el volumen y la presión del aire.

Posterior al soplado, se abren los moldes y mediante los mandriles de transporte, las botellas se pasan a la zona de descarga.

En la operación de la máquina de soplado las principales variables que deben controlarse son:

- Temperaturas: del plástico fundido en las zonas del plastificador, así como en el molde para optimizar la temperatura de soplado.

- Presión de inyección y sostenimiento durante la etapa de inyección así como la presión de soplado.
- Tiempo de inyección, sostenimiento, enfriamiento, soplado y enfriamiento de la pieza terminada.
- Desplazamientos principalmente la dosificación del material dentro del plastificador.

2.3.1.4. Molde de soplado.

La fabricación de la pieza se efectúa en el molde de soplado que ha de generar las dimensiones finales del producto, por tanto, se debe buscar un diseño que proporcione un equilibrio de resistencia, productividad y calidad del artículo producido.

Entre los materiales que comúnmente se disponen para la construcción de moldes de soplado se encuentra el aluminio, aleaciones de aluminio, acero, aleaciones de cobre berilio, hierro y aleaciones de zinc.

Para el enfriamiento del molde comúnmente se recomienda utilizar agua, ésta debe de contar con un sistema de desmineralización y dependiendo de las condiciones atmosféricas un sistema de deshumidificación. De manera general la temperatura de enfriamiento de los moldes enfriados con agua es entre 4 y 20°C, pero cuando se trabaja a menores temperaturas debe evitarse la condensación de la humedad en las paredes del molde.

2.3.1.5. Equipos adicionales.

El equipo periférico básico utilizado para un proceso de soplado es el sistema de enfriamiento (chiller) y el sistema de suministro de aire (compresor), los cuales se revisarán en capítulos posteriores.

En la tabla 2.4 se puede observar el rango de temperaturas de operación que utilizan los equipos adicionales.

Equipo	Aplicación	Rango de uso
Chiller	Enfriamiento del molde de soplado	8 – 12°C
Compresor.	Soplado del envase	35 – 40 bar (0.86 – 1.0 MPa)

Tabla 2.4. Equipos periféricos para soplado

2.3.1.6. Parámetros de selección.

Los factores importantes que se deben considerar al comprar una máquina sopladora de botellas de PET son los siguientes:

- Inversión del capital inicial.
- Costo de incrementar la producción aumentando maquinaria.
- Opción de fabricar o comprar preformas.
- Espacio requerido para el almacenaje y maquinaria.
- Flexibilidad para los cambios de tamaño y forma de botella.
- Eficiencia de la operación.
- Costo de moldes.
- Tiempo de instalación.
- Capacidad de optimización del diseño de la preforma.

2.3.2. Compresores de alta presión.

El sistema principal para la fabricación de envases de PET es el sistema de soplado, sin embargo un equipo auxiliar muy importante para dicho sistema es el compresor de aire de alta presión, pues sin él no puede darse el proceso de soplado de botellas.

El sistema de suministro de aire, es necesario para abastecer aire con el volumen y la presión adecuada para asegurar que la sopladora trabaje en buenas condiciones.

Por lo cual, a continuación se van a exponer algunos conceptos y criterios para la selección del compresor de aire que se seleccionará para la línea de fabricación de envases de PET.

2.3.2.1. Generalidades.

Un compresor es una máquina que eleva la presión de un fluido. Los fluidos pueden ser un gas, un vapor o una mezcla de ellos; a través del compresor se reduce el volumen específico del fluido logrando una mayor presión por medio de un cilindro o un pistón.

Los compresores, comparados con turbo sopladores y ventiladores centrífugos o de circulación axial, en cuanto a la presión de salida, se clasifican como máquinas de alta presión, mientras que los sopladores y ventiladores se consideran de baja presión.

Los compresores de alta presión se emplean para aumentar la presión de una diversa variedad de gases y vapores para un gran número de aplicaciones. Algunas aplicaciones comunes son: el compresor de aire para el transporte, pintura a pistola, inflado de llantas, limpieza, las herramientas neumáticas y las perforadoras. Otros compresores son aplicados en la refrigeración para comprimir el gas del vaporizador o en procesos químicos para la conducción de gases.

2.3.2.2. Clasificación de compresores.

Los compresores pueden clasificarse en dos grupos principales:

- Desplazamiento positivo
- Dinámicos.

Compresores de desplazamiento positivo.

Son máquinas en la que se confinan sucesivamente volúmenes definidos de aire dentro de un espacio cerrado, y se aumenta su presión reduciendo el volumen de espacio cerrado. Este grupo comprende tanto a los compresores de tipo recíprocante como los del tipo rotatorio.

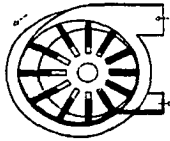
Compresores dinámicos.

Son máquinas en las cuales se comprime el aire mediante un miembro rotatorio que imparte presión y velocidad al medio compresible. Por acción difusora, la energía de velocidad es transformada en energía de presión. Los compresores de este tipo comprenden a los centrífugos, los axiales y a los de flujo mixto.

También es posible dividir los tipos de compresores en grupos de acuerdo con el género de gas que se desplaza, tipo de transmisión, o por la aplicación para la que fueron diseñados.

En la figura 2.18 se muestra gráficamente ejemplos de compresores dinámicos y de desplazamiento positivo.

Compresor Dinámico
(Compresor Rotatorio)



Compresor de Desplazamiento Positivo
(Compresor Reciprocante)

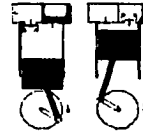


Fig. 2.18. Ejemplos de compresores

2.3.2.3. Criterios para seleccionar un compresor.

Las dos principales variables que se deben tomar en cuenta para la selección de un compresor son: la presión y el volumen.

En función de estas dos variables se puede establecer lo siguiente:

En términos generales, puede decirse que cuando se requieren grandes volúmenes de aire a presiones bajas, alrededor de 1 bar, se aplican los llamados ventiladores o abanicos.

Para capacidades de presión hasta de 4 bar y flujo de hasta 15000 m³/ min, se aplican los compresores rotatorios o sopladores.

Los compresores rotativos de desplazamiento positivo se utilizan para producir aire comprimido para usos industriales, y presiones de hasta 30 bar.

Los compresores reciprocantes o compresores de pistones se utilizan para producir aire comprimido a presiones mayores de 30 bar, y se puede aumentar la presión aumentando el número de etapas de compresión.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

El compresor que se requiere para la línea de producción de envases PET, debe proporcionar una presión de soplado con un rango de presión alto, entre 35 y 40 bar, así como un volumen alto de aire, superior a 1000 m³/hr; adicionalmente se debe asegurar suministrar aire limpio (libre de aceite y humedad) debido a que las botellas de PET que se producirán en la línea serán grado alimenticio.

Los ventiladores o abanicos, debido a su manejo bajo de presión y volumen de aire, no pueden ser considerados para instalaciones industriales que requieren de mediana o alta presión.

Los compresores rotativos pertenecen a la clase de máquinas volumétricas. Los más difundidos son los compresores rotativos de placas, por ser de baja presión deben descartarse como una alternativa para el proceso de producción de botellas de PET.

Debido a la demanda de presión del orden de 35 a 40 bar y al volumen de aire alto requerido la mejor opción para una sopladora de envases de PET es un compresor recíprocante.

2.3.2.4. Compresores recíprocantes.

Para los fines de este trabajo, se analizará solamente, en forma breve, el funcionamiento de los compresores recíprocantes, debido a que por el volumen que suministran y la presión de aire que proporcionan, son los adecuados para el sistema de soplado de botellas de PET.

De los compresores de desplazamiento positivo, los recíprocantes son los más conocidos y los de uso más extendido. Estos compresores trabajan según el principio de la conocida bomba de aire para bicicleta, es decir, utilizando el aire que comprime un émbolo que se desplaza en el interior de un cilindro. Cuando el émbolo se mueve hacia el extremo cerrado del cilindro, comprime el aire en un espacio más pequeño, elevando por ello su presión.

El movimiento de rotación que se imprime al eje de compresor, generalmente por medio de un motor eléctrico, es transformado en un movimiento recíprocante mediante un cigüeñal y una biela. Uno de los extremos de la biela está sujeto al cigüeñal mediante un perno, y el otro a un cruceta que hace el movimiento.

Al entrar al cilindro, el aire puede ser comprimido desde la presión inicial de succión hasta la presión final de descarga deseada, en un solo paso continuo termodinámico y mecánico. A esto se le conoce como compresión en un solo paso. En cambio, a veces es necesario efectuar una parte del incremento de compresión deseado, en un cilindro, enfriar el aire en un intercambiador de calor exterior al cilindro, y utilizar luego un segundo cilindro para comprimir el aire enfriado hasta la presión final de descarga deseada. A ésta se le conoce como compresión en dos pasos o en dos etapas. Dependiendo de la relación de la presión final a la presión inicial, puede haber varios pasos de compresión y de enfriamiento.

La figura 2.19 muestra las disposiciones típicas de los cilindros en compresores recíprocentes.

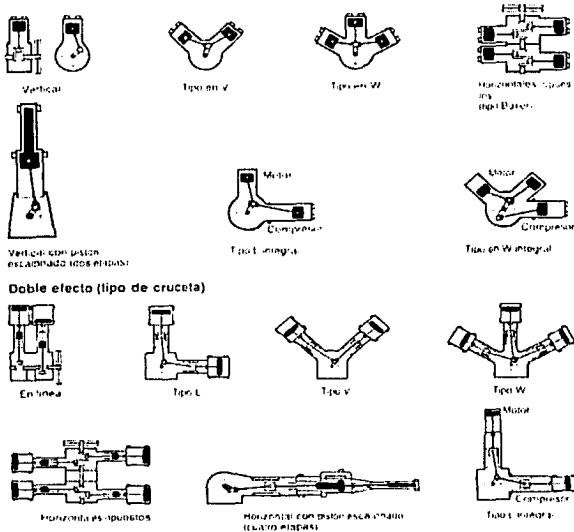


Fig 2.19 Disposiciones típicas de los compresores

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Regulación de los compresores reciprocantes.

El aire comprimido se requiere, por lo general, en cantidades variables y a una presión relativamente constante. Como consecuencia se han desarrollado sistemas de regulación para ajustar la entrega del compresor a las necesidades de aire del sistema de utilización.

Hay tres aspectos relativos a la regulación que están íntimamente ligados entre sí, y que son:

- Los métodos de descarga.
- Los tipos de control.
- Los pasos de control.

Los anteriores se combinan para formar el sistema de regulación del compresor.

Métodos de descarga.

- **La regulación en la válvula de admisión:** es la forma más común de regulación de la descarga de un compresor de aire; se utiliza un dispositivo que mantiene abierta la válvula de admisión cuando no hay demanda de aire del compresor. Estando abierta la válvula de admisión de los cilindros, el aire los recorre simplemente hacia adentro y hacia afuera al moverse el émbolo dentro del cilindro.
- **Cierre total:** es un método de regulación mediante el cual se interrumpe la admisión al compresor, cerrando totalmente la admisión de aire. Este sistema de regulación, que se emplea únicamente en las unidades de compresión en varios pasos, es un sistema de transición suave a las condiciones de carga y de descarga.

- **Desvío:** que se usa en las aplicaciones del aire comprimido a procesos; no controla directamente la operación del compresor, sino que más bien lo deja trabajar a plena carga en forma continua, y desvía el aire que no es necesario, de la descarga hasta la admisión.

Tipos de control.

- **Control de velocidad constante:** es la denominación que se aplica a un sistema en el cual, el motor del compresor lo acciona en forma continua a su velocidad normal de trabajo, y la regulación de la entrega del compresor se logra utilizando uno de los métodos de descarga antes descritos.

En su forma más simple, este control consta de un dispositivo completamente neumático que, a medida que aumenta la presión en el recipiente o en el sistema, aplica presión de aire al sistema de descarga, para accionar neumáticamente el tipo de descargador usado en el compresor. Al ocurrir un descenso de la presión, ese mismo dispositivo alivia la presión en el sistema de descarga, dejando que vuelva a cargar el compresor.

El tipo de control más común utiliza un sistema electroneumático, en el que la presión existente en el sistema es guiada a un interruptor de presión, el cual, a su vez, controla una válvula de solenoide de tres vías. Al aumentar la presión, la válvula aplica presión de aire al sistema de descarga, y cuando disminuye la presión, deja escapar el aire del sistema de descarga y permite que vuelva a cargar el compresor. En todas las formas de control electroneumático, los controles están dispuestos, por lo general, de manera que al ocurrir una falla de fuerza, el compresor queda descargado.

- **El control de arranque-paro:** es un refinamiento del control de velocidad constante, y utiliza el principio electroneumático para regular la carga y la descarga del compresor. Este tipo de control se usa generalmente en los

compresores pequeños y en los compresores portátiles, aunque también se emplea en compresores grandes cuando la demanda de aire, en general, es menor del 50 % de la capacidad del compresor.

- **El control dual:** es una combinación de los dos controles anteriores, y a opción del operador, puede usarse el control de velocidad constante o el control de arranque-paro. Se aplica este sistema cuando hay variaciones de demanda en el sistema de utilización.

Pasos de control.

En los compresores grandes, la demanda de aire generalmente es menor que la capacidad del compresor a plena carga, y para lograr uniformidad en la demanda y reducción de los cargos por demanda eléctrica, se ofrece el control en varios pasos.

La menor eficiencia de los motores a la mitad, y a las tres cuartas partes de su carga, ocasiona, desde luego, un aumento de la potencia requerida para accionar el compresor, para una demanda de aire dada.

La mayoría de los compresores trabajan bajo lo que se conoce como "control de dos pasos", el cual es de conexión-interrupción. En este sistema, todo el compresor está trabajando, a plena carga, y en vacío.

Una variación del control anterior puede ser el control de tres pasos, o sea, a plena carga, a media carga y en vacío; otra variación es el control de cinco pasos, en el que se tiene: plena carga, tres cuartas partes de la carga, media carga, una cuarta parte de la carga y vacío.

El número de pasos puede ser tan grande como elementos controlables haya en el compresor. Generalmente los compresores de dos cilindros y dos etapas, trabajan bajo control de dos o de tres pasos, aunque, mediante la combinación de varios métodos de

control, y la introducción de pasos de holgura, es posible lograr la operación bajo control de cinco pasos.

Aire comprimido libre de aceite.

El compresor recíprocante estándar tiene sus cilindros lubricados por aceite, característica que ocasiona que el aire producido tenga, por lo general, cierta cantidad de aceite en suspensión, en forma de partículas muy pequeñas.

Para la generalidad de los usos industriales, el contenido de aceite del aire comprimido no es perjudicial, sino que es benéfico para las máquinas y herramientas accionadas. Sin embargo, para ciertos procesos industriales como: el soplado de botellas de PET, presurización de recintos en los que hay personas respirando el aire y para otras aplicaciones especiales, el contenido de aceite en el aire comprimido es indeseable y a veces intolerable. En tales casos encuentra su aplicación el aire comprimido libre de aceite.

2.3.2.5. Selección del sistema más adecuado.

El sistema de compresor de alta presión para el soplado de botellas de PET debe proveer una presión de soplado con un rango de aproximadamente 35 bar, así como adecuarse a los requerimientos específicos de la sopladora, con un diseño robusto, fácil de fabricar y de alto rendimiento. Los principales requerimientos que deberá cumplir el equipo compresor son:

- Caudal efectivo de acuerdo a la sopladora seleccionada.
- Presión del aire a la salida del compresor con un rango de 35 a 40 bar.
- Equipo de línea, sin modificaciones o alteraciones al diseño original.
- Alta calidad del aire, libre de contaminación y partículas suspendidas.
- Mínima humedad del aire.
- Aire suministrado 100% libre de aceite

- **Alta confiabilidad**

Adicionalmente, el equipo que se seleccione debe asegurar:

- **Alta eficiencia de incremento de presión del aire:** normalmente a mayor número de etapas del compresor, se incrementa la eficiencia.
- **Bajo consumo de energía:** 75% del costo de operación de un compresor de aire es el relacionado con la energía eléctrica, por lo que el equipo seleccionado deberá buscar el costo más bajo de operación.
- **Confiabilidad a largo plazo:** el equipo seleccionado deberá asegurar un funcionamiento adecuado a largo plazo, debido a que la sopladora está destinada para alimentar a la línea directamente, y cualquier paro en este sistema, detendría la operación de llenado, con las consecuentes pérdidas económicas.
- **Aire 100% libre de aceite:** debido a que el compresor suministra aire para un sistema relacionado con la alimentación humana; es indispensable asegurar la limpieza de aire, principalmente de aceites que puedan contaminar las botellas PET.
- **Bajo costo de mantenimiento:** se debe buscar un equipo, que sea lo suficientemente robusto; que su diseño de componentes asegure un costo de mantenimiento bajo.
- **Facilidad de mantenimiento:** las rutinas de mantenimiento no deben requerir de herramientas especiales, o de especialistas, para reducir el costo de mantenimiento, así como aumentar la disponibilidad del equipo.

Aunque actualmente la línea de llenado tiene una eficiencia de 85%, y debido a las actividades de preparación de la línea da una utilización diaria de 21.35 hr para 305 días laborales al año, el compresor seleccionado deberá estar preparado para un funcionamiento continuo de 24 horas al día y 365 días al año, en caso de que se requiera producir material para ser almacenado o para apoyar otras líneas de llenado.

De igual forma, se requiere que el compresor pueda ser adquirido o en su caso ser compatible con dispositivos de seguridad, motor eléctrico, equipo de arranque y protección, refrigerador final, depósito de acumulador de aire y secador frigorífico.

Opcionalmente, se requiere que el compresor pueda integrarse con filtros cerámicos, filtros submicrónicos o filtros de carbón activo y torre de enfriamiento, si es un compresor enfriado por agua.

2.3.2.6. Consideraciones especiales para el cálculo de un compresor.

La producción y consumo de aire comprimido es un proceso que consiste en tomar una determinada cantidad o masa de aire en las condiciones de presión del medio ambiente y, por medio de máquinas compresoras, elevar su presión al valor requerido y entregarlo para su consumo. Este proceso se realiza aprovechando las propiedades físicas de los gases perfectos o ideales. El gas ideal es aquel que no sufre alteraciones o cambios químicos cuando es sometido a cualquier valor de temperatura y presión. El aire, a presiones moderadas y temperaturas alejadas de su punto crítico, se considera un gas ideal.

Para todas las aplicaciones industriales donde se requiere de aire comprimido, las presiones son moderadas, por lo tanto, para el cálculo de la cantidad de aire que se requiere a la entrada del compresor se aplican las leyes de los gases ideales.

Debido a que el insumo del proceso de compresión es el aire ambiental, las necesidades de aire y por lo tanto, las características del equipo compresor, se deberán

determinar en función de la cantidad de masa de aire libre que deberá suministrar el compresor, es decir, se deberá determinar la cantidad de aire atmosférico que debe entregar el compresor en el punto de su utilización.

2.3.2.7. Selección del tipo de compresor más adecuado.

De acuerdo a todo lo anterior, y habiendo analizado las diferentes alternativas comerciales, se seleccionará un compresor de 4 etapas, pues asegura una operación eficiente en lo que a elevación de presión se refiere. Por otro lado dicho compresor será de tipo Boxer, ya que el mantenimiento en este tipo de compresor se realiza fácilmente, dado que su disposición permite un fácil acceso a las partes críticas que deben inspeccionarse, disminuyendo considerablemente los costos de mantenimiento.

2.3.3. Sistemas de enfriamiento y acondicionamiento térmico en la industria de la transformación del plástico.

2.3.3.1. Introducción.

Un requisito prácticamente indispensable para hacer posible la transformación de los plásticos a artículos útiles, es la de elevar la temperatura de éstos hasta el punto donde pueden moldearse para obtener el producto deseado. Comúnmente se maneja para este propósito temperaturas que van desde 180°C a 300°C, existiendo también la necesidad de volver a reducir esta temperatura a niveles de entre 30°C a 100°C, dependiendo del material utilizado, para tener el producto en estado sólido. El sistema de enfriamiento tiene un papel muy importante, ya que la velocidad de eliminación de calor determina la rapidez con que puede obtenerse una pieza e iniciar el soplado de una nueva.

Adicionalmente, se requiere mantener bajo temperaturas controladas ciertas partes de las máquinas de proceso, como la garganta de alimentación en inyectoras, extrusoras o sopladoras, así como el aceite en inyectoras, el compresor de aire de sopladoras y

otras máquinas que realizan movimientos mediante sistemas hidráulicos. Los equipos de enfriamiento más empleados son principalmente los *chillers* y las torres de enfriamiento.

2.3.3.2. Parámetros a considerar en la selección de un sistema de enfriamiento.

La selección adecuada de un sistema de enfriamiento para un proceso específico ayuda en gran medida a hacer más eficiente la operación. Los parámetros que se deben considerar para la selección de un sistema de enfriamiento son los siguientes:

a) Temperatura requerida del agua o fluido de enfriamiento.

Dependiendo del uso, la temperatura requerida del agua o fluido de acondicionamiento térmico se puede encontrar dentro de alguno de estos tres rangos:

- De -6°C a 12°C , se requiere el uso de equipos enfriadores de líquido, comúnmente conocidos como *chillers*, que ofrecen temperaturas en este rango y son utilizados en casi todos los procesos de soplado e inyección.
- De 15°C a 30°C , se recomienda el uso de una torre de enfriamiento. El ejemplo común, en el proceso del soplado, es para mantener al compresor de aire a una temperatura adecuada de operación y asegurar el buen funcionamiento del mismo.
- De 20°C a 180°C , para este rango de temperatura los termostatos calientan y controlan la temperatura del medio refrigerante para los moldes de los procesos de transformación de plásticos. Existen diferentes clases según el rango deseado de temperaturas y pueden encontrarse termostatos que funcionan con agua y otros que lo hacen con aceite. En este último tipo, es posible obtener temperaturas del fluido de enfriamiento superiores a los 180°C .

El empleo de estos equipos es muy importante en el procesamiento de plásticos técnicos.

Los equipos mencionados anteriormente pueden encontrarse interrelacionados o trabajar de manera independiente en una planta productiva.

b) Cantidad de calor a retirar.

La cantidad de calor que se debe de retirar es otro factor importante para una adecuada selección del equipo de enfriamiento, dependiendo generalmente de las dimensiones del producto a enfriar y del tipo de plástico. El calor a eliminar se puede calcular mediante la ecuación 2.1.

$$Q = m C_p (T_2 - T_1) \quad [\text{Ecuación 2.1}]$$

Donde:

Q =	Cantidad de calor por unidad de tiempo	[kcal / hr]
m =	Masa de material que se procesa por unidad de tiempo	[kg / hr]
C _p =	Calor específico del material	[Kcal / kg °C]
T ₂ =	Temperatura de fusión del plástico	[°C]
T ₁ =	Temperatura de desmoldeo del plástico	[°C]

c) Influencia del medio ambiente.

Otro factor a considerar en la selección de un sistema de enfriamiento es el contacto del fluido de acondicionamiento térmico con el medio ambiente, encontrándose sistemas abiertos y cerrados.

Las torres de enfriamiento son sistemas abiertos, donde si no se aplica un tratamiento adecuado, el agua puede contaminarse y generar problemas de incrustaciones en los

conductos de circulación. Por su parte los *chillers* y los termorreguladores son considerados como sistemas cerrados donde el fluido de transferencia térmica no está expuesto al medio ambiente y es poco probable que se contamine, conservando en mejores condiciones los conductos por donde circule.

La temperatura del medio de enfriamiento y la cantidad de calor que se debe de retirar, son los parámetros más importantes a considerar para la selección de un sistema.

2.3.3.3. Torres de enfriamiento.

Una torre de enfriamiento es un sistema abierto de intercambio de calor donde se ponen en contacto directo una corriente de agua y una corriente de aire.

Existen algunos términos importantes que deben de ser mencionados para comprender el funcionamiento de estos equipos:

- **Temperatura de bulbo húmedo (TBH):** esta temperatura está determinada por la temperatura del medio ambiente y la humedad relativa; TBH siempre es menor, excepto si la humedad es del 100% cuando se igualan. La temperatura del agua fría que se obtiene en una torre de enfriamiento, depende de la temperatura de bulbo húmedo.
- **Temperatura de aproximación o acercamiento:** es la diferencia entre las temperaturas del agua de salida de una torre de enfriamiento y la de bulbo húmedo del ambiente.
- **Rango de enfriamiento o intervalo:** es la diferencia de temperaturas del agua entre la entrada y la salida de la torre de enfriamiento.

- **Flujo:** se refiere a la cantidad de agua que circulará en el equipo durante cierto lapso. Es la variable fundamental para la selección de una torre de enfriamiento; se expresa en m^3/hr .
- **Arrastre:** es la pérdida de agua en forma de gotas descargadas a la atmósfera, debido al contacto con el aire circulante. Este tipo de pérdidas es adicional a aquellas ocasionadas por la evaporación, la cual puede ser minimizada a través de un buen diseño de la torre de enfriamiento.
- **Agua de repuesto o reposición:** es el agua requerida para reemplazar las pérdidas totales por evaporación, arrastre, fugas o purgas.

Por lo general, en la mayoría de las torres de enfriamiento, la temperatura de acercamiento o aproximación es de 2 ó 3°C. Los principales componentes de una torre de enfriamiento se muestran en la figura 2.20.

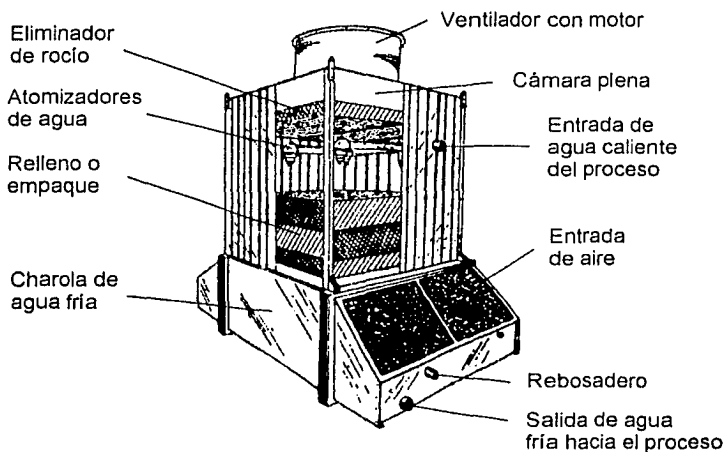


FIGURA 2.20. Principales componentes de una torre de enfriamiento.

El agua proveniente del proceso ingresa a la torre de enfriamiento donde se divide en gotas diminutas que incrementan la superficie de contacto con una corriente de aire que se encarga de absorber el calor de éstas, provocando así su enfriamiento.

La atomización del agua de proceso se puede efectuar mediante espreas, las cuales pueden permanecer fijas o presentarse en series rotativas para distribuir de manera uniforme el agua sobre la superficie del relleno o empaque.

La película exterior de las gotas se evapora, por lo que existen pérdidas que deben ser repuestas. La mayoría de los fabricantes incorporan eliminadores de rocío que reducen las pérdidas por arrastre.

En el diseño de una torre de enfriamiento se pretende que las gotas permanezcan el mayor tiempo posible expuestas al aire, por lo que la altura de la torre, interposición de obstáculos y el relleno, cumplen dicha función.

En la figura 2.21 se muestra el relleno o empaque de una torre de enfriamiento, el cual genera la formación de una película de agua muy delgada, facilitando el proceso de enfriamiento.



FIGURA 2.21. Relleno de una torre de enfriamiento.

El agua enfriada se acumula en la charola, de donde puede ser bombeada hacia el área de proceso para continuar con el ciclo. Para facilitar y asegurar la reposición de agua al sistema, se recomienda incorporar una cisterna donde se almacena el agua fría proveniente de la charola y de donde se bombea hacia el proceso.

El aire que descarga una torre de enfriamiento tiene un contenido de humedad que normalmente alcanza el 95%.

A menor humedad del aire que ingresa a la torre, mayor será su capacidad disponible y menor la temperatura del agua enfiada. Por tal motivo, las torres de enfriamiento deben de ubicarse en espacios abiertos con la suficiente ventilación que permita siempre trabajar con aire fresco y evitar la recirculación de vapor desde la descarga hacia la entrada del sistema.

Los materiales con los que se construyen las torres de enfriamiento deben de asegurar que su vida útil no sea reducida por la exposición a los agentes ambientales.

Clasificación de las torres de enfriamiento.

Las torres de enfriamiento de forma general pueden agruparse según su forma de operación en:

- Torres de enfriamiento atmosféricas.
- Torres de enfriamiento de tipo mecánico.

Las torres de tipo mecánico son las que se utilizan principalmente en la industria de la transformación del plástico y se dividen a su vez, según la forma de introducir el aire, en circulación forzada y en circulación inducida.

En las torres mecánicas de circulación forzada, figura 2.22, se tiene suministro de aire controlado con los ventiladores que están normalmente localizados al nivel del suelo, lo cual facilita su inspección y mantenimiento.

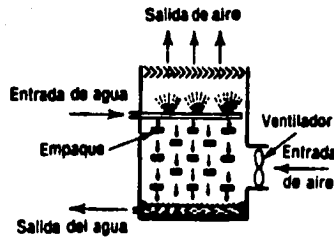


FIGURA 2.22. Esquema de una torre de enfriamiento de circulación forzada

En las torres mecánicas de circulación inducida, figura 2.23, los ventiladores se montan en la parte superior de la torre, con lo que se logra una considerable mejoría en la distribución de aire dentro de la torre; los eliminadores de arrastre reducen los requerimientos de agua de repuesto; las espumas de rocío o atomizadores, los tubos de descenso; los platos y las barras difusoras aseguran una gran superficie para la evaporación del agua con máximas velocidades volumétricas de transferencia de calor.

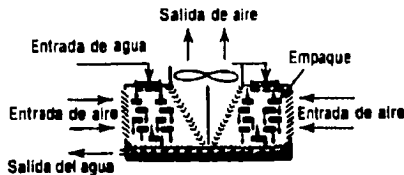


FIGURA 2.23. Esquema de una torre de enfriamiento de circulación inducida

Por el hecho de que las torres de enfriamiento deben de ubicarse a la intemperie, puede generarse el ingreso de impurezas arrastradas con el aire y la formación de algas en el sistema. Además pueden concentrarse sales, provocando que el circuito de agua vaya endureciéndose por lo que se recomienda adicionar tratamientos anti-

incrustantes que disminuyan los depósitos salinos y garanticen un flujo adecuado en el sistema.

Criterio de selección de una torre de enfriamiento.

Los fabricantes de torres de enfriamiento proporcionan las curvas de su funcionamiento, figura 2.24, donde se muestra la temperatura de agua fría que se puede alcanzar en función del flujo y de la temperatura de bulbo húmedo. La selección de una torre de enfriamiento es fundamentalmente un problema que depende del flujo de agua por enfriar, aun cuando existe la influencia de la temperatura de acercamiento, intervalo y temperatura de bulbo húmedo (Marks, Manual del Ingeniero Mecánico, Segunda edición en español).

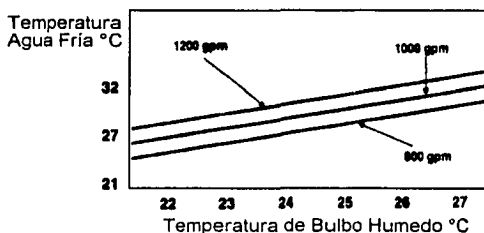


FIGURA 2.24. Curvas de funcionamiento de una torre de enfriamiento.

2.3.3.4. Chillers.

El *chiller* es un equipo de enfriamiento muy común en el sector de inyección, extrusión, soplado y termoformado del plástico, el cual, por medio de un sistema de refrigeración basado en freón o gases similares, remueve con gran eficiencia el calor. Estos equipos son un sistema de enfriamiento para el agua o fluido que se utiliza para reducir la temperatura de equipos y moldes de plásticos en procesamiento.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

El agua o fluido que se utiliza trabaja en rangos que van generalmente de los -6°C a los 12°C dependiendo de los requerimientos del sistema. Por lo general, al agua del sistema se le agregan anti-congelantes con lo que se pueden lograr las temperaturas bajas.

De forma general, los *chillers* se integran con los siguientes componentes principales: compresor, condensador, válvula de expansión y evaporador, (que se muestran en la figura 2.25); adicionalmente también cuentan con: filtro deshidratador, medidor de presión de alta y baja, ventiladores, visor de líquido y bomba de agua.

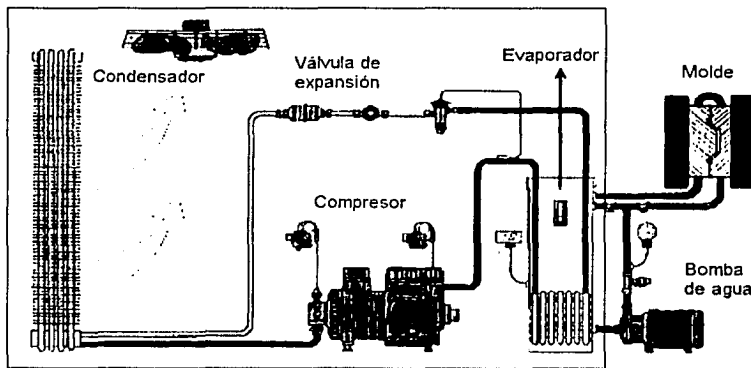


FIGURA 2.25. Diagrama de un Chiller.

Un sistema de enfriamiento con el uso de un *chiller* se compone principalmente de dos circuitos: el primero que transporta al agua o fluido de enfriamiento que debe circular por los conductos del molde o por las partes que desean enfriar, y el segundo que transporta un compuesto refrigerante.

Dentro del primer circuito, el fluido de enfriamiento a baja temperatura llega al molde o equipo que se desea enfriar y absorbe el calor reduciendo la temperatura del equipo o molde. Posteriormente el fluido de enfriamiento, ya a mayor temperatura pasa a un tanque donde entra en contacto con un serpentín metálico denominado evaporador que

conduce al refrigerante, comúnmente freón en estado líquido-vapor. El refrigerante absorbe rápidamente el calor del fluido de enfriamiento, evaporándose dentro del serpentín y bajando la temperatura del fluido, hasta dejarlo en condiciones de volver a circular por medio de una bomba al molde de procesamiento del plástico o al equipo que se desea enfriar.

Dentro del segundo circuito, el refrigerante en forma de vapor es sometido a una alta presión por un compresor, que a su vez sirve para conducir al vapor comprimido hasta un radiador en forma de banco de tubos conocido como condensador, el cual se encuentra sometido a una corriente de aire ambiental por medio de ventiladores, reduciendo la temperatura del compuesto refrigerante para dejarlo en forma de líquido. Posteriormente el refrigerante sufre una caída de presión, al paso por la válvula de expansión, y fluye al evaporador para volver a remover más calor del fluido de enfriamiento del proceso que también está continuamente circulando.

Tipos de chillers.

Los *chillers* se pueden clasificar por su movilidad en estacionarios y portátiles de donde estos últimos brindan amplia flexibilidad al poderse desplazar de un lugar a otro; generalmente son usados cuando se requieren bajas capacidades. Por su parte los estacionarios, como su nombre lo indica, permanecen en un solo lugar dando posiblemente servicio a varias máquinas y se utilizan principalmente para altas capacidades. Los *chillers* también se pueden clasificar en función de sus partes: por el tipo de compresor, evaporador y condensador.

Métodos de selección de un chiller.

Para seleccionar un *chiller* es necesario considerar las demandas térmicas del proceso, que dependerán de la velocidad de transformación del plástico. La selección de una unidad enfriadora se puede seleccionar por dos métodos.

a) Método de cálculo por el flujo de agua de enfriamiento.

Este método es útil en los casos que se tienen los datos de la cantidad de agua que se necesita para enfriar y la diferencia de temperatura requerida del fluido de enfriamiento. Se aplica la ecuación 2.1.

$$Q = m C_p (T_2 - T_1) \quad [\text{Ecuación 2.1}]$$

Donde:

Q =	Cantidad de calor por unidad de tiempo	[kcal / hr]
m =	Masa de agua que circula por unidad de tiempo	[kg / hr]
C _p =	Calor específico del agua	[Kcal / kg °C]
T ₂ =	Temperatura de salida del agua	[°C]
T ₁ =	Temperatura de entrada del agua	[°C]

Se calcula la masa de agua con base al flujo de agua requerido y la densidad del agua mediante la siguiente ecuación:

$$m = G \times \rho \quad [\text{Ecuación 2.2}]$$

Donde:

m =	Masa de agua que circula por unidad de tiempo	[kg / hr]
G =	Flujo de agua requerida	[m ³ / hr]
ρ =	Densidad del agua	[Kg / m ³]

La capacidad requerida del *chiller* en toneladas de refrigeración (T.R.) - que es el dato comercial de estos equipos - se calcula usando el factor de conversión de Kcal/hr a T.R. mediante la siguiente ecuación:

$$T.R. = Q / 3024 \quad [\text{Ecuación 2.3}]$$

Donde :

Q = Cantidad de calor [kcal / hr]
T.R.= Toneladas de Refrigeración [T.R.]

b) Método de cálculo por la cantidad y tipo de material moldeado.

Este método se basa en la cantidad de material que se procesa en la máquina y en la diferencia de temperaturas del plástico, desde la temperatura de fundido hasta la temperatura en que deja de estar en contacto con el medio de enfriamiento. Para usar este método se determina la cantidad de calor a eliminar en el plástico aplicando también la ecuación 2.1.

$$Q = m C_p (T_2 - T_1) \quad [\text{Ecuación 2.1}]$$

Donde:

Q = Cantidad de calor por unidad de tiempo [kcal / hr]
m = Masa de producto a enfriar por unidad de tiempo [kg / hr]
 C_p = Calor específico del plástico [Kcal / kg °C]
 T_2 = Temperatura de fusión del plástico [°C]
 T_1 = Temperatura de desmoldeo del plástico [°C]

De igual manera, la capacidad requerida del *chiller* en toneladas de refrigeración (T.R.), se calcula usando el factor de conversión de Kcal a T.R. mediante la ecuación 2.3.

2.3.3.5. Termorreguladores.

En los procesos de manufactura de partes plásticas, existen diversas ineficiencias en cuanto a la transferencia de calor desarrollada durante el enfriamiento del material moldeado. A través de un buen diseño del molde o herramental, esta limitante puede disminuir, permitiendo obtener productos con mejores propiedades así como un control dimensional más preciso.

Durante la inyección o el soplado de plásticos, es frecuente encontrar sistemas de enfriamiento de moldes que no proporcionan el grado apropiado de consistencia en su operación, por lo que en cada ciclo se presentan variaciones importantes de temperatura que afectan directamente a etapas más importantes del proceso: el enfriamiento y expulsión del molde de la pieza. Los problemas más comunes se refieren a distorsiones dimensionales de los productos, ausencia de cristalinidad, deficiente desempeño mecánico y algunos aspectos estéticos.

Para lograr adquirir las mejores propiedades durante la fase de enfriamiento y expulsión del molde, muchos materiales plásticos técnicos requieren temperaturas controladas en los moldes superiores a las que puede aportar un *chiller* o una torre de enfriamiento, por lo que se hace necesario el uso de termorreguladores. Las inyectoras y sopladoras de reciente fabricación cuentan con termorreguladores integrados.

Principales tipos de termorreguladores.

- **Termorreguladores de circuito abierto:** donde el fluido que circula en el molde está conectado a un sistema central de enfriamiento.

- **Termorreguladores de circuito cerrado:** cuando el medio de transferencia térmica circula sólo entre el molde y el propio termorregulador.

Según sea el fluido utilizado para el acondicionamiento térmico de los moldes, los termorreguladores pueden clasificarse en:

- **Termorreguladores base agua.**
- **Termorreguladores base aceite.**
- **Termorreguladores base agua presurizada.**

En todos los casos, los termorreguladores cuentan con una bomba que hace circular de manera continua al fluido de enfriamiento hacia el molde, un tanque sellado de calentamiento con resistencias eléctricas de inmersión empleadas para elevar la temperatura del fluido y un sensor que mide la temperatura en el fluido que circula por el termorregulador, figura 2.26.

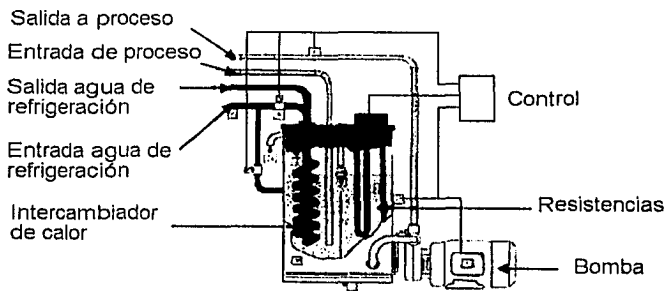


FIGURA 2.26 Esquema de un termorregulador.

Termorreguladores de circuito abierto de base agua.

En estos termorreguladores, el controlador de temperatura compara la lectura anterior con la ajustada por el usuario y, si la primera es menor, los calefactores son encendidos. Por el contrario, si la temperatura del fluido es superior a la ajustada, el

equipo ordena la apertura de una válvula que permite la salida del agua hacia el sistema central de enfriamiento y el agua caliente es reemplazada por agua fría proveniente de la línea de abastecimiento, la cual se encuentra permanentemente conectada al termostato. La adición del fluido frío hará descender la temperatura del líquido que circula por el molde, es decir no se mezclan el agua utilizada para enfriar el molde y el agua del sistema central.

Termostatos de circuito cerrado base agua o aceite.

Estos termostatos trabajan básicamente de la misma manera; en su interior se encuentra un tanque que contiene al fluido determinado, el cual es recirculado entre los canales de refrigeración de la herramienta, sin conexión directa al sistema central de enfriamiento. En lugar de ello, emplean un intercambiador de calor en el tanque, que remueve el excedente al permitir el ingreso de agua fría desde el sistema central de enfriamiento.

Ventajas de los termostatos de circuito cerrado.

- Se puede utilizar un medio de enfriamiento distinto al agua que es empleada en el sistema central para calentar y enfriar el molde. Un ejemplo es el aceite como fluido de transferencia de calor del molde y el sistema central de agua para enfriar el aceite.
- En los termostatos de base aceite, se pueden alcanzar temperaturas del fluido superiores a las de la ebullición del agua.

Desventajas de los termostatos de circuito cerrado.

- La mayor desventaja de los sistemas cerrados consiste en tener un segundo intercambiador de calor, siendo el primero el molde. Esto significa que son

menos eficientes que los sistemas de circuito abierto para la extracción del calor; sin embargo, sin contar con el sistema central de enfriamiento adecuado, de ninguna manera será posible el acondicionamiento térmico de las herramientas de manera eficiente.

- En los termostatos de base aceite, se tienen mayores tiempos de ciclo y un control menos preciso de la temperatura en la superficie del molde, que el obtenido con sistemas base agua.

También existen equipos de control de temperatura que trabajan con fluidos sobrecalentados bajo presión: termostatos de circuito cerrado de base agua presurizada.

Las temperaturas máximas aproximadas que pueden alcanzarse en los fluidos de transferencia de los termostatos base agua, base agua presurizada y base aceite respectivamente, son de 80°C, 120°C y 180°C.

Adicionalmente, los termostatos pueden ser empleados para el precalentamiento y el recalentamiento de la herramienta, con el fin de optimizar los tiempos y la productividad de los arranques y reanudaciones de producción. Esto es una práctica recomendable en empresas con cambios frecuentes de moldes y que procesan materiales plásticos técnicos.

Para la selección del equipo de acondicionamiento térmico y en particular la de un termostato, debe de considerarse el siguiente concepto: al incrementar la temperatura del molde, no se busca calentar al material plástico, sino llevarlo a la temperatura de procesamiento idónea y así lograr la expulsión del molde en el menor tiempo posible y en las mejores condiciones.

Capítulo 3 Cálculo y selección de componentes.

3.1. Cálculo y selección del sistema de soplado.

3.1.1. Introducción.

El sistema de soplado que se utilizará para la producción de botellas de 600 ml de PET será un sistema de dos pasos, es decir un sistema que parte de la alimentación de preformas que se calientan y posteriormente se soplan en el interior de los moldes. Dichas preformas serán producidas por un proveedor externo a la Compañía Embotelladora.

El proceso que se utilizará para la producción de las botellas será el de soplado biorientado, esto debido a las características físicas y mecánicas que se obtiene en el producto final, de acuerdo a lo revisado en el apartado 2.3.1.

3.1.2. Cálculo de la sopladora.

El cálculo de la capacidad de la sopladora se hará con base en la producción de la línea 1, la cual debe producir 500 bpm.

Pasando esta cantidad a botellas por hora (bph) se tiene:

$$(500 \text{ bpm}) (60 \text{ min/hora}) = 30,000 \text{ bph}$$

Considerando un factor de seguridad del 20% que normalmente se utiliza en el sector del embotellado para el cálculo de capacidades de los equipos que suministran botella, se tiene:

$$(30,000 \text{ bph}) (1.20) = 36,000 \text{ bph}$$

De acuerdo a las especificaciones proporcionadas por los fabricantes de sopladoras, la nueva generación de este tipo de máquinas permite trabajar a una velocidad de 1530 botellas por cavidad, por lo que usando la ecuación 3.1:

$$NC = \text{Botellas por hora} / \text{Botellas por cavidad} \quad [\text{Ecuación 3.1}]$$

Donde:

NC = Número de cavidades requeridas para satisfacer la demanda.

Substituyendo valores se tiene:

$$NC = 36,000 / 1530 = 23.53 \text{ cavidades.}$$

Finalmente y de acuerdo a las características comerciales de los modelos existentes en el mercado, se selecciona un modelo de sopladora de 24 cavidades.

3.1.3. Selección del modelo de la sopladora.

Existen diversos modelos de sopladoras que pueden cumplir con los requerimientos de producción que se han calculado, pero para este caso se seleccionará la marca Sidel por las siguientes razones:

- Líder en el mercado mundial de soplado de botellas de PET.
- Soporte técnico local en México.
- Suministro garantizado en refacciones.

El modelo de sopladora que esta marca ofrece y que satisface los requerimientos de capacidad de 36,000 bph, es el modelo SBO24 de la Marca Sidel, la cual tiene una

capacidad de 36,720 bph. Las especificaciones técnicas de la sopladora seleccionada se muestran en la Tabla 3.1.

Número de moldes	24
Tipo de horno	Lineal
Consumo de electricidad	400 V
Consumo total de energía (kWh)	174
Agua para enfriamiento de los moldes	
Flujo mínimo (m ³ /h):	24
Temperatura máxima del agua:	12° C
Agua para enfriamiento del cuello de la botella	
Flujo mínimo (m ³ /h):	3
Temperatura máxima del agua:	20° C
Límites dimensionales	
Cuello de la preforma	Altura: 7 a 41 mm Diámetro interior: 22 a 48.5 mm
Botellas	Diámetro: 50 a 115 mm Capacidad: 0.2 l a 2.25 l.

Tabla 3.1 – Especificaciones del modelo de Sopladora SBO24 de Sidel

En la figura 3.1 se muestra el Modelo SBO24 de Sidel.

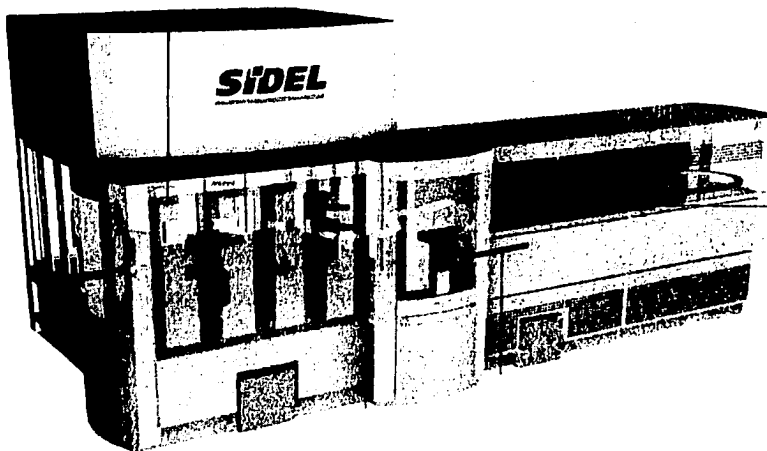


Figura 3.1. Modelo de Sopladora SBO24 de Sidel.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

3.2. Cálculo de requerimiento de caudal de aire y selección del compresor de alta presión.

3.2.1. Introducción.

Para el cálculo relacionado con el compresor, se tomará como referencia la sopladora SIDEL SBO 24 seleccionada. Dado que la presión de soplado está determinada por la sopladora, que en este caso es de 35 bar, el único dato que tendremos que calcular es el caudal efectivo, para seleccionar el compresor adecuado.

El compresor seleccionado deberá adicionalmente cumplir con las características descritas en el capítulo 2.3.2.5.

3.2.2. Cálculo de requerimiento de caudal efectivo.

Considerando que la sopladora seleccionada tiene una capacidad de 36,720 bph y dado que la línea 1 de embotellado se destinará para la presentación de 600 ml (0.6 l) se utiliza la ecuación 3.2 para calcular el caudal de soplado.

$$\text{Caudal de soplado} = \text{bph} \times \text{Vpb} \quad [\text{Ecuación 3.2}]$$

Donde:

bph = botellas por hora [unidades / hr]

Vpb = Capacidad de la botella [l / unidad]

Sustituyendo valores, se tiene:

$$\text{Caudal de soplado} = (36\,720 \text{ unidades / hora }) \times (0.6 \text{ l / unidad })$$

$$\text{Caudal de soplado} = 22,032 \text{ l / hr}$$

Que se puede expresar también como:

$$\text{Caudal de soplado} = 367.2 \text{ l / min}$$

De acuerdo con la sopladora seleccionada, la presión de soplado es:

$$\text{Presión de soplado} = 35 \text{ bar} = 35.44 \text{ kg/cm}^2$$

Para definir capacidad del compresor que alimentará a la sopladora, el suministro de aire se deberá establecer en función del volumen de aire libre suministrado, también denominado como caudal efectivo.

Para determinar el caudal efectivo que deberá suministrar el compresor para alimentar a la sopladora de PET, se utilizará la ecuación 3.3:

$$V_t = (V_s \times F_{el} \times F_T \times F_c \times F_{tu} \times F_{se}) + V_M \quad [\text{Ecuación 3.3}]$$

Donde:

V_t = Caudal efectivo	[l / min]
V_s = Caudal requerido para soplado de botellas de PET	[l / min]
F_{el} = Factor de elevación	[adimensional]
F_T = Factor de temperatura	[adimensional]
F_c = Factor de seguridad de aire en cuello	[adimensional]

F_{tu} = Factor de pérdida en tubería	[adimensional]
F_{se} = Factor de seguridad	[adimensional]
V_M = Caudal de aire de mando	[l / min]

V_s es el caudal requerido para soplado de botellas de PET. Está en función de la capacidad de las botellas (600 ml) y debe tener una presión de soplado (35 bar).

F_c , F_{tu} y F_{se} son factores significativos, que impactan el cálculo del caudal efectivo, debido a que introducen compensaciones debidas a pérdidas importantes y brindan adicionalmente el factor de seguridad en el cálculo. Estos factores son valores prácticos que dependen de las características de la instalación, de eventuales pérdidas por fugas y de los programas de mantenimiento preventivo y correctivo del sistema de suministro de aire a presión. Son factores establecidos en función de máxima tolerancia.

V_M es el caudal adicional necesario para operar mandos, válvulas y controles neumáticos. Es un valor proporcionado por el fabricante de la sopladora.

Cálculo de los factores de elevación y temperatura

Los factores **F_{el}** y **F_T** están relacionados con el sitio en el cual se ubicará la sopladora. Estos factores son determinados por las condiciones o valores de referencia establecidos en los manuales de los fabricantes y son definidos por las condiciones del sitio de trabajo de la sopladora.

Para calcular estos factores (**F_{el}** y **F_T**) utilizaremos la ecuación 3.4 de la ley de los gases perfectos:

$$\frac{P_t \times V_t}{T_t} = \frac{P_{Ref} \times V_{Ref}}{T_{Ref}} \quad [\text{Ecuación 3.4}]$$

Donde:

P_t = Presión de trabajo del compresor [kg / cm²]

V_t = Caudal de trabajo del compresor [l / min]

T_t = Temperatura de trabajo del compresor [K]

P_{Ref} = Presión de trabajo de referencia [kg / cm²]

V_{Ref} = Caudal de trabajo de referencia [l / min]

T_{Ref} = Temperatura de trabajo de referencia [K]

Los subíndices Ref se refieren a valores de referencia del fabricante y los subíndices t se refieren a los valores de trabajo.

despejando V_t se tiene:

$$V_t = \frac{T_t \times P_{Ref} \times V_{Ref}}{P_t \times T_{Ref}}$$

Agrupando, se tiene:

$$V_t = V_{Ref} \times (P_{Ref} / P_t) \times (T_t / T_{Ref}) \quad [\text{Ecuación 3.5}]$$

Haciendo:

$$P_{Ref} / P_t = \text{Factor de elevación} = F_{el} \quad [\text{Ecuación 3.6}]$$

$$T_t / T_{Ref} = \text{Factor de temperatura} = F_T \quad [\text{Ecuación 3.7}]$$

Es importante hacer notar que no hay una criterio universal de los valores de referencia o condiciones estándar de presión y temperatura. Para el cálculo que nos ocupa se considerarán como condiciones de referencia las siguientes:

$$P_{Ref} = 1 \text{ atm} = 1.033 \text{ kg / cm}^2$$

$$T_{Ref} = 273 \text{ }^\circ\text{K} = 0 \text{ }^\circ\text{C}$$

Para el cálculo del caudal requerido por la sopladora se empleará la ecuación de la Ley de Boyle, ecuación 3.8:

$$P_{Ref} \times V_{Ref} = P_s \times V_s \quad [\text{Ecuación 3.8}]$$

Donde:

$$P_{Ref} = \text{Presión de trabajo de referencia} \quad [\text{kg / cm}^2]$$

$$V_{Ref} = \text{Volumen de trabajo de referencia} \quad [\text{l / min}]$$

$$P_s = \text{Presión de entrada del aire comprimido} \quad [\text{kg / cm}^2]$$

$$V_s = \text{Caudal requerido para soplado de botellas de PET} \quad [\text{l / min}]$$

Para este caso, se puede afirmar que V_{Ref} y P_{Ref} se refieren al caudal de soplado (367.2 l/min) y a la presión de soplado que debe ser absoluta ($35.44 \text{ kg/cm}^2 + 1.033 \text{ kg/cm}^2 = 36.47 \text{ kg/cm}^2$), la presión de entrada del aire comprimido es la presión atmosférica (1.033 kg/cm^2).

Despejando V_s , tenemos

$$V_s = \frac{V_{Ref} \times P_{Ref}}{P_s} \quad [\text{Ecuación 3.9}]$$

Sustituyendo valores en la ecuación 3.9, se tiene:

$$V_s = (367.2 \text{ l/min}) \times (36.47 \text{ kg/cm}^2) / (1.033 \text{ kg/cm}^2)$$

$$V_s = 12,964 \text{ l/min}$$

Considerando que las condiciones de presión y temperatura de Tehuacán, Puebla. son:

$$\text{Presión } 1600 \text{ msnm} = 0.835 \text{ bar} = 0.8517 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{Temperatura de trabajo (temperatura máxima del lugar)} = 35 \text{ }^\circ\text{C} = 308 \text{ K}$$

Sustituyendo valores en las ecuaciones 3.6 y 3.7 para Tehuacán, Puebla, se tiene:

$$F_{el} = (1.033 \text{ kg/cm}^2) / (0.8517 \text{ kg/cm}^2) = 1.2128$$

$$F_T = (308) / 273 = 1.128$$

Se toman los factores **F_{se}**, **F_c** y **F_{tu}** y **V_m** de acuerdo a como los recomiendan los fabricantes de la sopladora:

$$F_{se} = 1.10$$

$$F_c = 1.003$$

$$F_{tu} = 1.006$$

$$V_m = 1700 \text{ l/min (dato proporcionado por el fabricante de la sopladora)}$$

Finalmente, sustituyendo todos los valores en la ecuación 3.3, se tiene:

$$V_t = (12,964 \text{ l/min}) \times (1.2128) \times (1.128) \times (1.003) \times (1.006) \times (1.10) + 1700 \text{ l/min}$$

$$V_t = 19,684 \text{ l/min.}$$

Redondeando:

$$\text{Caudal efectivo} = 20,000 \text{ l/min.}$$

Que también se puede expresar como:

$$\text{Caudal efectivo} = 20.0 \text{ m}^3 / \text{min.}$$

3.2.3. Selección del compresor.

Habiendo analizado las propuestas de varios constructores de compresores de alta presión, se ha seleccionado la alternativa propuesta por la compañía ABC, la cual además de ser una de las compañías líderes en el mercado de suministro de aire para sopladoras de botella de PET, ofrece la tecnología de compresores tipo Boxer, que se considera una buena opción para este proyecto.

ABC ofrece el modelo 4HA-6-BIS-LT, cuyo caudal efectivo es de $20.9 \text{ m}^3 / \text{min}$. Las características de este compresor se muestran en la tabla 3.2.

Caudal Efectivo	$20.9 \text{ m}^3 / \text{min}$
Velocidad	750 rpm
Consumo de electricidad	
Voltaje	440 V, 60Hz
Potencia	235 KW/h
Agua de enfriamiento	$17 \text{ m}^3 / \text{h}$
$T_2 - T_1$	10°C

Tabla 3.2 - Características del compresor 4HA-6-BIS-LT.

3.3. Selección del sistema de enfriamiento para el compresor de aire.

El compresor de aire seleccionado para la sopladora tiene los siguientes requerimientos especificados por el fabricante para su adecuado enfriamiento: flujo de agua $17 \text{ m}^3 / \text{hr}$ ($283.34 \text{ l} / \text{min}$) y una diferencia de 10°C entre la temperatura del agua de entrada y la salida del compresor de aire.

Como se mencionó en el capítulo 2, el equipo adecuado para el enfriamiento del compresor de aire es una torre de enfriamiento, y la selección de este equipo depende fundamentalmente del gasto de agua. Por lo que se propone el siguiente equipo comercial:

Torre de enfriamiento:	Tipo mecánica de flujo de aire inducido
Marca y modelo:	EVENFRI Modelo EVE-4-3-3.0
Capas de relleno:	3
Gasto nominal de agua a manejar:	312 litros por minuto
Temperatura aproximada de agua a la salida:	3°C > TBH
Carga de velocidad en la entrada y salida de los atomizadores:	$V_s = 6 V_E$
Diferencial máximo de temperatura entre la entrada y salida del agua:	18°C
Ventilador con motor eléctrico:	3.0 H.P, 3 fases, 60 Hz, 1750 rpm
Consumo:	2.24 Kw

Se propone la torre de enfriamiento de la marca EVENFRI ya que ésta cuenta con un importante posicionamiento en el mercado nacional y sus partes de refacción se consiguen fácilmente en el mercado.

Este modelo de torre de enfriamiento, tendrá una capacidad nominal adicional en el manejo del gasto de agua de 10% al requerimiento especificado para el enfriamiento del compresor de aire.

En la curva de funcionamiento de la torre de enfriamiento propuesta, figura 3.1, entrando con la temperatura de bulbo húmedo anual promedio (TBH_{PROM}) de Tehuacán, Puebla, de 25°C y el gasto requerido de 283.34 LPM, que está entre las curvas de gasto de 262 LPM y de 312 LPM, se puede ver que la torre de enfriamiento tendrá la capacidad de enfriar el agua de proceso a una temperatura estimada de 28°C, cumpliendo así con los requerimientos de enfriamiento especificado por el compresor de aire.

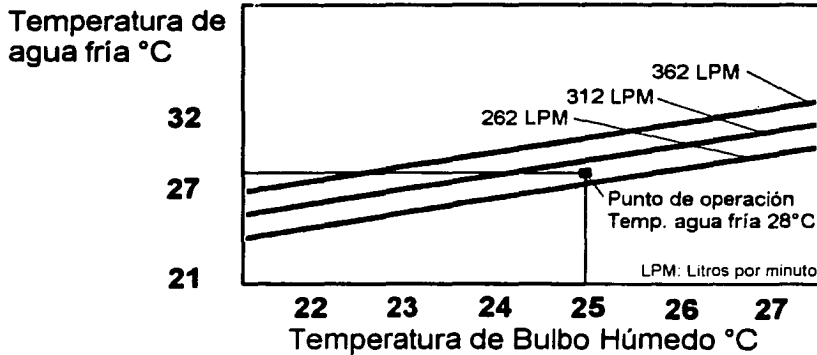


FIGURA 3.2 Curva de funcionamiento de la torre de enfriamiento propuesta EVENFRI 4-3-3.0.

3.4. Sistema de enfriamiento de moldes.

La sopladora seleccionada fue la SIDEL SBO24 y su ficha técnica, indica que los consumos de agua para enfriamiento de moldes son los siguientes:

- Flujo de agua para enfriamiento de cuello: 3 m³/h,
Temperatura máxima del agua: 20 °C,
(Máxima diferencia de temperatura: $T_2 - T_1 = 10$ °C)
- Flujo de agua para enfriamiento de cuerpo: 24 m³/h,
Temperatura máxima del agua: 12 °C,
(Máxima diferencia de temperatura: $T_2 - T_1 = 3$ °C)

Como se mencionó en el desarrollo del capítulo 2, para el manejo de las temperaturas que especifica el proveedor de la sopladora es necesario la utilización de un equipo de tipo *chiller*.

3.4.1. Cálculo de la capacidad del chiller.

Los cálculos se harán en base a la temperatura máxima para el enfriamiento de cuerpo de botella más el cuello, por lo que:

Gasto requerido total = 27 m³/h. a una temperatura máxima del agua 12°C ,
(Máxima diferencia de temperatura: T₂ - T₁ = 3 °C)

Se utiliza la ecuación 2.1

$$Q = m C_p (T_2 - T_1) \quad [\text{Ecuación 2.1}]$$

Donde :

Q = Cantidad de calor por unidad de tiempo	[kcal / hr]
m = Masa de agua a enfriar por unidad de tiempo	[kg / hr]
C _p = Calor específico del agua	[Kcal / kg °C]
T ₂ = Temperatura de salida del agua	[°C]
T ₁ = Temperatura de entrada del agua	[°C]

Asumiendo que el fluido de enfriamiento es agua y que para fines prácticos su calor específico C_p es igual a 1 kcal / kg °C, su densidad es de 1000 kg/m³ y el diferencial de temperatura de 3°C. Sustituyendo valores, se tiene:

$$Q = (27,000 \text{ kg / hr}) \times (1 \text{ kcal / kg } ^\circ\text{C}) \times (3^\circ\text{C}) = 81,000 \text{ kcal / hr}$$
$$Q = 81,000 \text{ kcal / hr}$$

Se utiliza la ecuación 2.3. para convertir kcal / hr a toneladas de refrigeración.

$$\text{T.R.} = Q / 3024 \quad [\text{Ecuación 2.3}]$$

Donde :

Q = Cantidad de calor [kcal / hr]
T.R.= Toneladas de refrigeración [T.R.]

Sustituyendo el valor calculado, se tiene:

$$T.R. = (81,000 \text{ kcal / hr }) / (3024)$$

$$T.R. = 26.78 \text{ T.R.}$$

Aplicando un factor de seguridad de estimado de 15%, se propone que la capacidad requerida del *chiller* sea de 30 T.R.

Se recomienda un equipo *chiller* del fabricante FRIGEL FIRENZE S.R.L ya que cuenta con buen posicionamiento en el mercado nacional y sus partes de refacción se consiguen fácilmente en el mercado. El equipo comercial que se propone para esta aplicación es el siguiente:

Fabricante:	FRIGEL FIRENZE S.R.L.
Descripción:	Enfriador de agua Chiller "HEAVYGEL" Modelo 6H100AS, con tanque y bombas independientes para recirculación y proceso
Capacidad de enfriamiento:	30.7 T.R. (108 kW) en una temperatura ambiente de 30°C y agua de proceso a 10°C.

Los datos técnicos de este equipo propuesto son los siguientes:

No. de circuitos	-	1
Potencia en compresor	Kw	25.8
Potencia en bomba de proceso	Kw	3
Flujo y presión de la bomba de proceso	m ³ /h – bar	30 – 3.2
Potencia de la bomba de recirculación	Kw	1.5
Potencia de cada uno de los 3 ventiladores	Kw	1.4
Potencia total instalada	Kw	33.7
Capacidad del tanque de agua	l	420
Conexiones de agua de entrada y salida	Pulgadas	2 ½
Peso	Kg	1300
Dimensiones (largo x ancho x alto)	cm	446 x 114 x 194
Capacidad de carga de la bomba de proceso	m	20

Características generales del chiller propuesto:

- De construcción robusta para trabajo pesado.
- Estructura con sólidos perfiles y puertas de aluminio para alta durabilidad para instalaciones exteriores expuestas al medio ambiente.
- Compresor de alta capacidad supervisado por microprocesador.
- Evaporador de placas de acero inoxidable con ventiladores de contraflujo con circulación forzada.
- Condensador de gran superficie con tubos de cobre y disipadores de aluminio.
- Ventiladores helicoidales de alta eficiencia.
- Tanque de agua presurizado.
- Bombas de alta capacidad para recirculación y proceso.
- Conexiones hidráulicas aisladas de alta calidad.
- Diseño para fácil mantenimiento.

Características del control del chiller propuesto:

- Avanzado microprocesador con pantalla alfa numérica de 80 caracteres.
- Protección eléctrica, según norma europea 60204/1-IP 55, incluyendo interruptor general y protección termomagnética.
- Alarma acústica (opcional).

En la siguiente figura 3.3, se muestra el chiller propuesto:

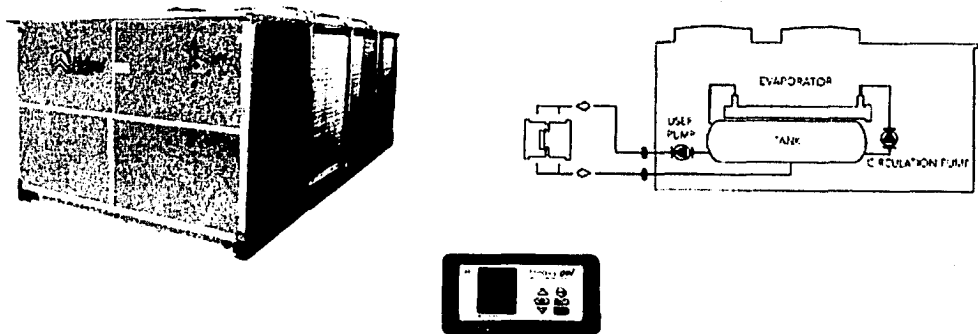


Figura 3.3 Chiller propuesto para enfriamiento de la sopladora, diagrama esquemático y panel de control.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

3.5. Equipos Periféricos.

Como equipos periféricos se definen tres elementos de importancia para la línea de producción de botellas de PET pero que no forman parte del proceso de soplado. El primero de ellos es un arreglo de transportadores neumáticos que llevarán la botella de la sopladora a la línea de embotellado y al sistema de paletización de botella. El segundo es un sistema de paletización automático que operará cuando ocurra un paro en la línea de embotellado por fallas en algún equipo, por mantenimiento preventivo o por baja demanda de producto. El tercer elemento es un sistema de envoltura de *pallets* con película plástica estirable que se utilizará para dar estabilidad a las botellas paletizadas y para protegerlas de la contaminación por polvo en la zona de almacén.

3.5.1. Transportadores neumáticos.

Este tipo de transportadores que permite el manejo de botellas de PET a altas velocidades (superiores a las 1000 bpm) cuenta con una estructura en forma de cámara, en la cual se introduce aire de baja presión por medio de ventiladores eléctricos ubicados estratégicamente a lo largo de la trayectoria de los transportadores. La cámara cuenta con una serie de ranuras que dirigen el aire a un canal en el cual se encontrarán sostenidos los cuellos de las botellas por medio de una guía plástica como lo muestra la figura 3.4.

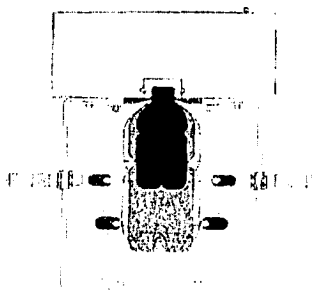


Fig. 3.4. Sección del transportador neumático.

El aire que es dirigido al cuello de las botellas provoca que el movimiento de éstas sea perpendicular a la guía plástica de los transportadores.

Para asegurar que las botellas tengan un movimiento uniforme a lo largo de los transportadores, éstos contarán con guías laterales ubicadas a 2 mm. de las paredes de la botella.

Los transportadores neumáticos seguirán la trayectoria trazada en el plano de distribución de la planta (figura 4.1), uniendo en primer plano la salida de la sopladora con los transportadores existentes que actualmente llevan botellas desde el

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

depaletizador a la línea de embotellado y en segundo plano uniendo la salida de la sopladora con la entrada del paletizador de botellas.

A fin de estandarizar los equipos en la planta, los transportadores de aire serán suministrados por la compañía ACMI S.R.L, misma que se ha encargado de la construcción de los transportadores neumáticos que actualmente operan en las tres líneas de PET de la planta.

3.5.2. Paletizador de botellas.

El paletizador de botellas será un equipo de alta velocidad, suministrado también por la compañía ACMI S.R.L, capaz de manejar 40,000 bpm y cuyo modelo es el RASAR P260. Se trata de un equipo completamente automatizado con cuatro ingresos de transportador de aire que cuenta con un cabezal de pinzas mecánicas que traslada las botellas a una mesa de acumulación (transportador de banda plástica), generando una cama de botellas que será tomada por un segundo cabezal de traslación que sujeta las botellas por el cuello y las coloca en la tarima o *pallet*. El equipo cuenta con un posicionador de cartones separadores entre camas de botellas, así como con un dosificador de tarimas vacías. En la figura 3.5 se muestra un esquema funcionamiento del paletizador.

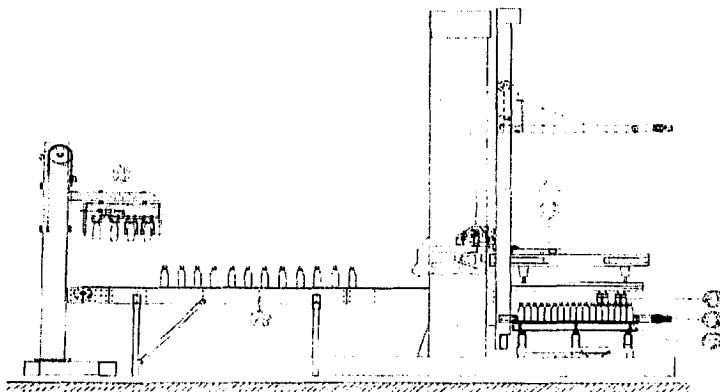


Fig. 3.5. Esquema de funcionamiento del paletizador Modelo Rasar P260.

Como se mencionó anteriormente, este equipo también será suministrado por ACMI S.R.L, pues esta compañía cuenta en México con una cantidad considerable de máquinas instaladas de este tipo y ofrece un servicio técnico y suministro de partes de refacción muy confiable.

En el plano de distribución de la línea, figura 4.1, se muestra la ubicación de este equipo.

3.5.3. Envolvedor de pallets.

Para la envoltura de los *pallets* de botella se utilizará una máquina que se ubicará a la salida del paletizador de botellas y que trabajará en sincronía con dicho equipo. Se ha seleccionado un equipo ROTOFILM 115 que trabaja bajo el principio de brazo giratorio, es decir, que mientras el *pallet* de botella está fijo, un brazo que contiene la bobina de película plástica gira alrededor de él, con movimiento vertical de manera que lo envuelve completamente. La figura 3.6 muestra una fotografía de dicha máquina.

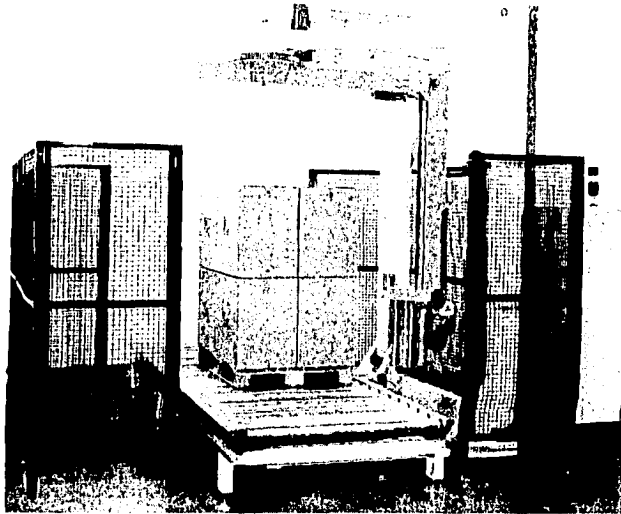


Fig. 3.6. Envolvedora de pallets Modelo Rotofilm 115.

A fin de contar con un mismo proveedor de todos los equipos periféricos, se ha decidido que sea también ACMI S.R.L. la compañía que suministre esta máquina. En la figura 4.1 puede verse la ubicación de este equipo.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Capítulo 4 Propuesta de diseño de la línea.

4.1. Distribución de la planta.

La figura 4.1. muestra la propuesta de distribución de la planta con la nueva línea de producción de botellas de PET.

Para la ubicación de la línea se requieren básicamente 6 áreas estratégicas que por su importancia se enumeran en el siguiente orden:

- Sala de soplado.
- Sala de compresor.
- Mezanine para torre de enfriamiento.
- Cisterna.
- Área de chiller.
- Zona de paletizado de botella y envoltura de pallets.

4.1.1. Sala de soplado.

La propuesta ha sido realizada previendo que en un futuro se ubiquen en una misma sala tres sopladoras que abastecerán la demanda de botellas de las tres líneas de embotellado en envases de PET. Esta sala se ubicará en una nave que actualmente se utiliza como almacén de botella No.1 y que se encuentra cerca de las líneas de embotellado.

Dado que inicialmente se contará sólo con una sopladora, una parte de esta sala seguirá ocupándose como almacén de botella, teniéndose además un área de aproximadamente 60 m² dedicada al almacenamiento de preformas, cuya capacidad superará los dos días de inventario requeridos para trabajar en forma confiable.

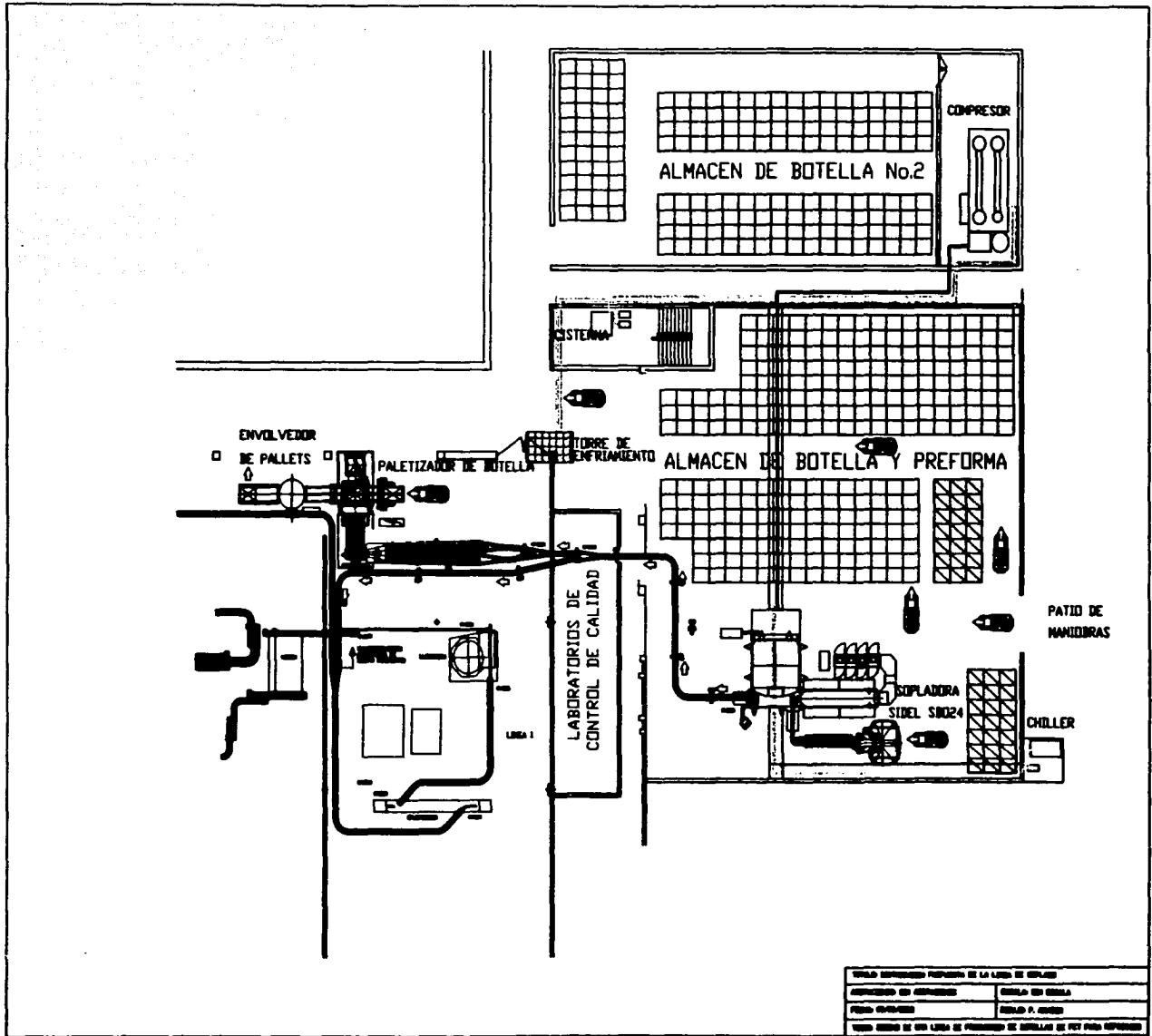


Figura 4.1 Distribución Propuesta de la Línea de Producción de Botellas de PET

Como puede observarse, la sopladora ha sido ubicada estratégicamente de manera que no obstaculice el tránsito de los montacargas que seguirán operando en el espacio que se destinará al almacenamiento de botellas y preformas.

4.1.2. Sala de compresor.

El compresor se ubicará al fondo del área que actualmente ocupa el almacén de botellas No. 2. Por la alta generación de ruido del compresor, será necesario aislarlo del resto del almacén mediante una pared. Se ha previsto que cuando se adquieran los equipos de soplado para las otras dos líneas de embotellado de PET, se amplíe esta sala a fin de dar cabida a los tres compresores que abastecerán de aire a presión a las tres sopladoras.

4.1.3. Mezanine para torre de enfriamiento.

Se aprovechará un mezanine existente que actualmente se ubica sobre los laboratorios de control de calidad y que alberga a los equipos de enfriamiento de amoniaco utilizados en la planta. Dicho mezanine se encuentra a la intemperie y cuenta aun con espacio suficiente para ubicar en él aproximadamente cuatro torres de enfriamiento como la que se requiere para el compresor de este proyecto.

4.1.4. Cisterna.

El agua fría proveniente de la torre de enfriamiento será llevada por medio de una tubería a una cisterna que se ubicará debajo de la escalera que actualmente comunica el almacén de botella No. 1 con el mezanine de equipos de enfriamiento. La cisterna tendrá 2 m. de ancho por 2 m. de largo, mientras que su profundidad será de 3 m.

4.1.5. Área de chiller.

Esta área que albergará tanto al *chiller*, como a su sistema de bombeo de respaldo. Se ubicará a espaldas de la sopladora SIDEL SBO 24 por fuera de la sala de soplado. Se trata de un área a la intemperie a fin de asegurar que el *chiller* trabaje de manera eficiente, misma que sólo contará con un pequeño cobertizo de lámina que protegerá a los equipos de la lluvia.

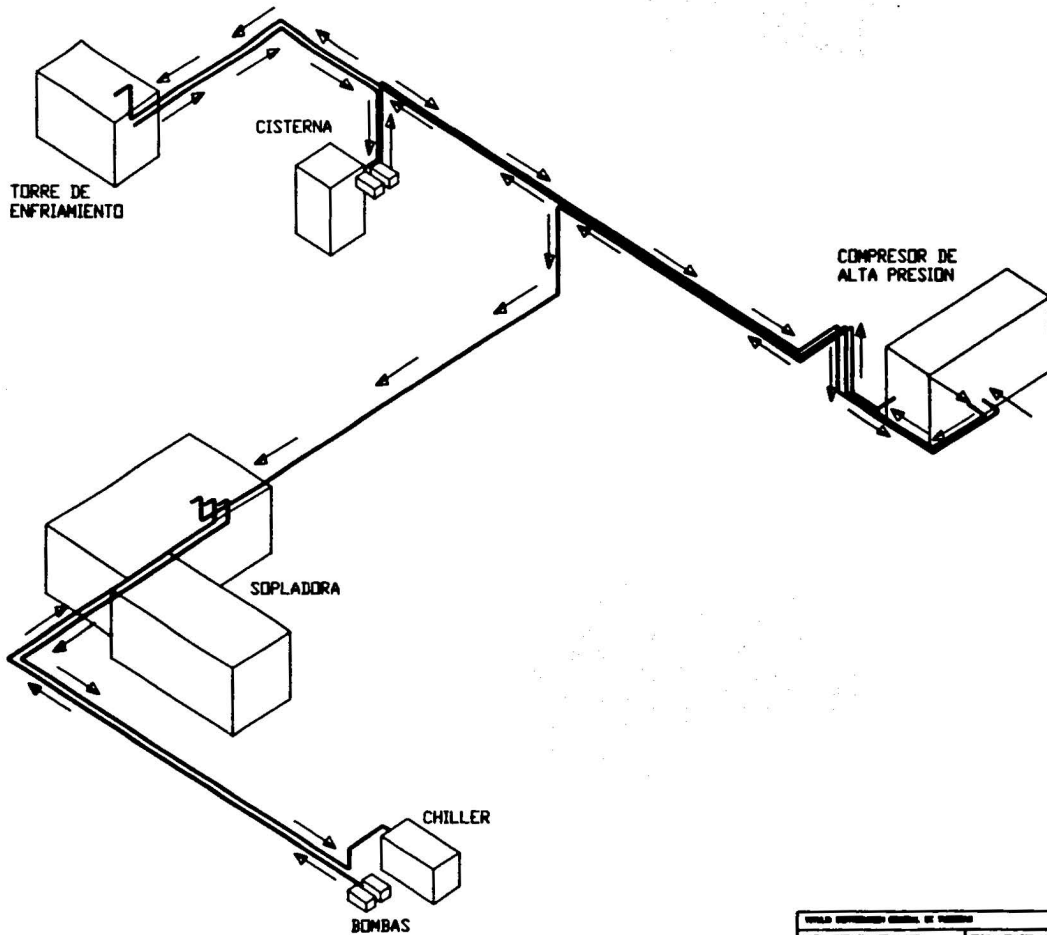
4.1.6. Zona de paletizado de botellas y envoltura de pallets.

Para la ubicación del paletizador de botella y su correspondiente envolvedor de *pallets*, se aprovechará un área libre cercana a la llenadora de la línea 1; que además de ser adecuada en dimensiones para albergar dichos equipos, estratégicamente permitirá un tránsito eficiente de botellas paletizadas a los almacenes No. 1 y No. 2.

A fin de tender la tubería de agua de la torre de enfriamiento al compresor y la tubería de aire a alta presión del compresor a la sala de soplado, ésta se sujetará a la estructura del techo de la nave a una altura que permita el libre tránsito de montacargas debajo de ella (altura mínima de 3.5 m).

En la sala de soplado se construirá un canal de distribución de tuberías que estará dimensionado de manera que en él se instalen las tuberías del presente proyecto y quede espacio suficiente para las tuberías de los dos equipos de soplado futuros. En dicho canal se ubicarán dos tipos de tuberías, la de aire a alta presión que va del compresor a la sopladora y la de agua de enfriamiento del *chiller* a la sopladora.

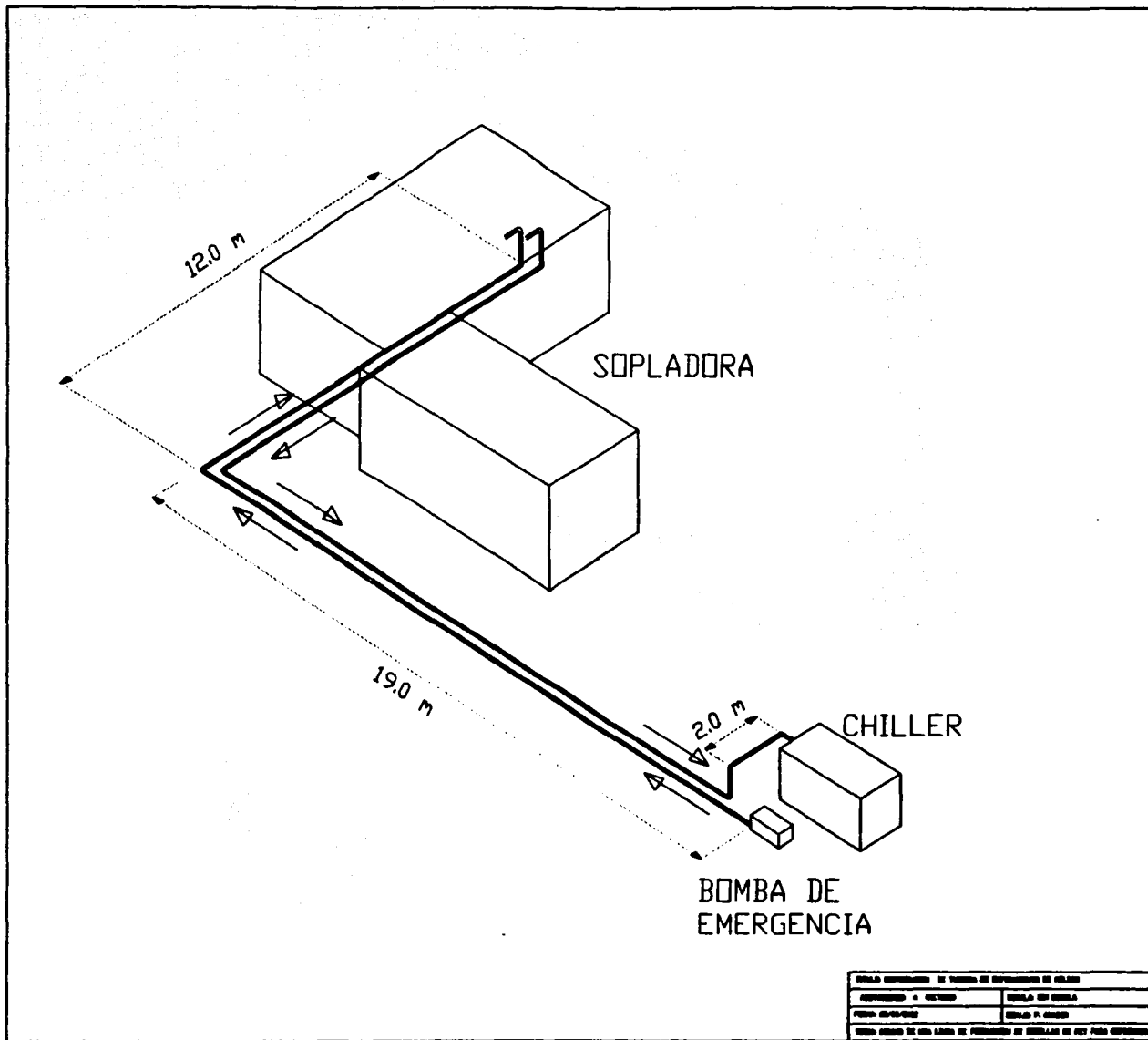
La figura 4.2 muestra la distribución general de tuberías requeridas por la nueva línea de soplado, mientras que las figuras 4.3, 4.4 y 4.5 muestran a detalle las tuberías de enfriamiento de los moldes de la sopladora, de suministro de aire a presión y de enfriamiento del compresor, respectivamente.



TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUMBES	
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA	ESPECIALIDAD EN MECANICA
CARRERA DE INGENIERIA	INDUSTRIAL
TRABAJO DE GRADUACION DE TITULACION DE INGENIERIA EN MECANICA INDUSTRIAL	

Figura 4.2 Distribución General de Tuberías Para la Línea de Soplado



DISEÑO EXPERIMENTAL DE TUBERÍA DE ENFRIAMIENTO DE MOLDES	
APROBADO: A. VILLALBA	DISEÑO EN TUBERÍA
FECHA: 20/05/2010	DISEÑO P. GONZÁLEZ
TIPO DE MOLDE: DE UNA LÍNEA DE FUNDICIÓN DE BARRILLAS DE PET PARA REPRESAS	

Figura 4.3 Distribución de Tubería Para Enfriamiento de Moldes

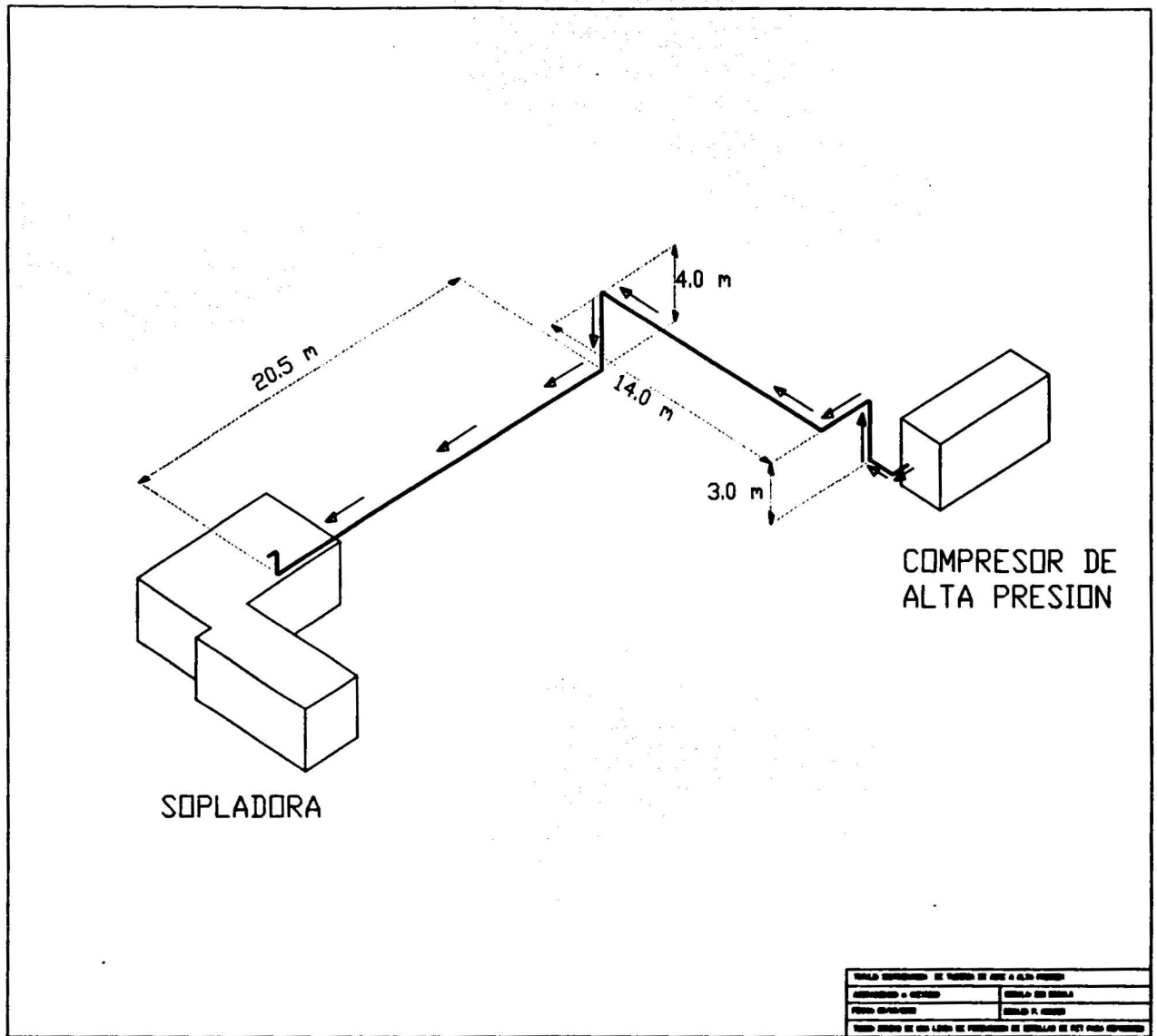


Figura 4.4 Distribución de Tubería Para Aire de Alta Presión

TITULO EMPROYADO DE TUBERIA DE AIRE A ALTA PRESION	
DESIGNADO A CARGAR	ESTADO DE TEXAS
FECHA DE ELABORACION	ESTADO DE TEXAS
TIPO DE TUBERIA DE AIRE ALTA DE PRESION DE CALIDAD DE ESTE PAIS REPUBLICA	

4.2. Cálculo de tuberías de aire a alta presión.

El propósito de un sistema de aire comprimido es el de suministrar aire en cada punto de consumo de acuerdo a sus demandas en cuanto a:

- Presión de aire.
- Flujo de aire.
- Calidad de aire.

Estos requerimientos deberán satisfacerse al menor costo posible.

Existen cuatro componentes en una red de aire comprimido:

- **La línea principal**, la cual conduce el aire comprimido desde la sala de compresores hasta las áreas de consumo.
- **La línea de distribución**, encargada de distribuir el aire dentro del área de consumo.
- **La línea de servicio**, que lleva el aire de la línea de distribución al punto de trabajo.
- **Accesorios de línea**, son todos los equipos como válvulas, conexiones, unidades de preparación de aire y mangueras requeridas para llevar el aire de la línea de servicio al consumidor.

Al diseñar la línea principal en grandes sistemas de distribución con varias áreas de consumo, éstas deberán poderse cerrar sin afectar el funcionamiento del resto de la red. Con esta sencilla consideración práctica, se consiguen varias ventajas:

- Al hacer cualquier trabajo de mantenimiento sólo el área de consumo en cuestión quedará sin aire.
- Las fugas podrán minimizarse al cerrar el paso de aire hacia aquellas zonas que no estén trabajando.
- Las fugas pueden ubicarse fácilmente.
- Es posible medir el consumo de las distintas etapas.
- Es posible, en caso de falla de parte del sistema de compresión de aire suplir únicamente las áreas más importantes.

4.2.1. Materiales de las tuberías.

Los materiales más comunes son:

- Acero.
- Acero inoxidable.
- Cobre.
- Plástico.

Acero: Cuando no existe ningún requerimiento especial, las tuberías de acero son las más utilizadas. Cuando se utilizan tuberías de acero o de cualquier material, éstas deben de ser cuidadosamente limpiadas antes de instalarse.

Siempre que se pueda o que sea adecuado deberá utilizarse soldadura, lo que originará menos pérdida por fugas en conexiones y además provoca una menor caída de presión.

Acero Inoxidable: En hospitales, producción de alimentos y en la industria química, es común el uso de acero inoxidable. También se utilizan tuberías de acero inoxidable en industrias mecánicas o eléctricas con altas exigencias en cuanto a la pureza y confiabilidad del sistema de aire.

Cobre: Es utilizado como alternativa al acero inoxidable. El trabajo de instalación se facilita comparado con el acero inoxidable.

Plástico: El uso de tuberías de plástico en líneas de distribución de aire debe hacerse con ciertas precauciones:

- Para una presión máxima de 12.5 bar a temperaturas entre -20 °C y 20°C u 8 bar para temperaturas máximas de 50°C.
- El material no debe ser sobrecalentado.
- Tubería de metal deberá utilizarse entre el compresor y el tanque.
- No debe ser sometida a vibraciones.

4.2.2. Cálculo del diámetro de la tubería.

Los principales elementos que se utilizarán para el cálculo de la tubería del aire a alta presión se muestran en la tabla 4.1 que nos muestra la longitud equivalente de los accesorios de la tubería y el nomograma mostrado en la figura 4.6 que ayuda a realizar el cálculo del diámetro de la tubería.

Los principales datos que se necesitan para utilizar el nomograma son el flujo de aire, calculado en el apartado de selección del compresor, así como la presión máxima que soportará la tubería.

Recordando: se tiene que la presión de soplado es:

$$\text{Presión de soplado} = 35 \text{ bar} = 35.44 \text{ kg/cm}^2$$

Así mismo, el caudal efectivo es:

$$\text{Caudal} = 20 \text{ m}^3/\text{min} = 0.35 \text{ m}^3/\text{seg}$$

De la figura 4.4, en la cual se muestra la distribución de la tubería para aire de alta presión, tenemos que la longitud total de la tubería es de 42.5 m

Utilizando estos datos en el nomograma de la figura 4.6, y considerando una Δp de 0.25 bar por cada 100 m, podemos entonces trazar las líneas necesarias para obtener el diámetro recomendado para la tubería.

Para utilizar el nomograma es necesario relacionar las primeras dos columnas (presión y Δp) con los datos especificados anteriormente, para así encontrar el punto donde se cruza esta línea con la línea punteada que está en el centro de la gráfica) y a partir de este punto trazar otra línea que pasará por la columna que indica el caudal Q que se está alimentando en esta línea de aire, y de esta forma encontraremos el punto donde se cruza esta última línea con la columna de los diámetros estimados.

Al realizar este ejercicio se obtiene un diámetro de aproximadamente 4 pulgadas ó 100 mm.

El material recomendado para la tubería es acero al carbón, esto debido al costo y a la facilidad para su instalación y la cédula especificada, es decir el espesor de la pared de la tubería es del número 80.

Accesorio	Diámetro (mm)									
	15	20	25	30	40	50	65	80	100	125
Codo Elbow	0,3	0,4	0,5	0,7	0,8	1,1	1,4	1,8	2,4	3,2
Curva a 90°	0,1	0,2	0,2	0,4	0,5	0,6	0,8	0,9	1,2	1,5
Codo a 90°	1,0	1,2	1,6	1,8	2,2	2,6	3,0	3,9	5,4	7,1
Curva a 180°	0,5	0,6	0,8	1,1	1,2	1,7	2,0	2,6	3,7	4,1
Válvula esférica	0,8	1,1	1,4	2,0	2,4	3,4	4,0	5,2	7,3	9,4
Válvula compuerta	0,1	0,1	0,2	0,3	0,3	0,4	0,5	0,6	0,9	1,2
"T" estándar	0,1	0,5	0,2	0,4	0,4	0,5	0,7	0,9	1,2	1,5
"T" lateral	0,5	0,7	0,9	1,4	1,6	2,1	2,7	3,7	4,1	6,4

Tabla 4.1 Longitudes equivalentes en metros, para distintos tipos de accesorios de uso común en las instalaciones de tubería.

Longitudes Equivalentes			
Cantidad	Accesorios	Longitud Equivalente (m)	Longitud equivalente total (m)
9	Codos 90°	5.4	48.6
2	Válvulas Compuerta	0.9	8.1
		Total	56.7

Tabla 4.2 Logitudes equivalente para accesorios de la línea de aire a alta presión.

Utilizando la tabla 4.1 y haciendo referencia al diagrama mostrado en la figura 4.4, podemos determinar las longitudes equivalentes para el sistema de tubería de aire a alta presión. Esto lo podemos revisar en la tabla 4.2.

Sumando la logitud total de la tubería y la longitud equivalente tenemos una longitud final que es de:

$$\text{Longitud total} = 42.5 \text{ m} + 56.7 \text{ m} = 99.2 \text{ m}$$

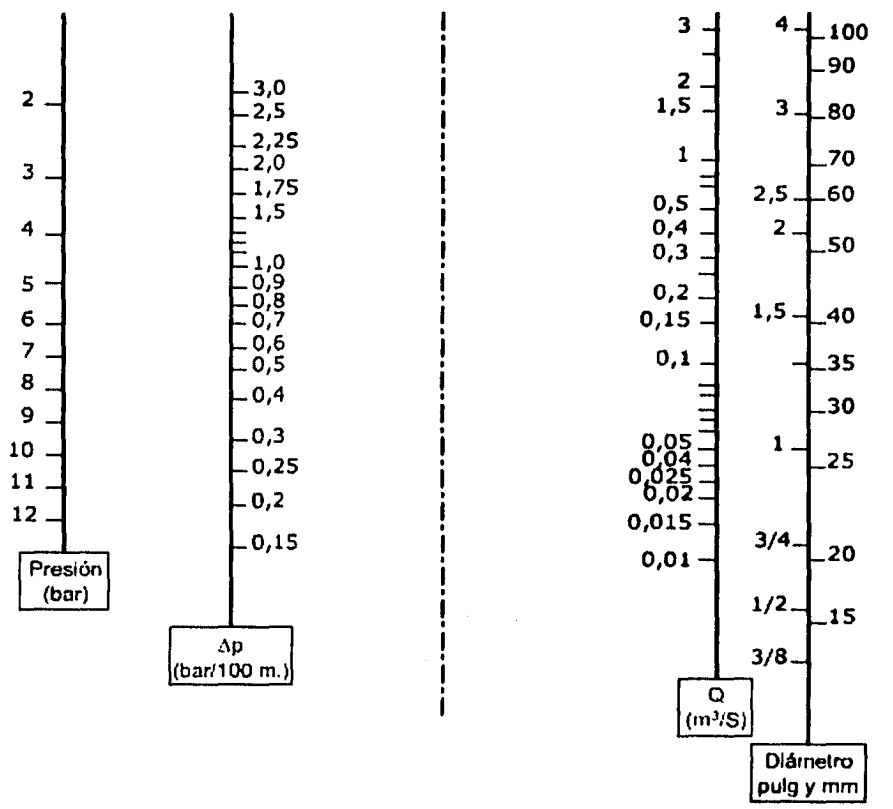


Figura 4.6 Nomograma para el cálculo del diámetro de la tubería.

4.3. Diseño de la red de tubería de suministro de agua para los equipos de enfriamiento y selección de las bombas.

4.3.1. Generalidades.

Siempre que fluye agua a través de un tubo existen pérdidas de carga por fricción. Estas pérdidas dependen principalmente de los siguientes factores:

- Velocidad del agua.
- Diámetro del tubo.
- Rugosidad de la superficie interior del tubo.
- Longitud del tubo.

Por lo general para circulación de agua, la presión no tiene efecto significativo sobre la pérdida de carga en el sistema. Sin embargo, presiones altas de trabajo pueden obligar al uso de mayores dimensiones de tubo, conexiones y válvulas, junto con equipo especialmente diseñado.

Para diseñar en forma adecuada una red de tubería y hacer una buena selección de la bomba hidráulica, se debe de evaluar la pérdida por fricción en el tubo, así como también la pérdida por fricción a través de válvulas, conexiones y demás accesorios. Adicionalmente se debe de considerar si en el sistema existen derivaciones, que reducen el tamaño del tubo.

La pérdida de carga por fricción de un sistema de tubería de agua es la suma de:

- **Pérdidas primarias:** Por longitudes de tubo recto.
- **Pérdidas secundarias:** Por longitudes equivalentes, en tubo recto, de los accesorios en la red de tubería.

Esto es:

$$H_{r\ 1-2} = H_{r\ prim} + H_{r\ sec}$$

[Ecuación 4.1.]

Donde:

$H_{r\ 1-2}$ = Pérdida total de carga por fricción [m]

$H_{r\ prim}$ = Pérdidas primarias por fricción [m]

$H_{r\ sec}$ = Pérdidas secundarias por fricción [m]

Para un buen diseño, con el mínimo de pérdida de carga por fricción, es importante que los equipos se encuentren lo más cerca posible y que la tubería tenga los menores cambios de dirección.

En la mayor parte de las aplicaciones de circulación de agua para sistemas de enfriamiento se recomienda utilizar tubería de acero o de cobre. En este proyecto, se propone que la tubería sea de tubo fabricado en acero al carbón cédula 40. Este número de cédula es el que comúnmente se recomienda y utiliza para circulación de agua en sistemas de enfriamiento; la cédula indica el espesor de la pared del tubo.

El Instituto de Hidráulica de los Estados Unidos, en su Manual de Fricción en Tuberías, proporciona tablas para conocer la carga en ft. de la pérdida de carga por fricción en tubería de acero cédula 40 para flujo de agua.

En la tabla 4.3 se muestran datos para conocer la carga en ft. de la pérdida total por fricción para flujo de agua en tubería de acero cédula 40, con diámetro nominal de 2 y 2.5 pulgadas.

CARGA DE PÉRDIDAS TOTALES POR FRICCIÓN EN TUBERÍA DE ACERO CÉDULA 40								
Diámetro nominal de la tubería 2 in. Diámetro real 2.067 in.					Diámetro nominal de la tubería 2.5 in. Diámetro real 2.469 in.			
GPM	Velocidad ft / s	Carga por Velocidad ft / 100 ft	Carga por Fricción ft / 100 ft	Carga total ft / 100 ft	Velocidad ft / s	Carga por Velocidad ft / 100 ft	Carga por Fricción ft / 100 ft	Carga total ft / 100 ft
24	2.39	0.08	1.20	1.28				
25	2.39	0.09	1.29	1.38	1.68	0.04	0.54	0.58
30	2.87	0.13	1.82	1.95	2.01	0.06	0.75	0.81
35	3.35	0.17	2.42	2.59	2.35	0.09	1.00	1.09
40	3.82	0.23	3.10	3.33	2.68	0.11	1.28	1.39
45	4.30	0.29	3.85	4.14	3.02	0.14	1.60	1.74
50	4.78	0.36	4.67	5.03	3.35	0.17	1.94	2.11
55	5.25	0.43	5.51	5.94				
60	5.74	0.51	6.59	7.40	4.02	0.25	2.72	2.97
65	6.21	0.60	7.70	8.30				
70	6.69	0.70	8.86	9.56	4.69	0.34	3.63	3.97
75	7.16	0.80	10.15	10.95				
80	7.65	0.91	11.40	12.31	5.36	0.45	4.66	5.01
85	8.11	1.03	12.60	13.63				
90	8.60	1.15	14.20	15.35	6.03	0.57	5.82	6.39
95	9.09	1.29	15.80	17.09				
100	9.56	1.42	17.40	18.82	6.70	0.70	7.11	7.81
120					8.04	1.00	10.0	11.0
140					9.38	1.37	13.5	14.87

GPM: Galones por minuto; 1 GPM = 3.785 l / m
1 ft = 0.3048 m

Tabla 4.3 Pérdidas totales por fricción en tubería de acero cédula 40, diámetro nominal de 2 y 2.5 pulgadas para flujo de agua.

En la tabla 4.4 se muestra la recomendación por parte de la empresa Sistemas de Bombeo S.A. de C.V, basada en información del Instituto de Hidráulica de los Estados Unidos, para la selección del diámetro de tubería de acero cédula 40 en base al gasto de agua requerido a fin de mantener una buena velocidad de flujo y un valor aceptable de la pérdida de carga por velocidad y fricción.

SELECCIÓN DE DIÁMETRO TUBERÍA DE ACERO CÉDULA 40 PARA FLUJO DE AGUA	
GPM	Diámetro nominal propuesto de la tubería
0.8 a 2.5	¼ in
2.5 a 4	3/8 in
4 a 7	½ in
7 a 12	¾ in
12 a 20	1 in
20 a 35	1 ¼ in
35 a 50	1 ½ in
50 a 85	2 in
85 a 140	2 ½ in
140 a 180	3 in

Tabla 4.4. Recomendación para la selección del diámetro de tubería de Acero Cédula 40 en base al gasto de agua requerido.

Para determinar la pérdida secundaria por fricción se utiliza el nomograma de longitud equivalente, figura 4.7, donde trazando una línea recta entre el punto del accesorio empleado y el punto del diámetro nominal de la tubería, se puede conocer la longitud equivalente del accesorio.

Una vez que se conoce la longitud equivalente de cada accesorio, se puede utilizar la tabla 4.3. para determinar su pérdida de carga por fricción.

LARGOS EQUIVALENTES DE TUBO RECTO DE LOS ACCESORIOS COMUNES DE TUBERÍAS

CLAVE ACCESORIO TUBERÍA

- 1.- Válvula de globo totalmente abierta.
- 2.- Válvula de ángulo abierta.
- 3.- Válvula de retención totalmente abierta.
- 4.- Retorno en "U".
- 5.- "T" normal con salida lateral.
- 6.- Codo normal o "T" reductor 1/2
- 7.- Codo de radio medio o "T" reductor 1/4.
- 8.- Codo de radio grande o "T" normal.
- 9.- Válvula de Compuerta.
- 10.- "T" normal.
- 11.- Codo cuadrado.
- 12.- Salida con tubo con proyección interna.
- 13.- Ampliación súbita.
- 14.- Salida ordinaria.
- 15.- Reducción súbita.
- 16.- Codo normal 45°.

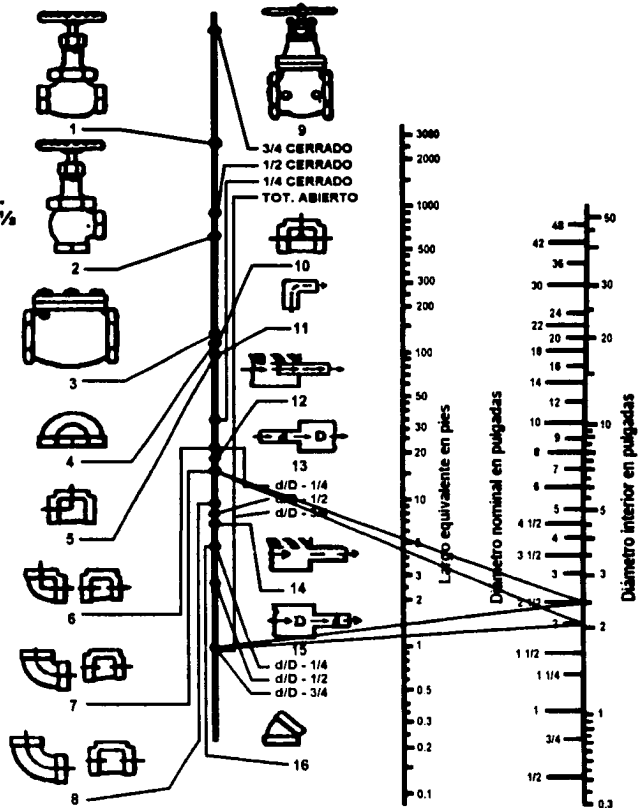


Figura 4.7. Nomograma de longitud equivalente de tubo recto de los accesorios comunes de tubería.

Para calcular la carga requerida de la bomba hidráulica en metros, se puede utilizar la ecuación de Bernoulli, ecuación 4.2, analizando dos puntos del sistema.

$$\frac{P_1}{\gamma} + Z_1 + \frac{V_1^2}{2g} + H_B - H_{f1-2} = \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 + \frac{V_2^2}{2g} \quad [\text{Ecuación 4.2.}]$$

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Donde:

P_1 = Presión del fluido en el punto 1	[Pa = N / m ²]
Z_1 = Altura del fluido en el punto 1	[m]
V_1 = Velocidad del fluido en el punto 1	[m / s]
P_2 = Presión del fluido en el punto 2	[Pa = N / m ²]
Z_2 = Altura del fluido en el punto 2	[m]
V_2 = Velocidad del fluido en el punto 2	[m / s]
γ = Peso específico del fluido	[N / m ³]
g = Aceleración de la gravedad	[9.81 m / s ²]
H_B = Carga de la bomba hidráulica	[m]
H_{r1-2} = Carga por pérdidas de fricción de tubería y accesorios	[m]

Como puede observarse, esta forma de la ecuación de Bernoulli presenta los términos en unidades metros, es decir, alturas representativas de: presión, geodésica, velocidad, carga de la bomba y carga por pérdidas de la tubería.

Para conocer la velocidad del fluido en cualquier punto de la tubería, se puede utilizar la ecuación 4.3. de continuidad:

$$Q = A_o V_o \quad [\text{Ecuación 4.3.}]$$

Donde:

Q = Flujo volumétrico o Gasto	[m ³ / s]
A_o = Área de la sección transversal donde pasa el fluido	[m ²]
V_o = Velocidad del fluido al paso de la sección transversal	[m / s]

Dentro de las tablas que proporciona el Instituto de Hidráulica de los Estados Unidos también existen datos para conocer la velocidad del fluido en base al gasto y al diámetro de la tubería.

De forma general, los fabricantes de las bombas hidráulicas centrífugas, que es el tipo de bombas empleadas en esta aplicación, proporcionan curvas de operación, donde dependiendo del gasto (m^3/s) y la carga total (m), se obtienen los siguientes datos de la bomba: eficiencia, diámetro del impulsor, altura de succión neta positiva requerida de la bomba (NPSHR) y potencia requerida.

La selección de la bomba se basa en la recomendación del fabricante y depende del gasto y la carga total calculada.

Un factor muy importante que se debe de considerar en el diseño del circuito y en especial para el buen funcionamiento de la bomba es la altura estática de succión, que se define como la distancia vertical entre el eje geométrico del impulsor de la bomba y la superficie libre del líquido que va a ser bombeado. Este valor es positivo cuando el nivel del agua queda por debajo de la bomba y negativo cuando se localiza por encima de ella.

Una vez que se ha seleccionado la bomba hidráulica centrífuga, se deberá verificar que la altura representativa de la presión atmosférica del lugar donde se va a instalar la bomba (NPSH disponible), es mayor a la altura total representativa de las siguientes pérdidas del diseño: altura estática de succión, fricción de la tubería y accesorios de la succión, altura de succión neta positiva requerida de la bomba (NPSHR, dato proporcionado por el fabricante) y presión de vapor del fluido. Esta comprobación se hace mediante la siguiente ecuación 4.4:

$$\frac{P_{ATM}}{\gamma} > h_S + h_{fs} + NPSHR + P_{PV} \quad [\text{Ecuación 4.4.}]$$

Donde:

$$\frac{P_{ATM}}{\gamma} = \text{Altura representativa de la presión atmosférica o NPSH Disponible [m]}$$

$P_{ATM} =$	Presión atmosférica	[Pa = N / m ²]
$\gamma =$	Peso específico del fluido	[N / m ³]
$h_S =$	Altura de succión estática	[m]
$h_{fs} =$	Carga por pérdidas de fricción en la tubería de succión	[m]
$NPSHR =$	Altura de succión neta positiva requerida de la bomba (valor proporcionado en tablas o curvas del fabricante)	[m]
$P_{VF} =$	Altura representativa de la presión de vapor del fluido	[m]

Una vez que se comprueba la desigualdad de la ecuación 4.4, se garantiza que no se tendrá cavitación en la bomba.

En las tablas 4.5 y 4.6 se muestran, respectivamente, el NPSH disponible para algunas Ciudades en México y la presión de vapor de agua a diferentes temperaturas.

Población	Altura sobre el nivel del mar [metros]	Presión barométrica [mm Hg]	NPSH disponible aproximado [metros]
Guadalajara , Jal.	1566	634.77	8.63
México, D.F.	2242	579.92	7.88
Monterrey, N.L.	945	679.65	9.24
Puebla, Pue.	2162	585.43	7.85
Saltillo, Coahuila	1580	630.28	8.56
Veracruz, Ver.	1	760	10.33

Tabla 4.5. Carga neta positiva de succión (NPSH disponible) para succión de bombas centrífugas en algunas poblaciones de México: columnas de agua equivalente, valores estimados para agua entre 18°C y 28°C.

Temperatura [°C]	Presión de vaporización del agua	
	[Kg / cm ²]	Carga [metros]
10	0.0125	0.125
20	0.0238	0.238
30	0.0432	0.432
40	0.0752	0.752
50	0.1257	1.257
60	0.2031	2.031
70	0.3177	3.177
80	0.4829	4.829
90	0.7149	7.149
100	1.0332	10.332

Tabla 4.6. Presión de vaporización del agua a diferentes temperaturas.

4.3.2. Red de tubería de circulación de agua de la torre de enfriamiento para el compresor de aire.

4.3.2.1. Generalidades.

Como se mencionó en el capítulo 2, para lograr el mejor funcionamiento del sistema, la torre de enfriamiento se instala a la intemperie donde pueda recibir aire fresco y lo más cerca posible del equipo a enfriar, en este caso el compresor de aire. Adicionalmente, se considera la instalación de una cisterna en donde se almacenará el agua fría que provenga de la torre y de donde será bombeada hacia el compresor. La localización propuesta de la torre y la cisterna se puede ver en la figura 4.1.

En la siguiente figura 4.8. se muestra de forma esquemática el arreglo básico del sistema de la red de tubería para la circulación de agua entre la torre de enfriamiento y el compresor de aire, así como las temperaturas estimadas de entrada y salida del agua en la torre de enfriamiento.

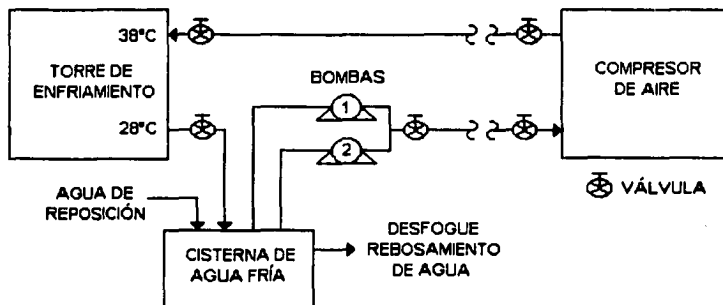


Figura 4.8. Esquema del arreglo básico de la tubería de agua para la torre de enfriamiento y el compresor de aire.

4.3.2.2. Selección de la tubería y accesorios.

En base al gasto de agua requerido para enfriamiento del compresor de aire: $17 \text{ m}^3/\text{hr}$ (74.85 GPM), y a la recomendación del Instituto de Hidráulica de los Estados Unidos en la tabla 4.3, se propone que la tubería para el circuito de agua de la torre de enfriamiento sea de acero al carbón cédula 40 con un diámetro nominal de 2 pulgadas.

De acuerdo a la ubicación del compresor, figura 4.5, la red de tubería de agua para la torre de enfriamiento y el compresor de aire tendrá 8 tramos de tubo recto para la alimentación de agua fría al compresor de aire y 9 tramos de tubo recto para el retorno de agua a la torre de enfriamiento; es decir un total de 17 tramos de tubo recto. Las longitudes de tramos rectos de tubo se muestran en la tabla 4.7.

Por la trayectoria de la tubería y localización de los equipos, se requiere instalar un total de 15 codos de 90° de radio medio. Para el control de flujo y servicio al sistema, se propone instalar 5 válvulas de compuerta: a la salida de la bomba hidráulica, a la entrada y salida del compresor de aire, así como a la entrada y salida de la torre de enfriamiento.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

	Tubería de alimentación Longitud de tubo (m)	Tubería de retorno Longitud de tubo (m)
Tramo 1	1.0	1.0
Tramo 2	3.5	1.5
Tramo 3	24.0	8.5
Tramo 4	3.0	30.0
Tramo 5	3.0	3.0
Tramo 6	5.0	3.0
Tramo 7	3.0	5.2
Tramo 8	1.0	4.0
Tramo 9	----	1.0
Total	53.5	57.2

Longitud total de tubo recto en la tubería de alimentación y retorno	110.7 m (363.2057 ft)
--	-------------------------

Tabla 4.7. Tramos de tubo recto y longitud total de tubería para la torre de enfriamiento y el compresor de aire.

Cálculo de pérdidas de carga por fricción de la red de tubería.

- **Pérdidas primarias:** Empleando la tabla 4.2, con el gasto especificado para el enfriamiento del compresor de aire: 17 m³/hr (74.85 GPM), y efectuando interpolación con los datos de esta tabla, la carga por pérdidas primarias de fricción para tubo de acero al carbón cédula 40 con diámetro de 2 pulgadas es de 10.9083 ft. por cada 100 ft. de tubería.

Por lo que la pérdida primaria de carga por fricción, para la longitud total de tubo recto de la tubería, es de 39.62 ft. (12.07 m).

- **Pérdidas secundarias:** De acuerdo al nomograma de longitud equivalente, figura 4.7, para tubería con diámetro nominal de 2 pulgadas, la longitud equivalente de un codo de 90° de radio medio es de 4.5 ft (1.3716 m) y la

longitud equivalente de una válvula de compuerta en condición totalmente abierta es de 1.05 ft (0.32 m).

De acuerdo a los accesorios que se propone instalar, la longitud equivalente total de los accesorios es de 72.75 ft (22.17 m), por lo que la pérdida secundaria de carga por fricción, en base a la tabla 4.2, es de 7.93 ft (2.42 m).

Aplicando la ecuación 4.1, se tiene:

$$H_{r\ 1-2} = H_{r\ prim} + H_{r\ sec} \quad [\text{Ecuación 4.1.}]$$

$$H_{r\ 1-2} = 12.07\ m + 2.42\ m$$

$$H_{r\ 1-2} = 14.49\ m$$

Considerando un factor de seguridad de 15%, la pérdida de carga total por fricción de la tubería es:

$$H_{r\ 1-2\ total} = H_{r\ 1-2} \times F.S.$$

$$H_{r\ 1-2\ total} = 14.49\ m \times 1.15$$

$$H_{r\ 1-2\ total} = 16.66\ m$$

4.3.2.3. Selección de la bomba centrífuga.

Se propone la instalación de dos bombas idénticas en paralelo, trabajando sólo una a la vez, esto con el propósito de garantizar la operación del sistema cuando por mantenimiento, o por cualquier otro motivo, una de las bombas esté fuera de servicio.

Se propone que las bombas sean de la marca KSB, ya que cuentan con un buen posicionamiento en el mercado nacional y sus partes de refacción se consiguen fácilmente.

La carga de cada bomba hidráulica se calcula aplicando la ecuación de Bernoulli 4.2 entre la superficie libre del agua en la cisterna y la salida de agua en los atomizadores de la torre de enfriamiento; puntos mostrados en la figura 4.9.

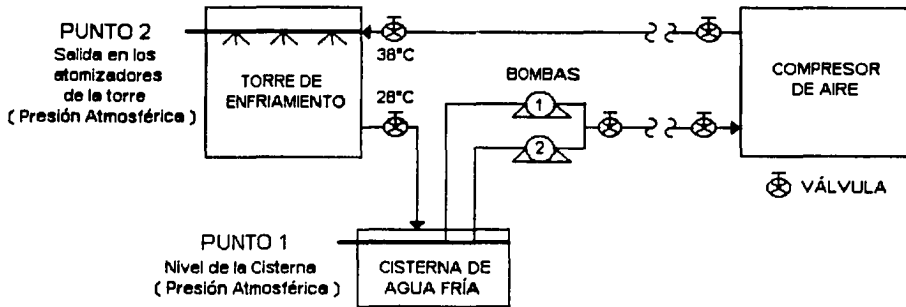


Figura 4.9. Puntos de red de tubería de agua de la torre de enfriamiento y el compresor de aire, donde se aplicará la ecuación de Bernoulli.

Como la presión en estos dos puntos es la presión atmosférica y despejando la carga de la bomba hidráulica (H_B), la ecuación de Bernoulli 4.2. se simplifica a:

$$H_B = (Z_2 - Z_1) + \frac{(V_2^2 - V_1^2)}{2g} + H_{r1-2}$$

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Donde:

H_B = Carga de la bomba hidráulica	[m]
Z_2 = Altura del fluido en el punto 2	[m]
Z_1 = Altura del fluido en el punto 1	[m]
V_2 = Velocidad del fluido en el punto 2	[m / s]
V_1 = Velocidad del fluido en el punto 1	[m / s]
g = Aceleración de la gravedad	[9.81 m / s ²]
H_{r1-2} = Carga por pérdidas de fricción de tubería y accesorios	[m]

En la sección de atomizadores de la torre de enfriamiento, de acuerdo a datos de diseño proporcionados por EVENFRI, se tiene la siguiente relación de velocidades entre la entrada (E) y la salida (S): $V_S = 6V_E$.

Utilizando la ecuación 4.3. de continuidad a la entrada de los atomizadores, se tiene:

$$Q = A_E V_E$$

Sustituyendo la relación de velocidades, proporcionada por EVENFRI, se tiene:

$$Q = A_E \times (V_S / 6)$$

Sabiendo que $V_2 = V_S$ y despejando V_2 ,

$$V_2 = (6 Q) / A_E$$

Como el área A_E corresponde a la sección transversal del tubo, se tiene :

$$V_2 = (6 Q) / (3.1416 \times (d / 2)^2)$$

Donde:

$V_2 =$	Velocidad del fluido en el punto 2	[m / s]
$Q =$	Flujo volumétrico o Gasto = 17 m ³ /hr	[0.004722 m ³ /s]
$d =$	Diámetro del tubo = 2 pulgadas	[0.0508 m]

Sustituyendo valores, se tiene:

$$V_2 = (6 \times 0.004722) / (3.1416 \times (0.0508 / 2)^2)$$

$$V_2 = (0.028332) / (0.0020266)$$

$$V_2 = 13.98 \text{ m/s}$$

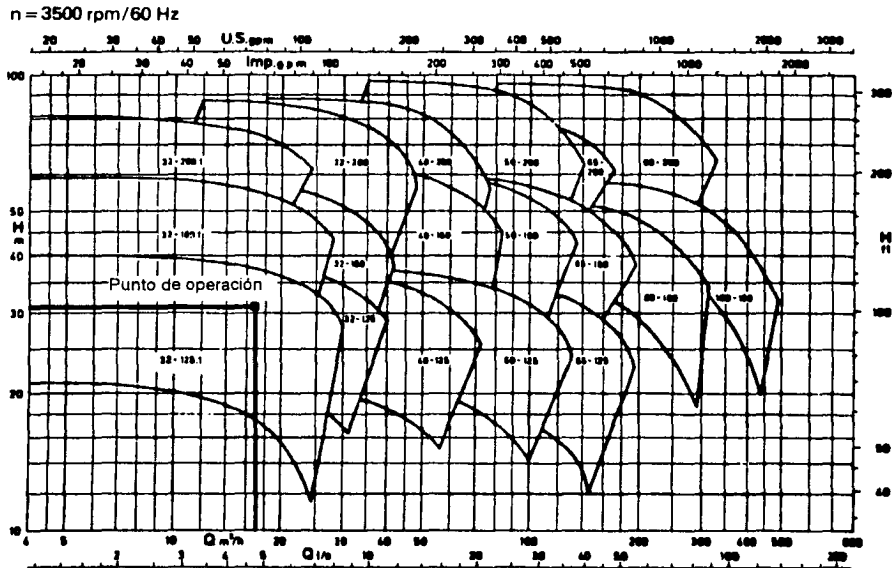
Sustituyendo valores en la ecuación de Bernoulli en los puntos de análisis especificados, sabiendo que de acuerdo a la ubicación de los equipos: $Z_2 - Z_1 = 5.25$ m y despreciando el valor de V_1 que es mínimo, se tiene:

$$H_B = 5.25 + \frac{(13.98^2)}{2 \times 9.81} + 16.66$$

$$H_B = 5.25 + 9.96 + 16.66$$

$$H_B = 31.87 \text{ m}$$

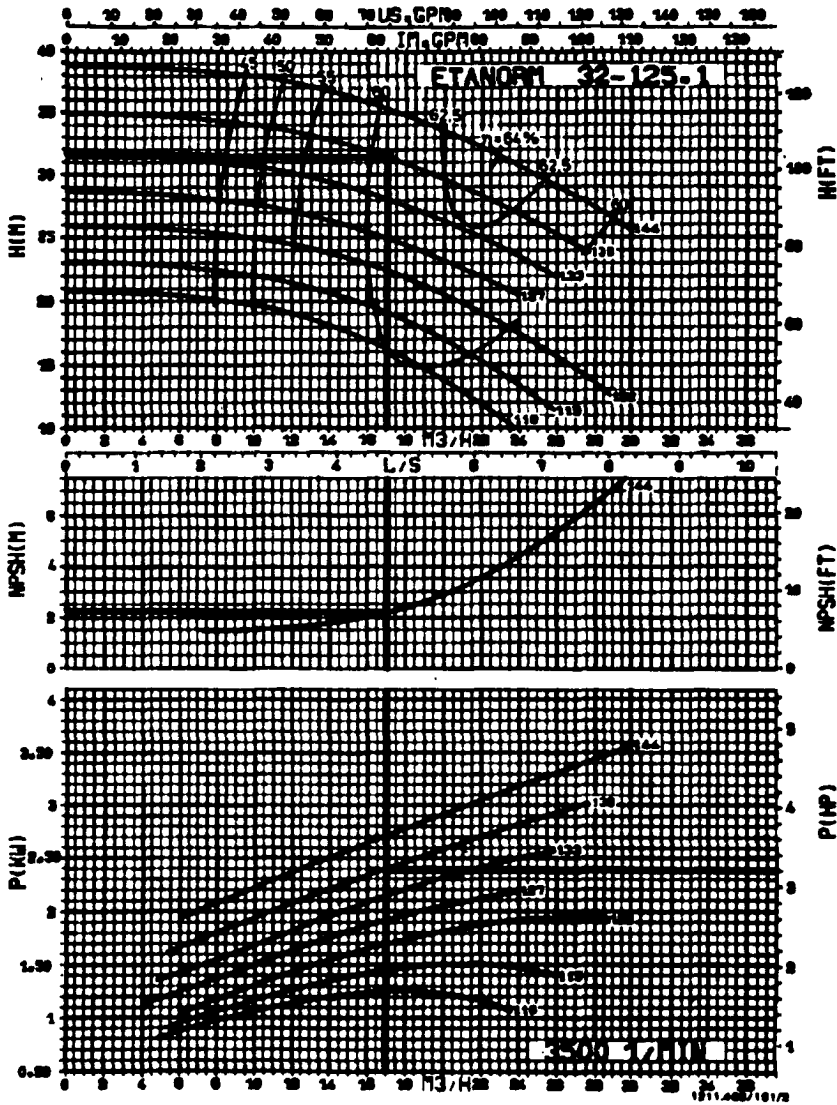
De acuerdo al gasto nominal requerido de $17 \text{ m}^3 / \text{hr}$ y a la carga calculada de la bomba en 31.87 m, utilizando la gráfica 4.1, proporcionada por KSB, se puede seleccionar la bomba hidráulica centrífuga conveniente.



Gráfica 4.1. Curvas para selección de modelo de bombas hidráulicas centrífugas Etanorm de KSB, para flujo de agua.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

De la gráfica anterior 4.1, se propone que las bombas hidráulicas centrífugas sean Etanorm 32-125.1 de KSB y tienen la siguiente curva de operación, gráfica 4.2.



Gráfica 4.2. Curva de operación de la bomba hidráulica Modelo Etanorm 32 160.1 de KSB.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

En esta gráfica 4.2, se puede ver que para el gasto requerido de 17 m³/hr y la carga de 31.87 m, cada una de las bombas propuestas tiene las siguientes características:

Eficiencia hidráulica estimada: 60.5%

Diámetro del impulsor: 0.138 m

NPSH requerido (NPSHR): 2.25 m

Potencia requerida: 3.2 H.P.

Operación a 3500 rpm.

De acuerdo a la potencia requerida por cada una de las bombas y a la disponibilidad comercial, se propone que los motores eléctricos acoplados sean de 5 H.P. con operación a 3500 rpm.

Comprobación del NPSH disponible.

La Ciudad de Tehuacán, Puebla se encuentra a una altura de 1600 m sobre el nivel del mar con una presión atmosférica de 0.835 bar (0.8517 Kg/cm² ó 0.835 x10⁵ Pa) y el peso específico del agua a 28°C, temperatura del agua fría de la torre de enfriamiento es de 9,773 N/m³. Con estos dos datos anteriores se puede determinar la altura representativa de la presión atmosférica de Tehuacán, Puebla (NPSH disponible) y se utiliza la ecuación 4.4, para verificar que es mayor a la altura total representativa de las pérdidas de carga del diseño en la succión de la bomba:

$$\frac{P_{ATM}}{\gamma} > h_s + h_{fs} + NPSHR + P_{PV} \quad [\text{Ecuación 4.4.}]$$

Se propone que el diseño en la succión de la bomba tenga los siguientes elementos: tubería de acero al carbón cédula 40 de diámetro nominal de 2 pulgadas y con longitud de 2 m, un codo de 90° de radio medio y una válvula antirretorno con colador. La altura

estática de succión (h_s), de acuerdo a la instalación de las bombas se estima en 0.25 m.

Para poder sustituir valores en la ecuación 4.4 se determinarán las pérdidas de carga del diseño en la succión de la bomba:

- Se utiliza la tabla 4.2 para conocer la carga por pérdida de fricción en la tubería de succión con longitud de 2 m (6.562 ft.), determinando que este tramo de tubería tiene una pérdida de carga por fricción de 0.7158 ft. (0.218 m).
- De acuerdo a la figura 4.7, el codo de 90° de radio medio tiene una longitud equivalente de 4.5 ft. (1.37 m) y en base a los datos de la tabla 4.2. su pérdida de carga por fricción es de 0.49 ft. (0.1496 m).
- De acuerdo a datos tomados en el libro Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas, del autor Claudio Mataix, la válvula antirretorno con colador, tiene una longitud equivalente de 5.5 m (18.05 ft.) y en base a los datos de la tabla 4.2, su pérdida de carga por fricción es de 1.96 ft. (0.6 m).

Por lo que la pérdida de carga por fricción de la tubería de succión y sus accesorios es de $h_{fs} = (0.218 \text{ m} + 0.1496 \text{ m} + 0.6 \text{ m}) = 0.9676 \text{ m}$

Adicionalmente, interpolando valores en la tabla 4.5. se puede determinar que la altura representativa de la presión de vapor de agua a 28°C es $P_{PV} = 0.3932 \text{ m}$.

Sustituyendo los valores anteriores en la ecuación 4.4, se tiene:

$$\frac{0.835 \times 10^5}{9,773} > 0.25 + 0.9676 + 2.25 + 0.3932$$

$$8.54 \text{ m} > 3.86 \text{ m}$$

Con la desigualdad, se comprueba que las bombas hidráulicas no cavitarán.

4.3.2.4. Cisterna.

Como se mencionó anteriormente y para satisfacer posibles crecimientos futuros de la planta se propone que la cisterna tenga una capacidad de 12 m³ y las dimensiones propuestas son: 2 m de largo, 2 m de ancho y 3 m de profundidad, con lo que se garantiza el suministro y reposición de agua al circuito.

Adicionalmente, se propone que la cisterna tenga alimentación de agua que esté controlada por válvula de cierre accionada por flotador y también desfogue a la tubería de aguas negras para que el agua no se rebose y pueda ser derivada en caso de paro o mantenimiento del equipo.

4.3.3. Red de tubería de circulación de agua del chiller para enfriamiento de la sopladora.

4.3.3.1 Generalidades.

El sistema de circulación de agua para el equipo *chiller* es un circuito cerrado, donde el agua se bombea hacia la sopladora. La localización propuesta de los equipos se puede ver en la figura 4.1.

Como el agua de enfriamiento tiene una temperatura considerablemente menor a la temperatura ambiental promedio anual, se propone proteger las tuberías de alimentación y retorno de agua con aislante térmico con espesor de 2 pulgadas, a base de medias cañas de poliuretano y forro de aluminio, con lo que se evita que la

temperatura del agua sufra incremento. En la figura 4.10. se muestra el arreglo básico de la tubería de agua para el *chiller* y la sopladora.

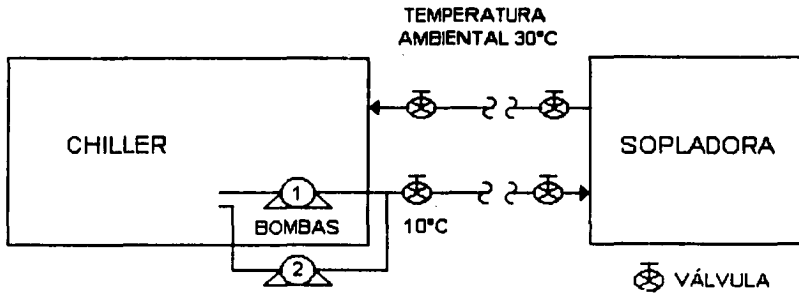


Figura 4.10. Esquema del arreglo básico de la tubería de agua del chiller y enfriamiento de la sopladora.

4.3.3.2. Selección de la tubería y accesorios.

En base al gasto de agua especificado por el *chiller*: 30 m³/hr (132.10 GPM) y a la especificación de las conexiones de entrada y salida del *chiller* seleccionado, se propone que la tubería para el circuito de agua del *chiller* sea de acero al carbón cédula 40 con un diámetro nominal de 2.5 pulgadas.

De acuerdo a la figura 4.3, la red de tubería de agua para el *chiller* y la sopladora tendrá 4 tramos de tubo recto para la alimentación de agua fría a la sopladora y 7 tramos de tubo recto para el retorno de agua al *chiller*; es decir un total de 11 tramos de tubo recto. Las longitudes de tramos rectos de tubo se muestran en la tabla 4.8.

Por la trayectoria de la tubería y localización de los equipos, se requiere instalar un total de 9 codos de 90° de radio medio. Para el control de flujo y servicio al sistema se propone instalar 4 válvulas de compuerta: a la salida y entrada de la sopladora así como a la entrada y salida del *chiller*.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

	Tubería de alimentación Longitud de tubo (m)	Tubería de retorno Longitud de tubo (m)
Tramo 1	22.0	0.5
Tramo 2	12.2	2.0
Tramo 3	1.0	1.0
Tramo 4	0.5	19.0
Tramo 5	----	12.0
Tramo 6	----	1.0
Tramo 7	----	0.5
Total	35.7	36

Longitud total de tubo recto en la tubería de alimentación y retorno	71.5 m (234.591 ft)
--	-----------------------

Tabla 4.8. Tramos de tubo recto y longitud total de tubería para el chiller y la sopladora.

Cálculo de pérdida de carga por fricción de la red de tubería.

- **Pérdidas primarias:** Empleando la tabla 4.2, con el gasto especificado por el *chiller* de 30 m³/hr (132.09 GPM), y efectuando interpolación con los datos de esta tabla, la carga por pérdidas primarias de fricción para tubo de acero al carbón cédula 40 con diámetro de 2.5 pulgadas es de 13.34 ft. por cada 100 ft. de tubería.

Por lo que la pérdida primaria de carga por fricción, para la longitud total de tubo recto de la tubería, es de 31.29 ft. (9.54 m).

- **Pérdidas secundarias:** De acuerdo al nomograma de longitud equivalente, figura 4.7, para tubería de diámetro nominal de 2.5 pulgadas, la longitud equivalente de un codo de 90° de radio medio es de 5.5 ft (1.6764 m) y la

longitud equivalente de una válvula de compuerta en condición totalmente abierta es de 1.3 ft (0.396 m).

De acuerdo a los accesorios que se propone instalar, la longitud equivalente total de los accesorios es de 54.7 ft (16.67 m), por lo que la pérdida secundaria de carga por fricción, de acuerdo a la tabla 4.2, sería de 7.29 ft (2.22 m)

Aplicando la ecuación 4.1, se tiene:

$$\begin{aligned} H_{r\ 1-2} &= H_{r\ prim} + H_{r\ sec} && \text{[Ecuación 4.1.]} \\ H_{r\ 1-2} &= 9.54\ m + 2.22\ m \\ H_{r\ 1-2} &= 11.76\ m \end{aligned}$$

Considerando un factor de seguridad de 15%, se tiene:

$$\begin{aligned} H_{r\ 1-2\ total} &= H_{r\ 1-2} \times F.S. \\ H_{r\ 1-2\ total} &= 11.76\ m \times 1.15 \\ H_{r\ 1-2\ total} &= 13.52\ m \end{aligned}$$

4.3.3.3. Bomba centrífuga del chiller.

El *chiller* propuesto cuenta con bomba hidráulica centrífuga la cual está especificada por el fabricante con una potencia de 3 Kw (4.023 H.P.); adicionalmente se propone instalar otra igual en paralelo, trabajando sólo una a la vez, esto con el propósito de garantizar la operación del sistema cuando por mantenimiento, o por cualquier otro motivo, una bomba esté fuera de servicio.

De acuerdo a las especificaciones de la bomba instalada en el *chiller*, ésta tiene una capacidad de carga de 20 m, por lo que es suficiente para superar la carga calculada por pérdidas de fricción en la red de tubería.

Capítulo 5 Análisis costo beneficio.

En el presente capítulo se estudian los aspectos financieros y operacionales a considerar para poner en marcha el funcionamiento de la línea de soplado de botellas de PET para refrescos.

Primeramente, se presentan los costos de la inversión de los equipos y elementos necesarios para operar la línea.

Posteriormente se presentan los impactos operacionales que se tendrían que implementar para poder producir las botellas.

Y finalmente, se realiza un análisis financiero que será el que indicará la viabilidad financiera de la propuesta. En este apartado se presentan también los cálculos de algunos costos fijos propios de la operación.

5.1. Análisis de costos.

En el desarrollo de este capítulo se presentan los costos de adquisición del equipo propuesto en el presente proyecto. Se considerarán como proveedores de maquinaria, equipo y servicios a compañías líderes en el mercado por la confiabilidad, calidad y seriedad en la entrega de sus productos. Todos los precios que se manejan están expresados en dólares americanos USD.

Para la maquinaria y equipo, se tiene la tabla 5.1:

No.	Descripción	Marca	Modelo	Precio (USD)
1	Sopladora de PET	Sidel	SBO 24	1'200,000.00
2	Compresor de alta presión	ABC	4HA-6BIS-LT	210,000.00
3	Chiller de 30 T.R.	Frigel Heavygel	6H100 AS	23,000.00
4	Torre de enfriamiento	Evenfri	EVE-4-3-3.0	3,700.00
5	Paletizador y envolvedor	Acmi	Rasar P260, Rotofilm 115	250,000.00
6	Transportadora de aire	Acmi	Conveyor	100,000.00
Subtotal 1				1,786,700.00

Tabla 5.1 Descripción y costo de maquinaria y equipo.

Para la instalación de la línea hidráulica se consideran dos líneas aéreas con sistema de fijación al techo de la nave industrial: la primera para la torre de enfriamiento del compresor con longitud total de 110.7 metros con un diámetro nominal de 2 pulgadas con tubo de acero al carbón cédula 40; la trayectoria de esta línea está indicada en la figura 4.5. Para la línea dos que es la que corresponde al *chiller*, se consideran 71.5 metros con un diámetro de 2.5 pulgadas con tubo de acero al carbón cédula 40, el tubo sigue la trayectoria indicada en la figura 4.3.

Los costos de instalación y puesta en marcha de las líneas hidráulica, neumática, eléctrica y obra civil para la cimentación, pared del compresor y canal de distribución para la tubería de la sala de soplado en la tabla 5.2.

No.	Sistema	Descripción	Precio USD
1	Línea hidráulica	Línea hidráulica de 110.7 metros de tubo de acero al carbón cédula 40 de 2 pulgadas, para torre de enfriamiento. 2 bombas hidráulicas Etanorm32-125.1 y 2 motores Eléctricos de 5 HP.	23,500.00
2	Línea hidráulica	Línea hidráulica de 71.5 metros de tubo de acero al carbón cédula 40 de 2.5 pulgadas, para enfriamiento de moldes. Bomba Hidráulica y motor eléctrico similar a los instalados en el Chiller.	24,750.00
3	Línea neumática	Línea neumática de 47 metros de tubo de acero al carbón cédula 80 de 4 pulgadas, para aire de alta presión.	28,200.00
4	Obra civil	Construcción de cimentación del compresor, pared de 50m ² , con puerta metálica de dos hojas de 4m x 3 m, cisterna para torre de enfriamiento de 2m x2m x3m, Canal de distribución subterráneo 0.60 m ancho, 0.50 m profundidad y largo de 42 m.	26,500.00
5	Circuito eléctrico	Circuito eléctrico para alimentación de sopladora, compresor, torre de enfriamiento y chiller, 125 metros de cableado.	9,300.00
Subtotal 2			112,250.00

Tabla 5.2. Costos de servicios de la instalación.

De una forma más amplia, se presenta a continuación la descripción de los servicios de instalación del proyecto.

1. Instalación y puesta en servicio de la línea hidráulica de 110.7 metros de tubo de acero al carbón cédula 40 de 2 pulgadas de diámetro para el sistema de enfriamiento del compresor, línea aérea, siguiendo trayectoria indicada en la figura 4.5.
2. Instalación y puesta en servicio de la línea hidráulica de 71.5 metros de tubo de acero al carbón cédula 40 de 2.5 pulgadas de diámetro para el sistema de

enfriamiento de la sopladora, línea aérea, siguiendo la trayectoria indicada en la figura 4.3.

3. Instalación y puesta en servicio de la línea neumática de 47 metros de tubo de acero al carbón cédula 80 de 4 pulgadas de diámetro para el suministro de aire de alta presión a la sopladora, línea aérea, siguiendo la trayectoria indicada en la figura 4.4.
4. Obra civil para la construcción de la cimentación del compresor de alta presión de acuerdo a especificaciones del fabricante del compresor, pared de 50 m² con puerta metálica de dos hojas de 4m x 3m, cisterna para torre de enfriamiento de 2m x 2m x 3m y canal de distribución subterráneo de 0.60 m x 0.50 m x 42 m de largo.
5. Instalación y puesta en servicio del circuito eléctrico para alimentación de la sopladora, compresor, torre de enfriamiento y *chiller*, aproximadamente 125 metros de tendido de cable calibre "un cero", sobre charola de aluminio con soportes al techo.

El costo total de la adquisición de equipos e instalación de servicios para la línea se muestra en la siguiente tabla 5.3.

Costo de maquinaria y equipo	1,786,700.00
Costo de servicios de instalación	112,250.00
TOTAL (USD)	1,898,950.00

Tabla 5.3. Costo total de la adquisición de equipos e instalación de servicios.

Los costos anteriores se tomarán en cuenta para el análisis financiero.

5.2. Análisis operativo.

5.2.1. Generalidades.

Existen tres indicadores fundamentales para evaluar la operación de una línea de soplado de botellas de PET:

- **Disponibilidad:** Es el porcentaje de tiempo que un equipo se encuentra en operación, dentro del tiempo disponible para el mismo
- **Utilización:** Es el porcentaje de tiempo que se opera un equipo, en relación al tiempo en que éste se encuentra disponible.
- **Costo:** Es la cantidad de dinero, que de forma directa o indirecta, se requiere para mantener a la línea operando; está integrado fundamentalmente por: mano de obra directa e indirecta, materia prima, materiales directos e indirectos y costo energético.

Para poder hacer un análisis sobre el impacto operativo que la línea de soplado de botellas de PET tendrá en la Compañía Embotelladora, es necesario analizar las variables que impactan a estos tres indicadores.

Se puede afirmar de forma general que las tres principales variables que afectan directamente en la operación de la línea son:

- Mano de obra
- Manejo de materiales
- Mantenimiento

5.2.2. Mano de obra.

Actualmente las líneas de embotellado son abastecidas de botellas de PET, por medio de un equipo formado por tres montacarguistas, los cuales transportan las tarimas de botella de PET desde el almacén de empaques hasta las máquinas depaletizadoras de cada línea.

Introducir una línea de soplado de botellas de PET requiere tomar en cuenta los siguientes aspectos:

Típicamente para la operación de una sopladora de botellas de PET se necesitan tres personas que realizan las siguientes actividades:

Operador 1: Es responsable de mantener las condiciones de soplado de acuerdo a los requerimientos establecidos por el fabricante, para garantizar una operación eficiente y una calidad aceptable de las botellas producidas.

Se asegura de mantener cargada la tolva de alimentación de preforma, coordinando esta actividad con el montacarguista.

Operador 2: Es auxiliar del Operador 1. Cuando se encuentra funcionando la paletizadora se asegura que ésta cuente con tarimas, separadores de cartón y que la envolvente de *pallets* tenga película plástica.

Es también responsable de llevar periódicamente las muestras de botella al laboratorio de control de calidad. Asimismo de recorrer la línea de soplado para corregir problemas de atorones de botella, en caso que se presenten.

Se encarga también de relevar al operador 1 cuando éste tome los descansos permitidos durante el turno.

Técnico de Laboratorio: Es responsable de realizar pruebas de calidad a la botella producida en la sopladora y a la preforma que se recibirá de los proveedores .

Como la línea trabajará durante los tres turnos, se requerirán 6 operadores y tres técnicos de laboratorio, que deben cumplir con el perfil que el área de Recursos Humanos determine para este tipo de trabajadores.

Por el tipo de actividad que realizarán las seis personas que ocuparán el puesto de operador 1 y 2, su contratación será como personal sindicalizado, y se deberá establecer con Recursos Humanos la estrategia para no alterar las condiciones laborales existentes en la Compañía Embotelladora.

Por otro lado, los técnicos de laboratorio se contratarán como personal de confianza y en todos los casos se buscará respetar la equidad interna de la planta.

Antes de iniciar con la operación de la línea será importante establecer un período de inducción para los operadores de la misma; dicha inducción se enfocará al conocimiento general de la compañía y a los conocimientos necesarios para la operación de la línea de soplado.

En términos generales, esta capacitación debe incluir:

- Introducción a la Compañía Embotelladora.
- Elementos fundamentales de la Cultura Organizacional.
- Operación y mantenimiento de la sopladora.
- Operación y mantenimiento de equipos periféricos.

- **Requerimientos de calidad en la industria refresquera.**
- **Aspectos de seguridad.**

A continuación se describe de forma general la operación normal de la línea de producción de botellas de PET:

La línea de soplado de botellas de PET y la línea de embotellado, deben estar sincronizadas, esto es, produciendo a la misma velocidad para evitar faltantes de botella o acumulaciones innecesarias en los transportadores.

La sopladora es alimentada de preformas en la tolva por medio de un montacargas. Al ser una máquina automática, no requiere de procesos manuales para la elaboración de la botella, sin embargo requiere de la atención constante por parte del Operador 1 para mantener los parámetros de operación óptimos.

En caso de que la línea de embotellado pare por cualquier razón, automáticamente entrará en operación el paletizador, a fin de generar un *stock* de seguridad que se utilizará ya sea para abastecer a la línea 1 cuando la sopladora pare por fallas o por mantenimientos programados, así como para abastecer de botella a la línea 2. Será la Jefatura de Producción de la Compañía Embotelladora la responsable de determinar la utilización de la botella paletizada.

Cuando entre en operación el paletizador, será necesario que un montacarguista lleve las tarimas al almacén de botella o a la línea 2.

Para asegurar que la botella de PET cumpla con los requerimientos de calidad, el técnico de calidad debe realizar las siguientes pruebas:

A la preforma:

- **Prueba del polariscopio:** Consiste en verificar la distribución de esfuerzos en la inyección de la preforma.

A la botella de PET:

- **Espesor de pared de botella:** Mide que la pared de la botella cumpla con las especificaciones de diseño.
- **Análisis de "Stress Cracking":** Mide qué tan resistente es la botella a la presión del CO₂ contenido en el refresco.
- **Prueba de caída:** Mide la resistencia de la botella llena de producto al dejarla caer de una altura de 3.0 m.

Impactos adicionales:

Debido a que la operación de la línea 1 de soplado abastecerá de forma directa la botella a la línea de embotellado, se debe reducir en una persona por turno, el número de montacarguistas que abastecen de botella a las líneas de embotellado. Se recomienda evaluar a estos montacarguistas como candidatos para el puesto de operador 2.

5.2.3. Manejo de Materiales.

En cuanto al manejo de materiales, se debe considerar principalmente:

Materia Prima: es únicamente la preforma, la cual será suministrada por dos de los proveedores líderes en el mercado nacional.

Las preformas se almacenan en contenedores llamados *gaylords*, los cuales tiene una capacidad de 12,336 preformas cada uno, éstos se pueden estibar en pilas de hasta 4 *gaylords*, en el almacén de materia prima. El espacio que ocupan estos contenedores es mucho menor al que ocupa la botella de PET, debido a que la preforma es mucho más compacta que la botella, lo cual optimizará los espacios de almacenamiento.

Para asegurar el abasto de botella, se recomienda tener en almacén de materiales de empaque 88 *gaylords* de preformas, que es el equivalente a dos días de producción.

Producto terminado: En la operación normal, la botella de PET es enviada directamente de la sopladora a la línea de embotellado, por medio de los transportadores, en cuyo caso no se requiere manejo adicional.

En el caso de que la línea embotelladora se detenga, y la Jefatura de Producción decida continuar con la producción de botellas de PET, éstas se paletizarán y se enviarán al almacén de botella, por medio de un montacargas. Estas botellas podrán ser utilizadas tanto en la línea 2 como en la línea 1, en caso de alguna falla en la sopladora, o por encontrarse ésta en mantenimiento.

5.2.4. Mantenimiento.

Actualmente la planta cuenta con un equipo de mantenimiento, formado por un grupo de 16 técnicos que están organizados por área de especialidad:

- Eléctrica.
- Electrónica.
- Mecánica.

- **Neumática.**

Debido a que las especialidades de los operadores actuales son compatibles con los requerimientos de la línea de soplado de botellas de PET y dado que su carga de trabajo actual les permite dedicar tiempo para una línea adicional, no se requiere contratar técnicos adicionales para dar mantenimiento a la línea de soplado.

Sin embargo será necesario capacitar a cuatro técnicos sobre los cuidados que requiere la sopladora SIDEL SBO24, así como las características especiales de mantenimiento de dicho equipo. De estos técnicos, trabajarán dos durante el primer turno, mientras que en el segundo y tercer turno sólo se contará con un técnico.

Esta capacitación está incluida dentro de contrato de compra de la sopladora.

Se deberá hacer el cuadro de materiales mínimos que se requiere tener en el almacén de partes para dar soporte a la sopladora, al compresor de alta presión y al sistema de paletización de botella, cuidando mantener niveles óptimos.

Para algunos equipos, como la torre de enfriamiento y el *chiller*, no se requiere hacer un pedido especial de partes ya que actualmente la planta cuenta con este tipo de equipos y sus componentes son estándar, por lo que se tiene en el almacén el *stock* necesario para asegurar su operación.

En la tabla 5.4 se muestra un resumen comparativo de los diferentes impactos operativos que la línea de soplado de botellas de PET tendrá sobre la línea de embotellado.

	Línea de embotellado SIN sopladora de botellas de PET	Línea de embotellado CON sopladora de botellas de PET	Impacto
Botella de PET	Se compra a proveedores	Se produce en la planta	Producir las botellas en la misma planta brinda ahorros económicos, se asegura el abasto de botella y proporciona mayor flexibilidad a la operación
Mano de obra directa		Se requiere contratar dos operadores y un técnico de laboratorio	Se recomienda que el montacarguista que no se requerirá ocupe la posición del Operador 2 para evitar despido
Mano de obra indirecta	Se tienen tres montacarguistas para el manejo de botellas vacías de PET	Se requieren únicamente dos montacarguistas	Se reduce el costo del manejo de la botella debido a que se requiere un montacarguista menos.
Almacén de botellas	Se requiere de gran espacio para almacenar botella vacía	Se reduce el requerimiento de espacio, ya que la botella será alimentada directamente a la línea de embotellado	Al reducirse el requerimiento de espacio para la botella vacía, se da mayor flexibilidad en el uso de los almacenes
Materia prima	Se compra la botella lista para embotellado	Se requiere de preforma	Almacenar la preforma requiere de menor espacio
Capacitación		Se requiere capacitación en la operación de la sopladora	Para el demás equipo no se requiere capacitación adicional, ya que son equipos conocidos por los operarios
Mantenimiento	Se tienen 16 operadores	No se contrata ningún operario adicional	Debido a la experiencia del equipo de mantenimiento y por ser equipos nuevos con garantía, no se requiere contratar operadores adicionales

Tabla 5.4. Impactos de tipo operacional de la línea de soplado propuesta.

5.3 Análisis Financiero.

5.3.1. Introducción.

En este apartado se presenta la viabilidad financiera del proyecto, basado en los datos de los apartados 5.1 y 5.2.

Para la elaboración de la información financiera que se presenta en este apartado se parte de las siguientes consideraciones:

- Todas las cifras se expresan en dólares americanos (USD).
- Se considera un tipo de cambio de \$ 10.00 MXN por dólar.
- Todos los pagos son en efectivo, no se considera ningún tipo de financiamiento a los clientes.

- Los únicos impuestos que se contemplan son los correspondientes al pago de nóminas, IVA, ISR. Otros impuestos no se incluyen en los cálculos.
- No se considera inflación en los datos.
- Las depreciaciones de los activos fijos se calculan en base al 20% anual.
- El mantenimiento anual de los equipos se considera como el 3% de la inversión total en maquinaria.

5.3.2. Consideraciones para el análisis.

5.3.2.1. Cálculo de la producción anual.

Es necesario calcular la producción anual de botella para obtener cuál será el gasto que se realizará en preformas que será la principal materia prima del proceso. Para esto se hacen las siguientes consideraciones:

- La línea trabajará 6 días a la semana.
- La sopladora trabajará 22.5 horas diarias.

- Se considera que se realizarán 8 horas semanales de mantenimiento preventivo.
- Se consideran 305 días laborables al año.
- El costo de la preforma es de 45.21 dólares por millar.

De este modo se tiene que:

$$(6 \text{ días}) (22.5 \text{ hrs.}) = 135 \text{ horas semanales}$$

Restando las 8 horas semanales de mantenimiento preventivo se tiene que:

$$135 \text{ horas} - 8 \text{ horas} = 127 \text{ horas semanales}$$

$$127 / 6 = 21.16 \text{ horas diarias}$$

Considerando 305 días laborables al año, se tiene:

$$(305 \text{ días}) \times (21.16 \text{ horas}) = 6455.83 \text{ horas}$$

Por lo tanto, considerando una eficiencia del 90% se tiene que la cantidad de botellas producidas al año son:

$$(6455.83 \text{ horas}) (36720 \text{ botellas/hora}) (.9) = 213,352,380 \text{ botellas}$$

Si la preforma cuesta \$ 45.21 USD por millar, se tiene que el costo anual es de:

$$(213,352,380 \text{ botellas}) (45.21/1000) = 9'645,661.10$$

Monto anual de gasto en preformas: \$ 9'645,661.10 USD

5.3.2.2. Cálculo de consumo eléctrico.

De acuerdo a lo mencionado en el capítulo 3 donde se presentó la selección de los equipos de la línea, y sus consumos de corriente, en la tabla 5.5 se presentan los kilowatts consumidos.

Equipo	kW
Sopladora	174
Chiller	33.7
Compresor	235
Torre de enfriamiento	2.2
Transportadores	15
Paletizador	5
Envolvedora	4
TOTAL	468.9

Tabla 5.5 Consumo eléctrico de los equipos.

De datos obtenidos de la Compañía de Luz y Fuerza del Centro (octubre 2002), se tiene que el costo promedio para el Kilowatt hora es de \$ 0.45 MXN, por lo que tenemos los siguientes resultados:

Número total de horas anuales: 6,455.83 horas

$$(468.7 \text{ kW}) (6,455.83 \text{ h}) = 3'025,847.52 \text{ kWh}$$

Multiplicando, se tiene,

$$(3'025,847.52 \text{ kWh}) (\$ 0.45 \text{ MXN} / \text{kWh}) = \$ 1'361,631.38 \text{ MXN}$$

Haciendo la conversión a dólares americanos, se tiene:

Consumo anual de electricidad = \$ 136,163.13 USD.

5.3.3. Resultados del análisis financiero.

Con base en los resultados obtenidos previamente en este capítulo y tomando en cuenta igualmente los datos mencionados en el capítulo 1, se realizó un análisis del retorno de la inversión que nos muestra el flujo de efectivo para los primeros 5 años de operación de la línea. Este análisis se muestra en la tabla 5.5.

Para llevar a cabo este análisis se separaron los gastos en inversiones y en gastos recurrentes.

Del análisis se puede observar que financieramente el proyecto es viable, y esto se aprecia principalmente por el valor presente de los ahorros que es positivo, lo que significa que realmente se tiene un beneficio, así como al observar la TIR (Tasa interna de Retorno) que es del 52%.

Análisis de Retorno sobre inversión

(En dólares americanos)

Resumen de gastos actuales	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Costo de la botella anual	\$ 13,014,495	\$ 13,014,495	\$ 13,014,495	\$ 13,014,495	\$ 13,014,495
Total de gastos actuales	\$ 13,014,495	\$ 13,014,495	\$ 13,014,495	\$ 13,014,495	\$ 13,014,495
Estimado de inversiones relacionadas	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Inversión inicial en equipo	\$ 1,786,700	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Inversión inicial en instalación	\$ 112,250	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Gastos recurrentes					
Costo de materia prima (preforma)	\$ 9,645,661.00	\$ 9,645,661.00	\$ 9,645,661.00	\$ 9,645,661.00	\$ 9,645,661.00
Salarios	\$ 14,454.00	\$ 14,454.00	\$ 14,454.00	\$ 14,454.00	\$ 14,454.00
Costo de electricidad (KWh)	\$ 136,163.13	\$ 136,163.13	\$ 136,163.13	\$ 136,163.13	\$ 136,163.13
Mantenimiento equipos	\$ 53,601.00	\$ 53,601.00	\$ 53,601.00	\$ 53,601.00	\$ 53,601.00
Total de inversiones	\$ 11,748,829	\$ 9,849,879	\$ 9,849,879	\$ 9,849,879	\$ 9,849,879
Flujos de Efectivo	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Estimación de Gastos actuales	\$ 13,014,495	\$ 13,014,495	\$ 13,014,495	\$ 13,014,495	\$ 13,014,495
Estimación de Inversiones	-\$ 11,748,829	-\$ 9,849,879	-\$ 9,849,879	-\$ 9,849,879	-\$ 9,849,879
Flujos de Efectivo	\$ 1,265,666	\$ 3,164,616	\$ 3,164,616	\$ 3,164,616	\$ 3,164,616
Tasa de descuento	10%				
Factor de descuento	1.100	1.210	1.331	1.464	1.611
Flujos descontados (no se asume ninguna perpetuidad)	\$ 1,150,606	\$ 2,615,385	\$ 2,377,823	\$ 2,181,475	\$ 1,984,878
Valor presente de los ahorros (Estimación)	\$ 10,270,066.47				
Tasa interna de retorno (ROI)	32%				

Tabla 5.6. Cálculo del Retorno sobre la Inversión

Conclusiones.

Después de realizar el análisis para la propuesta del proyecto sobre el diseño de una línea de producción de botellas de PET para refrescos se puede concluir lo siguiente:

De acuerdo al análisis que se realizó en el capítulo 1 sobre la empresa, se determinó que el abastecimiento de botellas de PET es un requerimiento fundamental para la operación de la Compañía Embotelladora.

El mercado de botellas de PET está en constante evolución; la demanda de productos embotellados en este tipo de envase se incrementa anualmente, lo que asegura una demanda creciente sostenida de este producto, haciendo atractiva la instalación de la línea de producción de botellas en la planta.

Debido a los frecuentes incumplimientos de los productores de botellas de PET en las temporadas de alta demanda, la empresa pierde oportunidad de negocio en dichos periodos del año, lo que redundará en pérdidas económicas. Al contar con una línea de producción de botellas de PET instalada en la planta, se asegura el abastecimiento del producto tanto en temporada normal como en las temporadas que suben las ventas.

Actualmente el requerimiento de espacio por parte de las botellas de PET es muy grande, debido a que la botella paletizada que se recibe de los proveedores es muy voluminosa. La alimentación directa de botellas de PET a la línea de embotellado a partir de una sopladora, garantizará un mejor aprovechamiento del espacio disponible en planta, pues la preforma requiere de menor espacio para su almacenamiento.

Después de un análisis de requerimientos para ajustar la línea propuesta con la demanda actual de la línea 1 de embotellado, se encontró que los equipos comerciales que satisfacen los requerimientos del proyecto y que son considerados como los principales son: una sopladora marca SIDEL SBO24 distribuida por SIDEL México y un compresor tipo boxer, modelo 4HA-6-BIS-LT distribuido por ABC.

Los equipos adicionales, tales como: *chiller*, torre de enfriamiento, paletizador, transportadores, etc; son equipos convencionales como algunos de los que actualmente se encuentran funcionando en la Compañía Embotelladora.

Para todos los equipos requeridos por la línea de producción de botellas de PET, se cuenta con proveedores en México, que brindan soporte técnico que será de utilidad durante la ejecución del proyecto.

Del mismo modo, se cuenta con proveedores confiables de preforma.

Económicamente el proyecto también es viable, ya que en función de la inversión inicial, y en base a la demanda proyectada para los siguientes cinco años, el retorno de la inversión se tendrá antes de tres años, lo cual está dentro de los estándares financieros establecidos por la Compañía Embotelladora.

Finalmente, en base al análisis realizado en este estudio, se puede concluir que el proyecto es económica y técnicamente viable, por lo que se recomienda su realización.

Una vez iniciada la producción de botellas de PET en la planta, se obtendrán los siguientes beneficios:

- **Disponibilidad del envase:** ya que al ser producido en la planta, se elimina la dependencia de los proveedores de botella.
- **Ahorro económico:** debido a que el costo de producir la botella en la planta es menor al de comprarlo a proveedores.
- **Mejor aprovechamiento del espacio:** ya que la preforma ocupa menos espacio que la botella de PET, y ésta será alimentada directamente a la línea.

Bibliografía.

1. Arazo, J.L. 1999. *Inyección de Termoplásticos*. Emitec Group. Barcelona.
2. Atlas Copco. 1992. *Manual Sobre aire comprimido y su aplicación en la industria*. Venezuela.
3. Baumeister, T., et al. 1990. *Marks Manual del Ingeniero Mecánico*. Segunda Edición en Español. México
4. Centro Empresarial del Plástico. 1994. *Enciclopedia del plástico*. México.
5. Centro Empresarial del Plásticos. 1999. *Manual Diplomado de Plásticos*. México
6. IMECPLAST. 2001. *Equipos de Refrigeración*. Grupo IMECPLAST. México
7. KSB. 1996. *Manual de Bombas Centrifugas*
8. Kuhne, G. 1990. *El Plástico en la Industria*. Tomos 1,2,3,4. GG / México.
9. Mataix, C. 1992. *Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas*. Editorial Harla. México
10. Panorama Plástico. 1990. *Moldeo por inyección de plásticos*. México.
11. Rosato, D., et al. 1989. *Blow Molding Handbook*. Hanser Publishers. USA.
12. Littleton, C. 1962. *Industrial Piping*. 2nd Edition. Mc. Graw Hill. USA.
13. Whelan, T. 1991. *The Dynisco Injection Molders Handbook*. USA.