

T  
621.1  
U IL



# ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

## Facultad de Ingeniería en Mecánica

"Sistema de vapor para una planta de hormigón asfáltico"

TESIS DE GRADO

Previa la obtención del Título de:

**INGENIERO MECÁNICO**

Presentada por:

**FERNANDO EDUARDO VILLALOBOS GRAY**

GUAYAQUIL - ECUADOR

1996

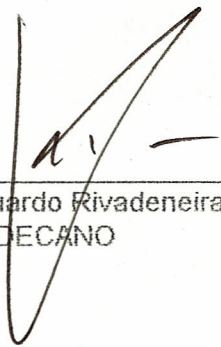
## **AGRADECIMIENTO**

A todas las personas que me ayudaron en la elaboración de la presente tesis, en especial al Ing. Ángel Vargas Zúñiga e Ing. Rafael Drouet por todas las sugerencias recibidas.

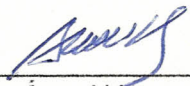
## DEDICATORIA

A mis padres y hermanos  
a mis amigos y a todas  
aquellas personas que de  
una u otra forma me  
apoyaron durante todos  
estos años.

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN



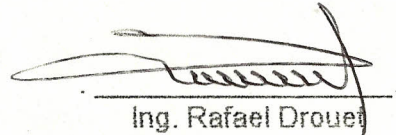
Ing. Eduardo Rivadeneira  
DECANO



Ing. Angel Vargas Zúñiga  
DIRECTOR DE TESIS



Ing. Antonio Viteri  
VOCAL



Ing. Rafael Drouet  
VOCAL

## DECLARACIÓN EXPRESA

"La responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado, me corresponden exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL".

(Reglamento de Graduación de la ESPOL).



.....  
Fernando E. Villalobos G.

## RESUMEN

La generación de vapor tiene una infinidad de aplicaciones en procesos industriales.

El presente trabajo describe la unidad generadora, calcula y selecciona cada uno de los sistemas requeridos en la planta de asfalto con una producción de 600.000 toneladas por año.

Los cálculos se efectuarán aplicando las normas, mecanismos y medidas tendientes a mejorar los recursos disponibles como: diseño de los calentadores de AP3, optimización de la combustión, tratamiento del agua, supresión de fugas, recuperación de condensado y minimización de pérdidas de energía calorífica en las tuberías.

Se toman en cuenta las referencias dadas por la Cleaver Brooks, tratando de obtener la máxima eficiencia y seguridad en cada uno de los equipos, que forman parte de la instalación de generación de vapor, distribución y recuperación de condensado.

Por último, se indicarán la granulometría que constituye la carpeta asfáltica, así como las pruebas de laboratorio a las que se le somete al hormigón asfáltico.

## CONTENIDO GENERAL

	pág
Resumen .....	VI
Contenido general .....	VII
Índice de figuras .....	XI
Índice de tablas .....	XII
Simbología .....	XIII
Introducción .....	XIV

### Capítulo I

#### Características generales del asfalto

1.1 Propiedades de los asfaltos	4
---------------------------------	---

### Capítulo II

#### Servicios de planta, selección de la caldera y tipo de carga térmica

2.1 Servicios de instalación	18
2.1.1 Operaciones de la planta	18
2.2 Requerimientos	21
2.2.1 Suministro de agua	22
2.2.2 Suministro de vapor	22
2.2.2.1 Esquema de la distribución en la planta	25
2.2.3 Electricidad	25
2.2.3.1 Tabla de requerimientos de electricidad	26
2.2.4 Aire comprimido	26

	pág.
2.2.5 Ventilación	27
2.3 Selección de la caldera •	27
2.3.1 Tipo de carga térmica	28
2.3.1.1 Tanque de recepción y almacenamiento de AP3	29
- Dimensionamiento del tanque	30
- Diseño y cálculo del intercambiador de vapor, tanque de almacenamiento AP3. ✓	30
2.3.1.2 Tanque de AP3 de 25000 galones	
- Cálculo consumo de vapor, cálculo de la bomba	37
2.3.1.3 Tanqueros, camiones cisterna con AP3.	41
2.3.1.4 Tanque de RC - 250 de 25000 galones	42
2.3.1.5 Consumo total de vapor	42
2.3.1.6 Cantidad de calor suministrado por la caldera ✓	44
2.4 Calderas	45
2.4.1 Calderas a vapor ✓	46

### Capítulo III

#### Selección del combustible, análisis de la combustión, cálculo y dimensionamiento del sistema de combustible.

3.1 Propiedades físico químicas de los combustibles	50
3.2 Selección del combustible	53
3.2.1 Reacciones de combustión	54
3.3 Dimensionamiento del sistema de combustible ✓	61

	pág.
3.3.1 Tanque de servicio diario •	63
3.4 Selección de la bomba de combustible •	64

#### Capítulo IV

#### Tratamiento, cálculo y dimensionamiento del agua de alimentación, de la tubería de distribución y de retorno de condensado • /

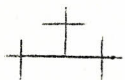
4.1 Tratamiento	68
4.1.1 Tipos	73
4.1.1.a Externo	74
4.1.1.b Interno	75
4.1.2 Purgas	76
4.1.2.a Tipos	77
4.2 Cálculo y dimensionamiento del sistema del agua de alimentación	79
4.2.1 Dimensionamiento tanque de alimentación •	79
4.2.2 Cálculo y selección de la bomba. •	81 ✓
4.2.3 Cálculo y dimensionamiento de las tuberías de agua de alimentación •	88
4.2.4 Esquema	89
4.3 Cálculo y dimensionamiento de las tuberías de vapor y retorno de condensado.	90
4.3.1 Cálculo tubería de vapor y condensado y determinación de la caída de presión. •	91
4.3.2 Selección del aislamiento y determinación de espesores •	107

	pág.
4.4 Trampas de vapor	109
4.4.1 Condiciones de diseño de las trampas de vapor	110
4.4.2 Tipos de trampas de vapor	111
4.4.3 Cálculo de la carga de condensado de las trampas	112
4.4.4 Selección de trampas de vapor	113
4.4.5 Cálculo y selección de juntas de expansión	113
4.6 Esquema juntas de expansión	118
4.7 Control del tratamiento del agua	122
 <b>Capítulo V</b>	
5.1 Granulometría del material pétreo empleado en mezclas asfálticas.	120
5.2 Mezclas asfálticas	129
5.2.1 Preparación de mezclas asfálticas	129
5.2.2 Pesos específicos de las mezclas asfálticas	130
5.2.3 Porcentaje de vacíos de una mezcla asfáltica compactada	132
5.2.4 Estabilidad de las mezclas asfálticas	133
5.3 Resumen	133
<b>Análisis de resultados</b>	136
<b>Conclusiones y recomendaciones.</b>	139
<b>Anexos</b>	140
<b>Bibliografía</b>	

## SIMBOLOGIA



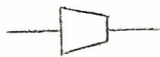
Nudo universal



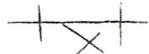
Te



Codo de 90 grados



Reductor de tamaño



Filtro



Válvula de compuerta



Válvula de retención



Línea de vapor



Línea de condensado

## INDICE DE FIGURAS

	pág.
1.a Ensayo de penetración .....	9
1.b Detalle de la aguja .....	9
2 Prueba de viscosidad .....	10
3 Viscosímetro Saybolt, con orificios universal y Furol .....	11
2.1 Planta de asfalto .....	19
2.2 Distribución general de la planta .....	22
2.3 Tanque de almacenamiento .....	29
4.1 Dimensiones del tanque de alimentación de agua.....	79
4.2 Bomba modelo 2006 .....	83
4.2.4 Esquema del sistema de agua de alimentación .....	87
4.2.5 Esquema del circuito de tuberías de agua de alimentación y retorno de condensado .....	90
4.2.6 Diagrama para dimensionar tuberías de vapor saturado a 7 kg/cm <sup>2</sup> man (presión vs capacidad ) .....	95
4.2.7 Caídas de presión para vapor saturado a 7 kg/cm <sup>2</sup> man .....	96
4.2.8 Diagrama para dimensionar tuberías de retorno de condensado	103
4.2.9 Diagrama caudal vs caída de presión .....	104
4.2.9 Expansión térmica .....	114
5.1 Proporción de agregados para mezclas asfálticas .....	128

## ÍNDICE DE TABLAS

	pág.
2.1 Requerimientos de electricidad para la planta de asfalto .....	26
3.1 Temperatura de eficiencia de los gases de escape de combustión .....	59
3.2 Capacidad mínima de almacenamiento .....	61
3.3 Consumo de combustible dada por las Cleaver Brooks .....	64
3.4 Dimensionamiento de las calderas dada por la Cleaver Brooks...	65
4.1 Principales iones contenidos en el agua .....	70
4.2 Impurezas del agua de alimentación .....	71
4.3 Tratamientos interno .....	73
4.4 Capacidad del tanque de almacenamiento .....	78
4.5 Pérdidas por fricción en tuberías de acero Schedule 40 para agua	84
4.6 Caidas de presión de vapor en el sistema .....	93
4.7 Caidas de presión en la tubería de condensado en el sistema .....	102
4.8 Espesor del aislante (lana de vidrio) .....	106
4.9 Coeficiente de pérdida superficial de calor para cilindros descubiertos .....	107
4.10 Selección de trampas de vapor .....	111
4.11 Dimensionamiento de las juntas respecto al tamaño de tuberías y presiones .....	116

## INTRODUCCIÓN

El propósito al realizar la presente tesis es el diseño del sistema de vapor para una instalación de hormigón asfáltico, al constituir parte esencial de la carpeta asfáltica. Este elemento representa un factor importante en el medio social, al facilitar el transporte de todo tipo de transportación.

La planta de hormigón esta diseñada con todos los adelantos de nuestra era, logrando de esta forma mezclas más uniformes y de mejor calidad. Una de las ventajas que tiene es la de entrar en producción en pocos minutos con un alto grado de eficiencia y bajo costo de producción.

Se emplearán los mecanismos y normas establecidas para un mejor desarrollo; dado que el gobierno exige ciertos parámetros a cumplirse. Para lograr este objetivo debe haber una adecuada coordinación entre los trabajadores de las diferentes secciones manteniendo los diferentes compuestos, sean estos áridos o asfaltos (AP3, RC-250), en las condiciones exigidas. Este es el fin para la elaboración de la presente tesis.

Establecer las diferentes necesidades térmicas del sistema y cálculos para la dimensión, selección de los diferentes equipos a emplearse en la instalación del sistema a vapor de la planta.

Se dan las base para la instalación de la planta y las necesidades requeridas con la correspondiente distribución general de planta.

La ejecución del presente proyecto se podrá realizar cuando los estudios de factibilidad sean favorables, cuando se disponga de los medios económicos necesarios para llevarlo a cabo, requiriéndose un tiempo de instalación de dos meses para entrar en funcionamiento a plena carga.

La selección del sitio de construcción de la planta debe ser tal que le asegure una producción mínima de 20 años, además su ubicación se realizará en una cantera (sector con material rocoso) por las facilidades de disposición de los áridos y alejado de asentamientos humanos por el desprendimiento de polvos producto de la extracción de los áridos.

La construcción y funcionamiento de la planta constituye una ventaja social en la medida que genera más fuentes de trabajo.

## CAPITULO 1

### CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL ASFALTO

Conocido desde la más remota antigüedad, obtenido en su mayor parte por la destilación del petróleo, los asfaltos se definen como mezclas de hidrocarburos de origen natural o pirogénico, que se presentan como líquidos, semisólidos o sólidos. Posee un poder aglomerante alto, puede adherirse por lo general a todos los materiales usados: metal, madera, hormigón, piedra, vidrio, etc. Es un excelente aislante térmico, dieléctrico y fónico.

Ligero, dúctil y flexible, desde el punto de vista mecánico se comporta como un plástico similar al masticue, siguiendo las condiciones de servicio. Es insoluble en el agua, se puede obtener en soluciones de numerosos solventes orgánicos. Los asfaltos en su mayoría son negros, sólidos a temperatura ambiente, son solubles en sulfuro de carbono.

Sus propiedades y la complejidad de su composición, conllevan a realizar ensayos empíricos destinados a revelar las diferentes propiedades obtenidas. Los estudios de las propiedades visco-elásticas han permitido comprender la significación de los ensayos empíricos.

Los asfaltos son mezclas de peso molecular elevado pudiendo pertenecer a uno de los tres grupos a saber: alifáticos, nafténicos y aromáticos. Estos compuestos además

contienen elementos como: oxígeno, azufre y algunos metales pesados como vanadio, níquel, etc.

La utilización como solvente, de un hidrocarburo selectivo (éter de petróleo), permite el fraccionamiento del asfalto en dos partes. La parte disuelta, los maltenos, que dan un aspecto de líquido viscoso de color oscuro, y la parte o fracción precipitada son los asfaltenos está constituida por los cuerpos de peso molecular alto, que se presentan en forma sólida y negra. Es común que los asfaltenos se presenten o comporten como un fluido perfectamente viscoso (fluido Newtoniano).

Estas propiedades de asfaltos oxidados, les hace utilizables con cargas o sin ella, facilitándose su uso y aplicación en la industria. Cualquiera que sea la técnica de utilización del asfalto para la construcción o reparación de carreteras, su función es la de servir de ligante a los agregados que constituyen la carpeta asfáltica.

Para que se cumpla su función es necesario que se adhiera bien a los áridos y consecuentemente esté líquido en el momento de su aplicación. Después, deberá volver a hacerse un sólido o semisólido, en cualquier situación, para mantener en su sitio los áridos presentes en la carpeta asfáltica.

Existen tres medios en uso para licuar los asfaltos antes de su aplicación:

- 1.- El calentamiento.- Es proceso que se emplea con los asfaltos puros.
- 2.- La disolución con un disolvente que generalmente, es un kerosene.

3.- La emulsión con agua, adicionada con agentes emulsionantes. Las emulsiones se emplean a la temperatura ambiente.

Puesto que el asfalto de petróleo se obtiene como resultado al destilar petróleo crudo, su composición depende del tipo de petróleo y del grado al que se ha llevado la destilación, la destilación separa sustancias de distinto punto de ebullición, la separación se realiza por evaporación y subsiguiente condensación. Cuanto más intensa es la destilación tanto más baja es la penetración, grado de dureza que presenta un material. Los asfaltos se designan por intervalos de penetración, sobre todo para trabajos en carretera en donde más se utiliza los asfaltos de penetración:

Asfalto 60/70

Asfalto 85/100

#### Asfaltos naturales.

Los asfaltos naturales son materiales que se extraen del suelo y no crean ningún problema de fabricación, salvo cuando se incorporan a productos especiales como pinturas, tintes de imprenta, caucho, etc. A estos asfaltos los podemos clasificar de la siguiente forma:

Asfaltos nativos, sólidos o semisólidos.

1.- Puros o casi puros (Asfaltos del lago Bermúdez)

2.- Asociados con material mineral

- Asfalto del Lago Trinidad

- Asfalto de Irak, Boston
- Asfalto de roca europeos y americanos.

Los diferentes asfaltos usados en pavimentación, así como algunas de sus características, se hallan indicados en el cuadro 1 del anexo.

### **Especificaciones**

Las especificaciones actualmente vigentes para cada uno de los materiales bituminosos empleados en pavimentación, se hallan resumidas en los cuadros 2, 3, 4 y 5 del anexo.

## **1.1 PROPIEDADES DE LOS ASFALTOS**

Como el asfalto es un material de composición compleja, no se pueden distinguir en él, propiedades bien definidas, sino que es necesario referirnos a un grupo de propiedades físicas, eléctricas y reológicas.

Dentro del conjunto de *propiedades físicas* se consideran las siguientes:

### **1.1.1 Densidad**

La composición química influye en la densidad del asfalto, pero resulta difícil cuantificar las relaciones existentes entre estos parámetros. Así se ha comprobado que a cantidades mayores de compuestos aromáticos, corresponden

una mayor densidad, que un aumento de compuestos saturados produce una disminución de la misma.

El progreso en la obtención de datos sobre componentes específicos ha hecho posible definir la dependencia entre composición y densidad. Un ejemplo es la relación existente entre el contenido de azufre y su densidad, es de carácter aproximadamente proporcional.

La densidad es la relación entre el peso de un determinado volumen de muestra a una temperatura  $t$  y peso del mismo volumen de agua, a una temperatura determinada. La elección del estado de referencia a  $4^{\circ}\text{C}$  permite la identificación de las cifras que miden la densidad y la masa específica.

La gravedad específica se define para dos temperaturas fijas e idénticas de valor a  $60^{\circ}\text{F}$  y tiene por símbolo sp.gr. 60/60. Se utiliza así mismo, para medir la densidad los  $^{\circ}\text{API}$  (American Petroleum Institute), como una función hiperbólica de la gravedad específica; se define como la razón entre el peso de un volumen equivalente de agua destilada a  $60^{\circ}\text{F}$ .

$$^{\circ}\text{API} = 141.5 / (\text{sp.gr. } 60/60^{\circ}\text{F}) - 131.5$$

Un método para definir el carácter químico del petróleo y correlacionar las propiedades de las mezclas, fue introducido por Watson, Nelson y Murphy. Ellos observaron que, cuando un aceite crudo de características de destilación uniforme se destila en cortes muy próximos, la razón de la raíz cúbica del

promedio de los puntos de ebullición absolutos a las gravedades específicas es una constante K.

$$K = T_B^{1/3} / s$$

donde: K = Factor de caracterización

$T_B$  = Punto de ebullición promedio, °R

s = Gravedad específica a 60°/60°

### 1.1.2 Calor específico

Es un factor importante que se debe considerar especialmente cuando se procesan, almacenan y transportan asfaltos y emulsiones asfálticas.

Los estudios de Seal, Henkelom y Bloker relacionados con este tópico se pueden sintetizar en las siguientes conclusiones:

- La variación del calor específico por °C alcanza este rango:  $3.2 \times 10^{-4}$  a  $7.8 \times 10^{-4}$
- Los calores específicos de los asfaltos aumentan linealmente con la temperatura, siempre y cuando no haya presencia de parafina, ya que este compuesto altera esta relación, produciéndose un incremento en el calor específico.

### 1.1.3 Adherencia

Esta propiedad se relaciona con la tensión interfasial existente entre un líquido y una superficie sólida. El trabajo de adherencia corresponde al trabajo necesario para separar los materiales en la interfase. Para determinar el valor de las fuerzas de adherencia se acostumbra a medir el ángulo de contacto entre la interfase.

En la práctica se ha comprobado que la naturaleza y características de la superficie sólida son las que determinan el valor de la adherencia. El asfalto es un mineral que se extiende con facilidad sobre una gran cantidad de superficies sólidas secas, formando un pequeño ángulo de contacto, ángulo que se forma entre la superficie y el material de adherencia, se ha encontrado que estos ángulos varían entre 0 y 47°. Los factores que afectan la adherencia son:

- La presencia de parafina ya que origina una disminución de la viscosidad y una disminución de las fuerzas de contacto.
- La humedad de los sólidos, que motiva el aumento del ángulo de contacto.
- La presencia de agua en la interfase sólido-líquido. Las fuerzas de adherencia disminuyen notablemente.

### 1.1.4 Cohesión

La resistencia interna de los asfaltos varía en forma considerable bajo la influencia de la temperatura y el esfuerzo a que son sometidos y se considera

como una manifestación de las fuerzas que mantienen unidas las moléculas del asfalto. Son pruebas válidas para medir la cohesión de este compuesto, aquellas de tipo general utilizadas para determinar la resistencia a la tensión, flexión, ruptura y agrietamiento.

Resumiendo, se debe indicar que las temperaturas bajas perjudican la cohesión del asfalto y que la adición de sustancias como el hule natural o sintético y de neopreno, la mejoran.

#### ***Propiedades eléctricas.***

Los asfalto, son excelentes aislantes. Los estudios realizados sobre esta propiedad del asfalto han permitido establecer que su composición influye de alguna manera en sus cualidades eléctricas. El contenido de sales inorgánicas originan cambios en la conductividad eléctrica.

#### ***Propiedades reológicas.***

La reología es una ciencia que analiza el flujo o deformación de materias, cuya viscosidad depende de la presión, temperatura, etc. Es considerada en su conjunto como la caracterización más importante de los asfaltos.

Los asfaltos varían en sus características reológicas, desde líquidos esencialmente Newtonianos hasta materiales fuertemente no Newtonianos. El carácter más importante del asfalto es el deslizamiento, sea este puramente viscoso o plástico. Los asfaltos plásticos tienen una proporción más elevada de asfaltenos y estos no se

dispersan tan bien como en los asfaltos viscosos. Para medir el deslizamiento de los asfaltos, se emplean pruebas empíricas de penetración y del punto de reblandecimiento. El punto de reblandecimiento y el de penetración varían con el contenido de asfaltenos y según la procedencia.

### 1.1.5 Penetración y reblandecimiento.

El ensayo de penetración es el objetivo de la norma ASTM D-5, se aplica a los productos sólidos o semisólidos a temperatura ambiente.

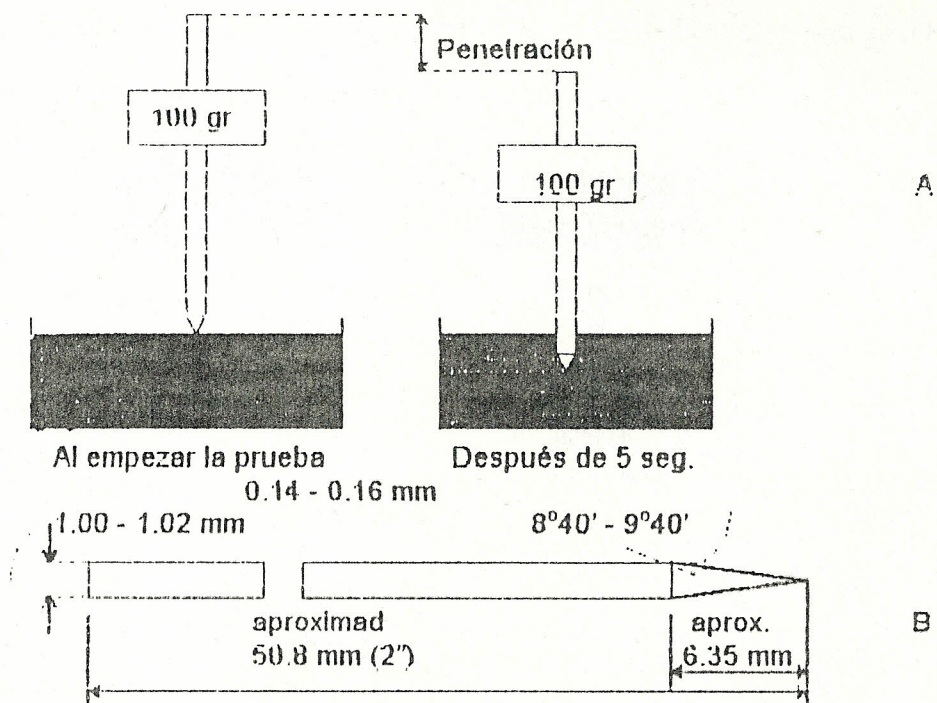


fig. 1a Ensayo de penetración

fig. 1b Detalle de la aguja

Se mide la penetración de una aguja cargada con un peso de 100 gramos. Esta carga es aplicada durante 5 segundos (véase figuras 1a y 1b). Cuando se ejecuta la prueba, el asfalto debe tener una temperatura de 25°C. El ensayo efectuado bajo estas condiciones tiene el nombre de penetración normal. La unidad de penetración es de 0.1 milímetros. Cuanto más blando sea el asfalto mayor será su penetración (véase cuadro 1.2).

### 1.1.6 Prueba de viscosidad

La prueba de viscosidad, sirve para conocer la resistencia al escurrimiento (fluidez) de asfaltos líquidos y otros productos derivados del petróleo (ver cuadros 3, 4, 5). La viscosidad se mide por medio de un viscosímetro de tipo estándar, se conoce con el nombre de viscosímetro Saybolt.

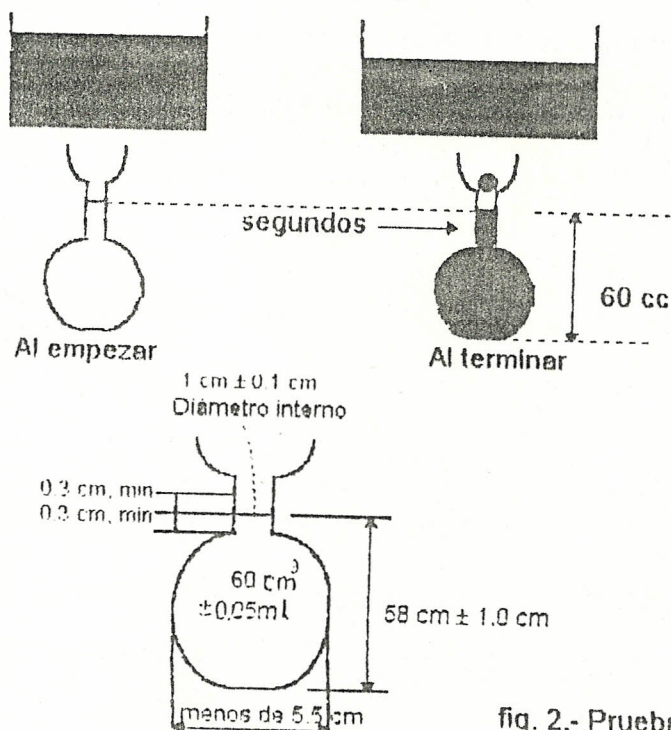


fig. 2.- Prueba de viscosidad

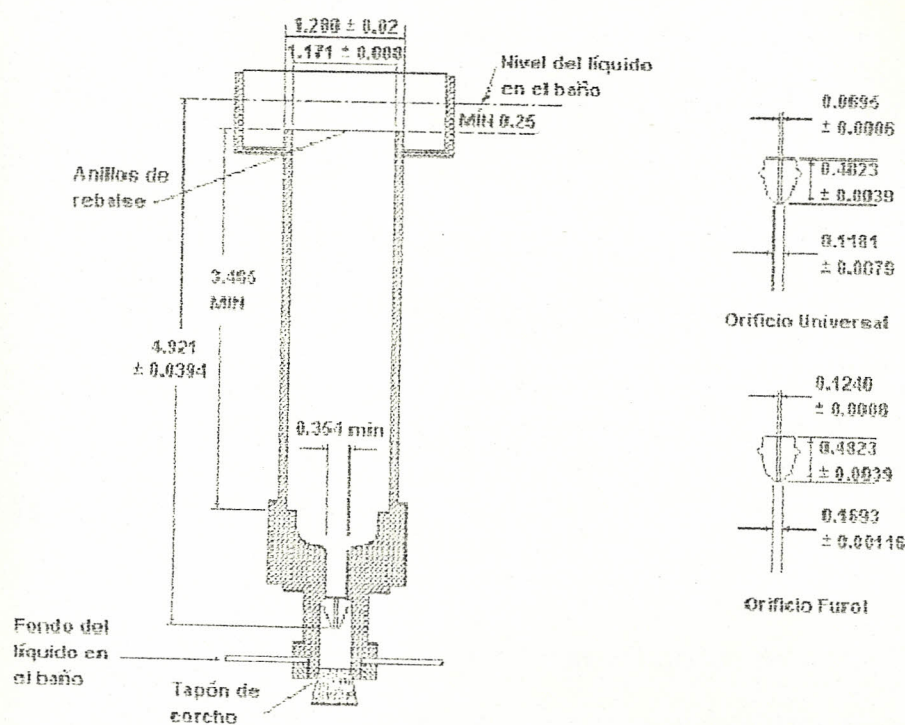


fig. 3 Viscosímetro Saybolt, con orificios Universal y Furol

El ensayo se ejecuta a una determinada temperatura, registrando el tiempo, en segundos, que necesita un volumen de  $60 \text{ cm}^3$  de líquidos asfálticos (figura 2) para fluir a través de una abertura calibrada (figura 3).

### 1.1.7 Prueba de flotación

La prueba de flotación es una modificación de la prueba de viscosidad. Se emplea este método para cantidades pequeñas y materiales asfálticos muy viscosos. Este ensayo mide el tiempo, en segundos, que necesita el material para fluir a  $50^\circ\text{C}$  ( $122^\circ\text{F}$ ), o a otra temperatura especificada.

Al especificar la prueba, el material asfáltico se coloca dentro de un molde abierto, en forma de "tapón", en la parte inferior de un platillo de aluminio, especialmente diseñado. Una vez colocado el material dentro del molde y el platillo, éste se introduce en un depósito pequeño, con agua a 50°C (122°F). El ensayo se prolonga hasta observar que el material fluya, permitiendo la entrada del agua al platillo.

### **1.1.8 Prueba de ductibilidad**

Mide la longitud en centímetros, que puede alargarse una briqueta estándar de material asfáltico. La sección mínima en la parte central de la briqueta debe ser 1 cm<sup>2</sup>. La prueba de ductibilidad normal se efectúa con asfaltos a 25°C (77°F). El molde con la briqueta se colocará en una máquina de prueba y durante el ensayo, la briqueta de asfalto se halará con una velocidad de 5 cm por minuto hasta que se rompa.

### **1.1.9 Prueba de punto de llama.**

El punto de llama de un producto asfáltico es la temperatura a la cual sus vapores se encienden momentáneamente, cuando se pone una llama en contacto con ellos. Se emplean varios métodos para determinar el punto de llama de un producto bituminoso.

Uno de los métodos más conocidos es utilizando el "vaso abierto de Cleveland". Se usa para asfaltos líquidos que se encienden a temperaturas relativamente

altas, generalmente mayores de 79°C (175°F). Si los productos asfálticos empleando este método dieran puntos por debajo de 79°C, se recomienda usar el "vaso abierto de Tag". Para petróleo y aceites usados en carreteras, se emplea los aparatos conocidos como "probadores cerrados Pensky-Martens".

El punto de llama, o de inflamación de un asfalto, indica la temperatura crítica a la cual hay peligro de incendio cuando se calienta un material.

#### 1.1.10 Prueba de destilación de asfaltos líquidos.

Se utiliza esta prueba para determinar la cantidad de residuo asfáltico que se obtendrá de volatilizar los cuerpos ligeros (gasolina, kerosene, etc.), de los asfaltos líquidos utilizados en pavimentación. Este ensayo permite, además, indicar la relativa rapidez de volatilización de los fluxantes en un asfalto líquido.

El ensayo se ejecuta colocando 200 ml. de material asfáltico en un matraz de destilación, cuya capacidad sea de 500 ml., el cual se conecta a un condensador y se calienta gradualmente hasta una temperatura de 360°C (680°F). Los productos volátiles son condensados y recogidos, poco a poco, en un cilindro de cristal graduado a fin de que el porcentaje del volumen destilado a cualquier temperatura intermedia, así como al final de la prueba, sea registrado fácilmente.

Después de terminada la destilación se saca el residuo que queda en el matraz y se determina su grado de consistencia (véase pruebas de penetración y

flotación) y su grado de solubilidad en bisulfuro o tetracloruro de carbono. Si el residuo es semisólido, puede efectuarse el ensayo de ductibilidad, además del de penetración.

1.1.10.a Por medio de bisulfuro de carbono ( $CS_2$ ). El betún, en un producto asfáltico, es aquella fracción que se disuelve completamente en bisulfuro de carbono. En los cementos asfálticos residual viscosos, la solubilidad en  $CS_2$  representa los constituyentes activos de cementación. Los productos asfálticos debidamente refinados, sin mezcla con otros materiales, tiene una solubilidad en  $CS_2$ , del 99.5% como mínimo.

La prueba de solubilidad en  $CS_2$  se efectúa tratando una muestra de peso conocido del material, con un solvente. Luego, la solución se filtra para conocer cualquier cuerpo insoluble que pudiera encontrarse. Finalmente, el material insoluble se seca y se pesa. Se calcula el porcentaje insoluble y este valor, sustraído del 100%, da el porcentaje soluble en bisulfuro de carbono.

1.1.10.b Por medio del tetracloruro de carbono ( $CCl_4$ ). La prueba para determinar la solubilidad de los betunes, empleando el  $CCl_4$ , se ejecuta en igual forma que por medio del  $CS_2$ . La mayor parte de los materiales asfálticos son solubles en los dos solventes antes mencionados, pero se prefiere el uso del tetracloruro de carbono por no ser inflamable. Sin embargo, si menos del 99.5% del producto es soluble, se utilizará el bisulfuro de carbono para determinar el porcentaje exacto de betún.

### 1.1.11 Medida de la cantidad de agua y sedimentos.

Esta prueba se efectúa, únicamente, con materiales asfálticos de curado lento. Un determinado volumen del material, con igual volumen de benzol es colocado en un tubo especial. El benzol actúa como solvente y produce así una solución de bajo peso específico y viscosidad. Se lleva la temperatura de la mezcla a 48.9°C (120°F) y se bate durante 10 minutos en una centrifugadora a 1400 ó 1500 revoluciones por minuto. Cualquier cantidad de agua o sedimentos que se pudiera encontrar se depositan al fondo del tubo, el cual está construido de tal manera que permite lecturas de pequeños volúmenes. El volumen de agua y sedimentos se calcula en porcentajes del volumen original del material. Los asfaltos líquidos de curado lento no deben contener más del 2% de agua y sedimentos.

### 1.1.12 Determinación del peso específico de los asfaltos.

#### *Peso específico de cementos asfálticos fluidos*

Se expresa como la relación entre el peso de un determinado volumen de material y el peso de igual volumen de agua, a la misma temperatura. La temperatura que se considera, es de 25°C (77°F).

$$\gamma_{ca} 25^\circ / 25^\circ\text{C} = \frac{c - a}{(b - a) - (d - c)}$$

donde:

a = Peso del picnómetro calibrado limpio, seco, con su tapa.

b = Peso del picnómetro y tapa, con agua a 25°C (el agua debe estar destilada y hervida).

c = Peso del picnómetro y tapa, limpio, seco, con cemento asfáltico en estado fluido. Al verter el asfalto fluido, debe tenerse cuidado de que no se pegue el asfalto en las paredes del picnómetro y evitar que se formen burbujas de aire.

d = Peso del picnómetro y tapa, con cemento asfáltico fluido y agua (el agua debe ser destilada y hervida). Los componentes deben estar a 25 °C.

#### *Peso específico de cementos asfálticos sólidos*

Si el cemento asfáltico es lo suficientemente sólido para ser fragmentado, su peso específico deberá determinarse por medio de una balanza.

La muestra cuyo peso se quiere determinar se preparará en un molde cúbico de ½ pulgada de lado. Tanto el molde como su base deben ser de bronce con amalgama de mercurio. El material deberá ser previamente calentado para permitir preparar briquetas cúbicas de ½ pulgada de lado.

El peso específico de cada biqueta de cemento asfáltico se calculará de la siguiente manera:"

$$\gamma_{ca} = \frac{a}{a - b}$$

donde:

a = Peso, al aire, de la briqueta de cemento asfáltico (suspendida de la balanza por un hilo fino y resistente)

b = Peso de la briqueta sumergida en agua.

Los pesos específicos deben registrarse con aproximación de 0.1 mg.

#### 1.1.13 Endurecimiento por edad.

El asfalto es un material que tiende a endurecerse con el transcurrir del tiempo. Este endurecimiento es motivado por la pérdida de materiales volátiles, o por su oxidación; es de una importancia considerable puesto que está relacionado directamente con la vida útil del asfalto. Cuando el material en servicio endurece rápidamente, su adherencia y otras propiedades disminuyen.

#### 1.1.14 Vacíos "permeables" e "impermeables"

Una partícula mineral llámese piedra, grava o arena, tiene vacíos superficiales e internos, es decir presenta cierta porosidad.

Si a una partícula, agregado, o mezcla asfáltica, se la sumerge en agua durante 15 horas, que es tiempo sugerido por la AASHO en los Métodos Standars indicados en los apéndices A y B, los poros o vacíos exteriores superficiales y algunos interiores absorberán agua. A éstos se les denomina "Vacíos permeables". En cambio, un cierto número de poros o vacíos interiores, no absorberán agua. A estos, se les llama "Vacíos impermeables".

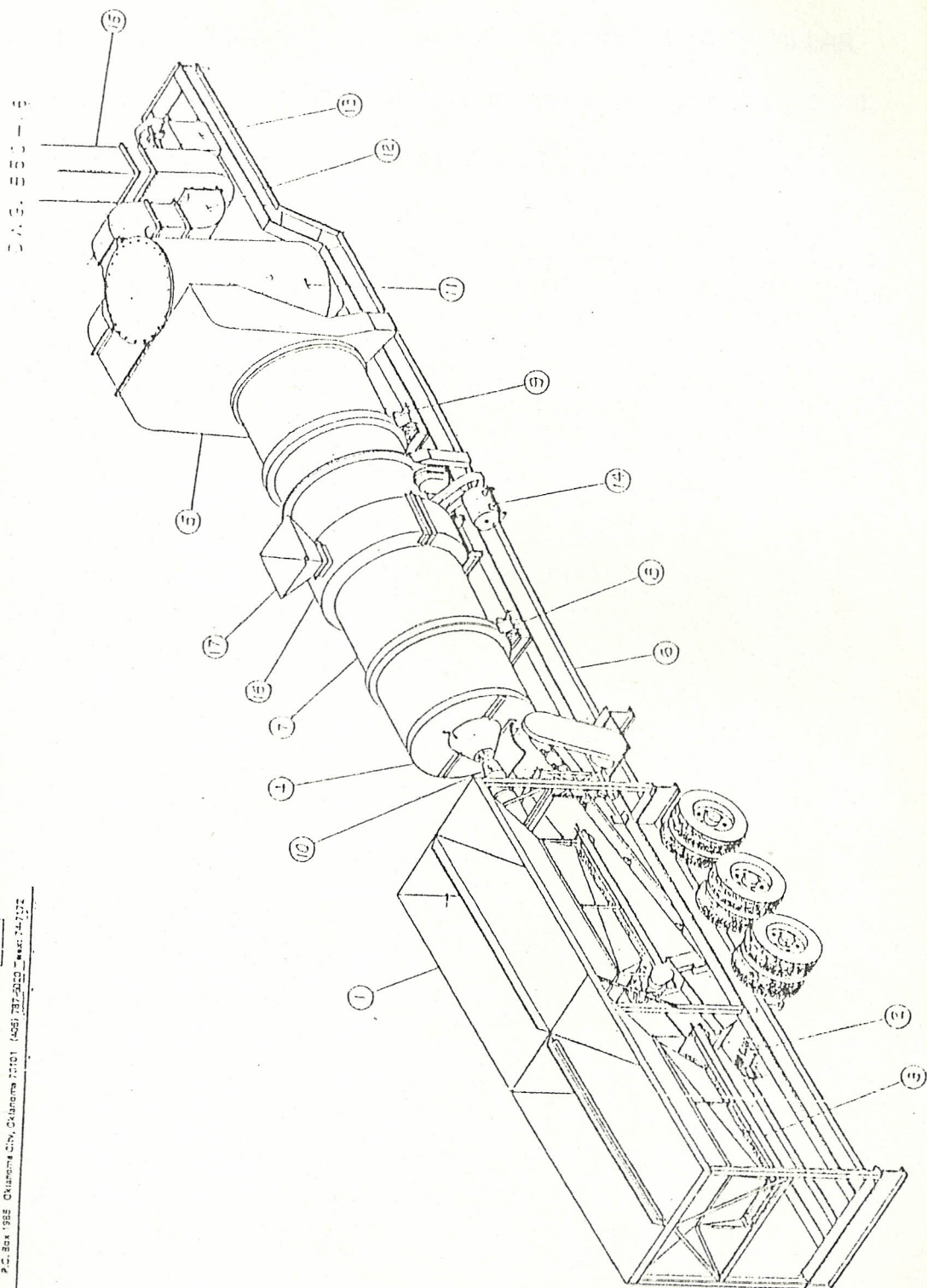
## CAPITULO II

### SERVICIOS DE PLANTA.

#### 2.1 Operaciones de la planta

Para el normal funcionamiento de la planta de asfalto se describirán las diferentes operaciones a las cuales se somete al asfalto. El hormigón asfáltico está constituido esencialmente de agregados o áridos y un aglutinante AP3 o asfalto de penetración 85/100. El proceso de elaboración comienza con la extracción de los agregados en las canteras luego de lo cual entran a la planta de asfalto en las cantidades dadas por el diseño del concreto asfáltico.

La planta elegida es una "CATERPILLAR modelo UDM600 manufacturado para CATERPILLAR por GMI CORPORATION" como se muestra en la figura 2.1, en donde se indican las diferentes partes constituyentes de la planta. El proceso es el siguiente: entran los agregados a la tolva alimentadora (1), las diferentes cantidades de cada uno son controladas por un tubo alimentador (3), descargando en una banda transportadora (2), para ingresar al tanque rotatorio (4), el cual en el primer tramo los áridos son secados y llevados a una temperatura de 150°C (302°F) para luego ser mezclado con el asfalto líquido que llega a una temperatura de entre 140 a 150°C (284 a 302°F). Los polvos de los agregados son eliminados por medio de un separador ciclónico (11). La mezcla homogeneizada es descargada a una cinta transportadora.





  
**CMI CORPORATION**
  
 P.O. Box 1888 Charlotte, N.C. 28216 (704) 787-5000 Telex 74737Z

fig 2.1 Planta de hormigón asfáltico

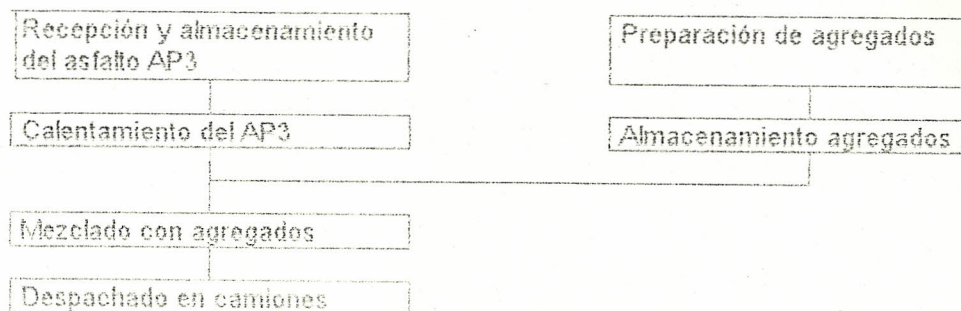
### 2.1.1.1 Partes constituyentes de la planta de asfalto (fig 2.1) CATERPILLAR

PAVING PRODUCTS. Manufactured for Caterpillar Tractor Co. by CMI.,  
Oklahoma City. OK U.S.A.) "UDM - 600, RECYCLE".

Referencia	Descripción	Cantidad
1	Tolva alimentadora	2
2	Tubo alimentadora (único)	1
3	Banda alimentadora de 30"	2
4	Recamara, tambor bastidor	1
5	Recamara, descarga	1
6	Armadura, principal	1
7	Tambor, armazón reciclador ensamblado	1
8	Cojinetes deslizantes	2
9	Cojinetes deslizantes	2
10	Quemador ensamblado	1
11	Separador ciclónico	1
12	Ducto de aire	1
13	Ventilador, unidad de fuerza	1
14	Unidad de fuerza para el tambor	1
15	Chimenea	1
16	Recamara recicladora	1
17	Tolva recicladora	1
*	Ducto, agua pulverizada	1
*	Tubería de inyección de asfalto	1
*	Bomba de asfalto	1
*	Filtro de asfalto	1
*	Bomba de agua de 25 hp	1

\* No mostrada

Flujograma del proceso en la planta de asfalto.



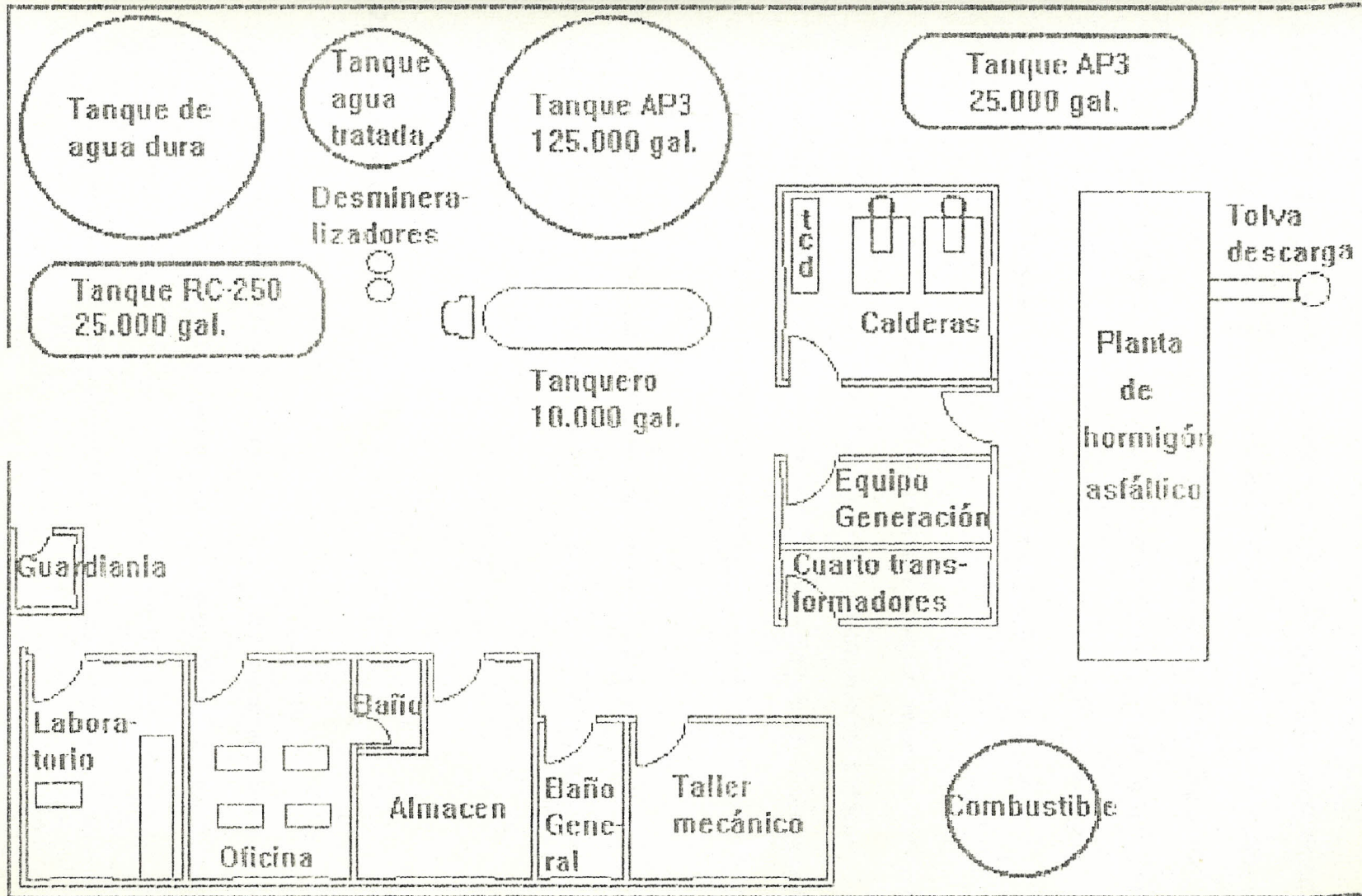
## 2.2 REQUERIMIENTOS.

Los requerimientos de servicios para la planta descrita anteriormente para el normal funcionamiento son:

- a) Suministro de agua
- b) Suministro de vapor.
- c) Suministro de electricidad y
- d) Suministro de aire comprimido

La ubicación de dichos servicios se indica en el plano de distribución general de la planta (ver figura 2.2), ubicados en la sala de maquinas y exteriores.

Fig. 2.2 DISTRIBUCIÓN GENERAL DE LA PLANTA



### 2.2.1 Suministro de agua

El agua es utilizada en el proceso de producción para disminuir el impacto ambiental generado por la producción de polvo derivado de los agregados al entrar y moverse dentro del tambor rotativo, polvos que son captados por el ciclón mezclándose el polvo con el agua saliendo en forma de un lodo para descargar en piscinas destinadas para la retención del mismo y una vez sedimentados los mismos son nuevamente bombeados a la planta.

El agua también se emplea para la generación de vapor, debiendo ser tratada. Para disminuir costos de producción, el vapor generado se condensa por medio de condensadores evaporativos (evaporación parcial). Esta agua se utilizara indefinidamente; reponiéndose el agua debido a fugas en los sistemas.

Otros requerimientos de agua son para atender las necesidades del personal de planta, entre los que tenemos: lavabos, retretes y duchas. (utilizan 80 litros de agua al día por empleado).

### 2.2.2 Suministro de vapor

La planta de asfalto necesita energía térmica, vapor, para los requerimientos de operación. En el literal 2.2.2.1 se muestra esquemáticamente la distribución de vapor y la recuperación de condensado. Se debe instalar dos calderas de igual capacidad y características, esto es para simplificar su mantenimiento.

La potencia de una de ellas deberá ser suficiente para satisfacer la totalidad de las necesidades de vapor cuando la producción de la planta sea baja, generalmente en períodos de invierno en la costa. Esta medida se toma con el objetivo de poder realizar la inspección y reparación anual de las mismas.

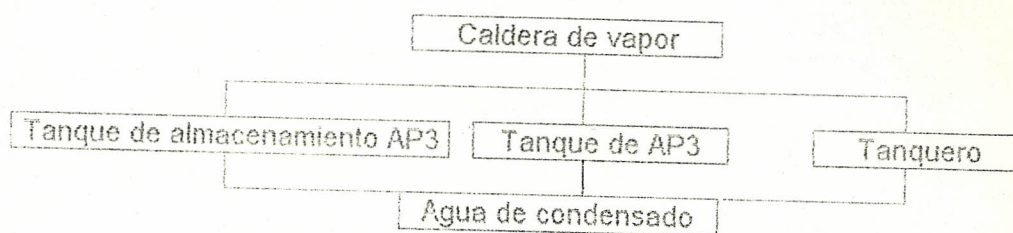
La presión generada se adaptará a las diferentes necesidades de la planta, siendo necesario la instalación de válvulas reductoras de presión en los sitios adecuados. El agua que entre a la caldera debe ser tratada para eliminar cloruros, fosfatos, sulfatos, carbonatos, nitratos, hierro, silicio, sodio, magnesio y otros presentes en el agua; esto se realiza para reducir al mínimo posible la formación de incrustaciones en las superficies calefactoras de la caldera, controlándose de esta forma, también la corrosión en las superficies internas.

Debe evitarse la formación de espumas de arrastre con el vapor de los sólidos presentes en el agua de caldero.

El vapor que se condensa y retorna al sistema del caldero se llama "condensado". Las pérdidas de vapor en los procesos en purgas o venteos son reemplazadas. Esta agua reemplazada y añadida se llama agua de reposición.

El total del flujo de condensado y el agua de reposición es el agua de alimentación de la caldera.

### 2.2.2.1 Esquema de la distribución de vapor en la planta de asfalto



### 2.2.3 Electricidad

En la planta de asfalto se requiere una distribución de la energía eléctrica la acometida de corriente trifásica es suministrada por la empresa eléctrica y cuando haga falta por dos generadores de fuerza motriz, los cuales cubran las necesidades básicas para el funcionamiento de la planta que es del 60% de la energía total. Como el suministro de la energía es de alto voltaje entra a un cuarto de transformadores, el mismo que estará ubicado a continuación de la sala de maquinas.

El sistema de control de los diferentes equipos y la iluminación es situado en el edificio de servicios auxiliares y por medio de las diferentes conexiones se conectaran a los diferentes edificios que conforman la planta. Los controladores, interruptores, pulsadores, relays de mando, banco de capacitores y equipo de protección de los diferentes motores, se ubicarán en los sitios adecuados.

Las diferentes necesidades de la planta se indican en la siguiente tabla 2.1.

Tabla 2.1 requerimientos de electricidad para la planta de asfalto

# elementos	Elementos	Carga (kw)
Quemador de aceite		
1	Compresor	19
1	Bomba de aceite	2
Plataforma		
1	Motor-reductor	30
Sistema de inyección de asfalto		
1	Bomba	4
Control de emisiones		
1	Bomba	19
Maquina transportadora		
1	Motor	4
Alimentadora de mineral frío		
1	Motor	3
Compresor de aire		
1	Motor	8
Interruptor eléctrico de transmisión		
3	Motor	5
1	Motor (ventilador)	45
Iluminación de la planta		2
Recepción y almacenamiento del AP3 y RC-250		
2	Bomba AP3	12
2	Bomba RC-250	2.5
Calderas		
1	Bomba de alimentación agua	0.5
1	Bomba de alimentación de combustible	0.5
Iluminación exteriores, sala de maquinas, talleres		2
<b>TOTAL</b>		<b>158.5 kw</b>

#### 2.2.4 Aire comprimido

En las plantas asfaltadoras el aire comprimido es utilizado para el sistema de descarga del hormigón asfáltico y sistema de control de mandos.

Debe tomarse en cuenta que se debe evitar que haya humedad en el aire, para lo cual se colocarán filtros en los sitios adecuados. El compresor se lo situara en un lugar donde reciba buena ventilación.

### 2.2.5 Ventilación

En la planta, los requerimientos de ventilación no son necesarios por que la misma está diseñada para trabajar a la intemperie. Una buena ventilación es requerida en la sala de calderas, cuarto de servicios auxiliares y transformadores, taller de mantenimiento, laboratorio y edificio principal.

Para lograr este objetivo se utilizarán ventiladores centrifugos y axiales, dependiendo de las necesidades del sector.

### 2.3 Selección de la caldera

Para seleccionar la caldera más adecuada a nuestras necesidades se debe tomar en cuenta el tipo de carga térmica a la que va a estar sometido todo el sistema.

Para calcular la potencia o capacidad que se requiere en la planta, cuya producción es de 320 m<sup>3</sup> por día de asfalto, en un solo turno de 10 horas, debemos conocer la cantidad de vapor que se necesitará en la planta, esto es a plena carga.

### 2.3.1 Tipo de carga térmica

El almacenamiento del AP3 o asfalto de penetración 85 / 100 y del RC-250 cuyas propiedades han sido dadas en el capítulo uno, asfalto empleado en la fabricación del hormigón asfáltico y como ligante, se realiza en 3 tanques, uno de 125.000 galones el cual no tiene revestimiento (aislamiento) y otro de 25.000 galones, con recubrimiento de lana de vidrio. Para el RC-250 también se empleará otro tanque de 25.000 galones.

La temperatura a la que se debe mantener el tanque de AP3 con una capacidad de 25.000 galones es la temperatura de uso en la planta, esto es de 150 °C (302 °F); mientras que el tanque de 125.000 galones debe ser mantenido a 90 °C (194 °F). El calentamiento a ser sometido es indirecto, ya que no existe una mezcla directa entre el vapor y el AP3. Para el RC-250 será mantenido a 25 °C (77 °F) que es la temperatura máxima permitida.

Se dispondrá de dos bombas una de recirculación del AP3, una segunda que conecta al tanque de 125.000 galones con el tanque de uso diario de 25.000 galones y por medio de un by-pass en la succión, bombea el AP3 proveniente de los tanqueros, camiones cisternas, al tanque de 125.000 galones. La temperatura de fluctuación a la que llegan los tanqueros provenientes de la refinería de Esmeraldas es entre 40 y 60 °C.

### 2.3.1.1 Tanque de recepción y almacenamiento de AP3

El tanque de AP3 de almacenamiento principal es vertical, localizado a la intemperie, usado para mantener el AP3 a  $90^{\circ}\text{C}$  ( $194^{\circ}\text{F}$ ), aún cuando su temperatura baje a  $20^{\circ}\text{C}$  ( $68^{\circ}\text{F}$ ). El tanque no está aislado pero está protegido contra la corrosión atmosférica. El calor será suministrado por un haz de tubos en el fondo del tanque como se muestra en la figura (2.3), que consiste de una tubería de un diámetro de 1.25 pulgadas IPS y de 5 metros de longitud. El uso de un regulador de temperatura hará la operación automática

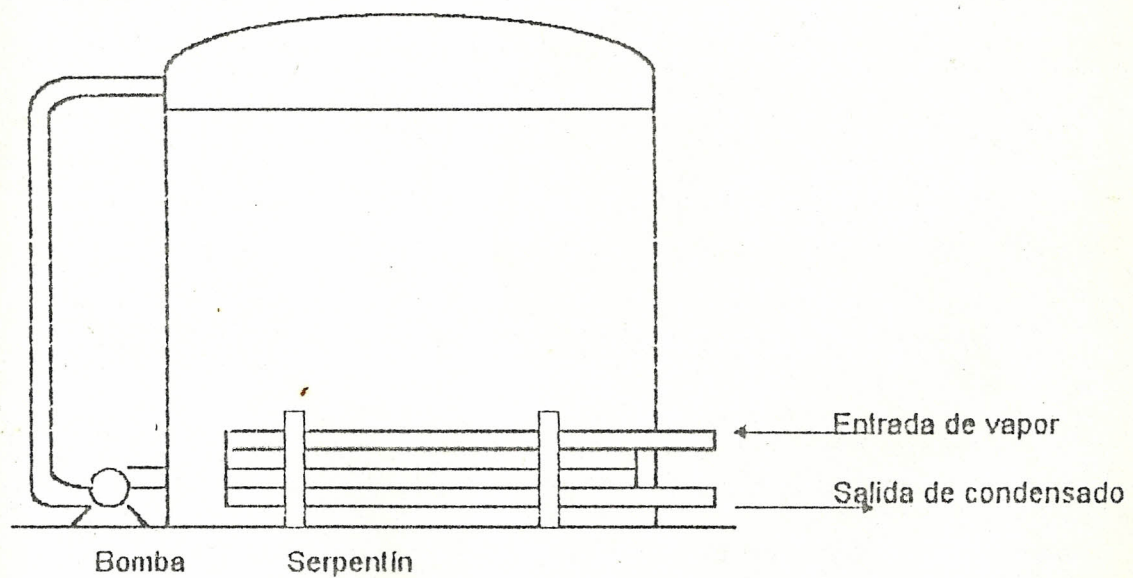


fig. 2.3 Tanque de almacenamiento

Dimensionamiento del tanque de almacenamiento.

Este tanque se lo dimensionará para un almacenamiento de 20 días con una capacidad del 90%. El tanque de almacenamiento irá cubierto de un techado en su parte superior.

$$V = 125.000 \text{ galones} \times \frac{3.785 \text{ litros}}{1 \text{ galón}} \times \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ litros}} = 473.125 \text{ m}^3$$

$$V = \pi D^2 h / 4$$

$$h = 0.5 D$$

$$V = \pi D^2 (0.5 D) / 4$$

$$V = 0.3927 D^3$$

$$D^3 = 473.125 \text{ m}^3 / 0.3927$$

$$D = 10.64 \text{ m}$$

$$h = 0.5 D = 5.32 \text{ m}$$

Las dimensiones del tanque serán de 11 m de diámetro por 5.5 m de alto.

Diseño y cálculo del serpentín de vapor tanque almacenamiento de AP3.

Para el análisis del serpentín debemos observar algunas características dadas por las normas internacionales del ASTM para tuberías que conducen vapor, para lo cual indicamos que son 50 tubos cada tubería con un tamaño nominal (IPS plg) 1.25 pulgada de diámetro, cédula N° 40, 16 BWG, con un arreglo de 1.5 en triángulo. (tabla 1 - 2 anexo).

La primera parte del problema radica en determinar cuánto calor se perderá del tanque a la atmósfera más el calor necesario para mantener caliente al asfalto. Esto da la carga de calor para la cual el serpentín debe diseñarse.

El coeficiente de convección natural para el aire alrededor de toda la superficie del tanque varía entre:  $hc = 0.2 \Delta t^{0.25}$  y  $hc = 0.3 \Delta t^{0.25}$ . Puesto que la ecuación que da el valor más alto de  $hc$  es la más segura, escogemos esta.

*Pérdidas por convección hc*

$$hc = 0.3 \Delta t^{0.25} \quad (1)$$

$$T_1 = 150^\circ\text{C} (302^\circ\text{F}) = \text{Temperatura del tanque de asfalto}$$

$$T_2 = 20^\circ\text{C} (68^\circ\text{F}) = \text{Temperatura ambiente}$$

$$\Delta t = (302 - 68)^\circ\text{F} = 234^\circ\text{F} \quad (2)$$

$$hc = 0.3 \times (234)^{0.25} = 1.173343628 \text{ Btu/h pie}^2\text{ }^\circ\text{F}$$

*Pérdidas por radiación hr*

$$hr = \frac{0.173 \times \epsilon [(T_{1\text{ abs}} / 100)^4 - (T_{2\text{ abs}} / 100)^4]}{T_{1\text{ abs}} - T_{2\text{ abs}}} \quad (3) \quad (\text{Ref. 1})$$

Suponiendo una emisividad de cerca de 0.8.

$$hr = 0.173 \times 0.8 \times (7.62^4 - 5.28^4) / 234$$

$$hr = 1.53438 \text{ Btu / h pie}^2\text{ }^\circ\text{F}$$

*Pérdidas combinadas*

$$hc + hr = 1.173343628 + 1.53438 = 2.707732 \text{ Btu / h pie}^2\text{ }^\circ\text{F}$$

$$\text{Área total tanque} = \pi \cdot 11 \cdot 5.5 = 190.066355 = 2046.0569 \text{ pie}^2$$

$$Q = \text{Pérdida total de calor} = (hc + hr) A \Delta t \quad (4)$$

$$Q = 2.707732 \times 2046.0569 \times 234 = 1296400.658 \text{ Btu / h}$$

(pérdidas originadas por convección y radiación)

El calor requerido para mantener el asfalto (AP3) caliente será:

$$\rho = 1020 \text{ kg / m}^3$$

$$m = V \rho$$

$$m = 473.125 \text{ m}^3 \times 1020 \text{ kg. / m}^3 = 482587.5 \text{ kg. ( 1061692.5 lb )}$$

$$c_p = \text{calor específico del AP3} = 0.54679 \text{ Btu/lb}^\circ\text{F (obtenido a } 300^\circ\text{F, } ^\circ\text{API} = 7.9)$$

$$Q = \omega c_p \Delta t$$

$$\omega = m / \text{número de horas} = 1061692.5 / 24 = 44237.1875 \text{ lb/h}$$

$$\Delta t = (302 - 222) ^\circ\text{F} = 80^\circ\text{F}$$

$$Q = 44237.1875 \text{ lb/h} \times 0.54679 \text{ Btu/lb}^\circ\text{F} \times 80^\circ\text{F}$$

$$Q = 1935076.14 \text{ Btu / h.}$$

La cantidad de calor requerido por el producto debe ser igual a las pérdidas por convección y radiación más el calor requerido al ser calentado el asfalto AP3. Por tanto:

$$Q = m h \implies m = Q / h$$

$$\text{Presión manométrica} = 100 \text{ lb/plg}^2 \implies \text{Calor latente} = 889.2 \text{ Btu / lb}$$

$$m = 3231476.798 \text{ Btu/h} / 889.2 \text{ Btu / lb}$$

$$m = 3634.139449 \text{ lb / h masa de vapor requerida para calentar el asfalto}$$

La segunda parte implica el diseño mismo del serpentín donde el área de flujo se calcula considerándose como si se tratará de una coraza de diámetro  $d_c$ .

$$d_c = 1.75 d n_t^{0.475} \quad (5)$$

donde:  $d$  = diámetro exterior de los tubos

$n_t$  = número de tubos

$$d_c = 1.75 \times 1.25 \times 50^{0.475} = 14.0268 \text{ plg}$$

$$\text{Área de flujo} \Rightarrow a_s = (\text{área de la coraza} - \text{área de los tubos}) \quad (6)$$

$$a_s = (\pi \times 14.0268^2 / 4 - 50 \times \pi \times 1.25^2 / 4) / 144$$

$$a_s = 0.647 \text{ pie}^2$$

$$\dot{m} = m / \text{número de horas de trabajo} = 1061692.5 / 10 = 106169.25 \text{ lb/h}$$

$$\text{Velocidad de masa} \Rightarrow G_s = \dot{m} / a_s \quad (7)$$

$$G_s = 106169.25 / 0.647 = 164093.372 \text{ lb/h pie}^2$$

$$D_e = 4a_s / (\text{perímetro húmedo}) \quad (8)$$

$$D_e = 4 \times 0.647 / (50 \pi \times 1.25 / 12) = 0.158168 \text{ pie}$$

$k$  = conductividad térmica Btu/h pie<sup>2</sup> (°F/pie)

$$k = 0.06476 \text{ (obtenida a } 131^\circ\text{F y } ^\circ\text{API} = 7.9)$$

Viscosidad centipoise = Viscosidad centistokes x gravedad específica

Viscosidad centistokes del AP3 = 365

Gravedad específica  $s = 1.015064$

$\mu$  = viscosidad a la temperatura calórica, centipoise x 2.42 = lb / pie h

$$\mu = 370.5 \text{ centipoise} \times 2.42 = 896.606 \text{ lb / pie h}$$

$$^{\circ}\text{API del AP3} = 7.9$$

$$\text{Factor de caracterización } K = T_B^{1/3} / s \quad (9)$$

$$K = 600^{1/3} / 1.015 = 8.30915$$

$$cp = \text{calor específico del AP3} = 0.42178 \text{ Btu/lb}^{\circ}\text{F (obtenido a } 131^{\circ}\text{F, } ^{\circ}\text{API} = 7.9)$$

$$Re_S = De G_S / \mu = 0.158168 \times 164093.3725 / 896.606 = 28.95$$

$j_H$  = factor de transferencia de calor

$$j_H = hi d / k(cp\mu/k)^{1/3} (\mu/\mu_w)^{0.14} = 3.0 \text{ (flujo laminar fig. 1 anexo)} \quad (10)$$

$hc$  = coeficiente de transferencia de calor para convección libre

$$hc = j_H (k/De)(cp\mu/k)^{1/3} \phi_t \quad (11) \text{ (Ref 1)}$$

$\phi_t$  = razón de viscosidad  $= (\mu / \mu_w)^{1/4} = 1$ , donde  $\mu_w$  = viscosidad a la temperatura

de la pared del tubo, centipoise  $\times 2.42 = \text{lb / pie h}$

$$hc = 3 \times (0.06476 / 0.15817) \times (0.42178 \times 896.6065 / 0.06476)^{1/3} \times 1$$

$$hc = 22.11894 \text{ Btu / h pie}^2\text{ }^{\circ}\text{F del AP3}$$

$$a_1' = \text{área de flujo por tubo plg}^2 = 0.985$$

$$a_1 = \text{área total de flujo por los tubos (plg}^2)$$

$$a_1 = N_t a_1' / 144n \quad (12)$$

donde:  $N_t$  = Número total de tubos = 50

$n$  = Número de pasos = 2

$$a_1 = 50 \times 0.985 / (144 \times 2) = 0.171$$

$$G_1 = m / a_1$$

donde :  $G_1$  = Masa velocidad (para caída de presión solamente)

$$G_1 = 2046.6978 / 0.171 = 11968.993 \text{ lb / h pie}^2$$

$$\text{a } T = 302^{\circ}\text{F}, \mu = 0.0143 \text{ lb / pie h}$$

$$\mu = 0.0143 \times 2.42 = 0.0346 \text{ lb / pie h}$$

$$d = 1.12 / 12 = 0.09333 \text{ pie}$$

$$Re_1 = d G_1 / \mu = 0.09333 \times 11968.993 / 0.0143 = 78119.30163$$

$Re_1$  es para la caída de presión

Condensación de vapor:

$t_w$  = temperatura de la pared del tubo

$T_a$  = temperatura de entrada del vapor

$t_a$  = temperatura de salida del vapor

$$t_w = t_a + \frac{h_{io}}{h_{io} + h_c} (T_a - t_a)$$

$$= 212 + \frac{1500}{1500 + 22.11894} (302 - 212)$$

$$t_w = 300.6921^{\circ}\text{F}$$

Coefficiente total de transferencia de calor limpio  $U_C$  :

$$U_C = \frac{h_{io} h_c}{h_{io} + h_c} = \frac{1500 \times 22.11894}{1500 + 22.11894} = 21.7975 \text{ Btu / h pie}^{20}\text{F}$$

El factor de obstrucción para asfaltos es de 0.005

Coefficiente total de diseño  $U_D$  :

$$U_D = \frac{U_C \times 1/R_d}{U_C + 1/R_d} = \frac{21.7975 \times 200}{21.7975 + 200} = 19.65532 \text{ Btu / h pie}^{20}\text{F}$$

**Caída de presión de vapor.**

Volumen específico del vapor a 302°F (Ref. 2)

$$v = 6.287 \text{ pie}^3 / \text{lb}$$

$$s = (1 / 6.287) / 62.5 = 0.002544$$

$$Re = 78119.30163 \quad f = 0.00016 \text{ pie}^2 / \text{plg}^2 \text{ (fig. 2)}$$

$$\Delta P_f = \frac{0.5 f G_p^2 L \eta}{5.22 \times 10^{10} D_s \phi}$$

$$\Delta P_f = \frac{0.5 \times 0.00016 \times 11968.993^2 \times (5 \times 3.281) \times 2}{5.22 \times 10^{10} \times 0.0933 \times 0.96 \times 1}$$

$$\Delta P_f = 0.0000803 \text{ lb} / \text{plg}^2$$

**2.3.1.1.a Determinación de la capacidad de la bomba.**

Cálculo de la capacidad de la bomba necesaria para lograr mover el AP3 dentro del tanque de almacenamiento de asfalto. Para nuestros cálculos vamos a tomar en cuenta un tiempo de bombeo de 10 horas/ día.

$$C = \frac{125.000 \text{ galones} \times 3.785 \text{ lit} \times \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ lit}}}{10 \text{ horas} \times 3600 \text{ s}} \times \frac{1 \text{ hora}}{3600 \text{ s}} = 0.01314 \text{ m}^3 / \text{seg}$$

$$C = 788.5416 \text{ LPM}$$

$$D = 3 \text{ plg} (7.62 \text{ cm}; 0.0762 \text{ m}), \text{ valor asumido}$$

$$\rho = 1020 \text{ kg/m}^3$$

$$z = 6 \text{ m}$$

$$\mu = 1.172 \text{ kg} / \text{m-s}$$

$$L = 20 \text{ m}$$

$$A_o = \pi D^2/4 = \pi (0.0762 \text{ m})^2/4 = 0.00456 \text{ m}^2$$

$$v = C / A_o = 0.01314 / 0.00456 = 2.8813 \text{ m/s}$$

$$Re = D v \rho / \mu = 0.0762 * 2.8813 * 1020 / 1.172$$

$$Re = 191.0834 \text{ (flujo laminar)}$$

$$f = 64 / Re = 64/191.0834 = 0.3349 \text{ (para flujo laminar)}$$

$$h_f = f * L/D * v^2/2g = 0.3349 * 20/0.0762 * (2.8813)^2/2(9.8) = 37.2351 \text{ m}$$

$n = 60 \%$  (eficiencia de la bomba), valor asumido

$$\frac{\Delta V^2}{2g} + \frac{\Delta P}{\gamma} + \Delta Z + h_b + h_f = 0$$

$$0.42321 + 6 + h_b + 37.2351 = 0$$

$$- h_b = 43.6547 \text{ m}$$

$$W = \frac{h_b * C * \rho * g}{n}$$

$$W = \frac{43.6547 \text{ (m)} * 0.01314 \text{ (m}^3/\text{sg)} * 1020 \text{ (kg/m}^3) * 9.8 \text{ (m/s}^2)}{0.6 * 746 \text{ (watt/hp)}}$$

$$W = 12.8104 \text{ hp}$$

Utilizaremos una bomba de 15 hp.

### 2.3.1.2 Tanque de AP3 de 25.000 galones.

El tanque estará dispuesto de forma horizontal cubierto de una capa de lana de vidrio, evitándose de esta forma las pérdidas por convección libre y por radiación con el medio circundante. El intercambiador será del mismo material, tendrá el mismo arreglo y disposición de los tubos que del tanque de 125.000 galones, la longitud de los tubos será de 8 m.

*Cálculo para encontrar el consumo de vapor en kg. / h y diseño del serpentín:*

$V$  = Volumen de AP3

$Q$  = Cantidad de calor necesario      Kcal / h

$m$  = Flujo másico de AP3                      kg. / h

$c_p$  = Calor específico                          Btu / lb °F

$\rho$  = densidad                                      kg. / m<sup>3</sup>

$\Delta t$  = Diferencia de temperaturas entre la entrada y salida del serpentín (°C)

$$V = 25.000 \text{ galones} \times \frac{3.785 \text{ litros}}{1 \text{ galón}} \times \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ litros}} = 94.625 \text{ m}^3$$

$$V = \pi D^2 L / 4$$

$$L = 4D$$

$$V = \pi D^2 (4D) / 4$$

$$V = \pi D^3$$

$$D^3 = 94.625 \text{ m}^3 / \pi$$

$$D = 3.11137 \text{ m}$$

$$L = 4D = 12.445 \text{ m}$$

El tamaño del tanque serán de 3.2 m de diámetro por 12.5 m de largo.

$$m = V \rho$$

$$m = 94.625 \text{ m}^3 \times 1020 \text{ kg. / m}^3 = 96517.5 \text{ kg. ( 212338.5 lb )}$$

$$\omega = m / \text{número de horas de trabajo} = 212338.5 / 10 = 21233.85 \text{ lb / h}$$

$$k = \text{conductividad térmica Btu / h pie}^2 \text{ (}^\circ\text{F/pie)} = 0.0625 \text{ (obtenida a } 302^\circ\text{F y}$$

$$^\circ\text{API} = 10)$$

$$c_p = 0.530 \text{ Btu / lb }^\circ\text{F (a } 302^\circ\text{F y }^\circ\text{API} = 10)$$

$$T_1 = 150^\circ\text{C} (302^\circ\text{F}) \quad T_2 = 90^\circ\text{C} (194^\circ\text{F})$$

$$Q = \dot{m} c_p \Delta T$$

$$Q = 21233.85 \times 0.535 \times (302 - 194) = 1226891.853 \text{ Btu/h}$$

$$d = 1.38 / 12 = 0.115 \text{ pie}$$

$$\text{Área de flujo transversal} \Rightarrow a_p = \pi d^2 / 4 = \pi (0.115)^2 / 4 = 0.010386 \text{ pie}^2$$

$$\text{Velocidad de masa} \Rightarrow G_p = \dot{m} / a_p = 21233.85 / 0.010386 = 2044468.515 \text{ lb/h pie}^2$$

Las propiedades de viscosidad calórica, gravedad específica, °API, factor de caracterización, son los mismos presentados en el análisis antes descrito.

$$Re_p = d G_p / \mu = 0.115 \times 2044468.515 / 859.584 = 273.52053$$

$$j_H = h_i d / k (c_p \mu / k)^{-1/3} (\mu / \mu_w)^{-0.14} = 1.95 \text{ (flujo laminar con } l/d = 8 \times 3.281 / 0.115 \text{ fig 2 anexo)}$$

$hc$  = coeficiente de transferencia de calor para convección libre

$$hc = j_H (k / De) (c_p \mu / k)^{1/3} \phi_1 \text{ (Ref. 1)}$$

$$\phi_1 = (\mu / \mu_w)^{1/4} = 1, \text{ donde } \mu_w = \text{viscosidad a la temperatura de la pared del tubo}$$

$$hc = 1.95 \times (0.0625 / 0.115) \times (0.53 \times 859.584 / 0.0625)^{1/3} \times 1$$

$$hc = 20.5484 \text{ Btu/h pie}^{20}\text{F}$$

$$U_c = \frac{h_{io} hc}{h_{io} + hc} = \frac{1500 \times 20.5484}{1500 + 20.5484} = 20.27072 \text{ Btu/h pie}^{20}\text{F}$$

Si el factor de obstrucción ( $R_d$ ) es de  $0.005 \text{ h pie}^{20}\text{F/Btu}$

$$U_o = U_c \times 1/R_d = 20.27072 \times 200 = 18.405279 \text{ Btu/h pie}^{20}\text{F}$$

Superficie total  $A = Q / U_D \Delta t$

$$\Delta t = (302 - 194)^\circ\text{F} = 108^\circ\text{F}$$

$$A = 1226891.853 \text{ Btu/h} / (18.405279 \text{ Btu/h pie}^2\text{ }^\circ\text{F} \times 108^\circ\text{F}) = 617.2201 \text{ pies}^2$$

$$\text{Area/tubo (Superficie por pie lineal (pies}^2\text{/pie))} = 8 \times 3.281 \times 0.435 = 11.41788$$

$$\text{Número de tubos} = 620.1884 \text{ pies}^2 / 11.41788 = 54.0573 \text{ tubos}$$

Se necesitan 55 tubos en un arreglo en serie o en paralelo tipo triangular.

### Determinación de la capacidad de la bomba

Cálculo de la capacidad de la bomba necesaria para lograr el mover el AP3 desde el tanquero al tanque de almacenamiento (125.000 galones) y de este al tanque de uso diario (25.000 galones).

Para nuestros cálculos vamos a tomar en cuenta un tiempo de bombeo de 2 horas / día.

$$Q = \frac{10.000 \text{ galones}}{2 \text{ horas}} \times \frac{3.785 \text{ lit}}{1 \text{ galón}} \times \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ lit}} \times \frac{1 \text{ hora}}{3600 \text{ s}} = 0.005256 \text{ m}^3/\text{seg}$$

$$Q = 315.4166 \text{ LPM}$$

$$D = 2.5 \text{ plg (6.35 cm; 0.0635 m), valor asumido}$$

$$\rho = 1020 \text{ kg/m}^3$$

$$z = 7 \text{ m}$$

$$\mu = 1.172 \text{ kg /m-s}$$

$$L = 25 \text{ m}$$

$$A_0 = \pi D^2/4 = \pi (0.0635 \text{ m})^2/4 = 0.00316 \text{ m}^2$$

$$v = Q / A_0 = 0.005256 / 0.00316 = 1.6596 \text{ m/s}$$

$$Re = D v \rho / \mu = 0.0635 * 1.6596 * 1020 / 1.172$$

$$Re = 91.7200 \text{ (flujo laminar)}$$

$$f = 64 / Re = 64/91.7200 = 0.6977 \text{ (para flujo laminar)}$$

$$h_f = f * L/D * V^2/2g = 0.6977 * 25/0.0635 * (1.6596)^2 / 2(9.8) = 38.4785 \text{ m}$$

$$n = 60 \% \text{ (eficiencia de la bomba), valor asumido}$$

$$\frac{\Delta V^2}{2g} + \frac{\Delta P}{\gamma} + \Delta Z + h_b + h_f = 0$$

$$0.1404 + 7 + h_b + 38.4785 = 0$$

$$- h_b = 45.6189 \text{ m}$$

$$W = \frac{h_b * Q * \rho * g}{n}$$

$$W = \frac{45.6185 \text{ (m)} * 0.005256 \text{ (m}^3\text{/sg)} * 1020 \text{ (kg/m}^3\text{)} * 9.8 \text{ (m/s}^2\text{)}}{0.6 * 746 \text{ (watt/hp)}}$$

$$W = 5.3547 \text{ hp}$$

Utilizaremos una bomba de 6 hp.

### 2.3.1.3 Tanqueros, camiones cisterna con el AP3

Los tanqueros van provistos en su interior de un serpentín para facilitar el desalojo del producto, al cual se acoplan válvulas de entrada de vapor a 150°C. Estos camiones tienen una capacidad máxima de 10.000 galones. Cabe indicar que los mismos están expuestos a la intemperie, tan solo con una protección anticorrosiva. La temperatura a la que llegan provenientes del la

refinería de Esmeraldas es entre 30 y 50°C, siendo necesario calentarlos para extraer el producto (AP3). Vapor entra al sistema a una temperatura de 150°C (302°F) y retorna a 90°C (194°F).

*Cálculo para encontrar el consumo de vapor en kg / h:*

$$V = 10.000 \text{ galones} \times \frac{3.785 \text{ litros}}{1 \text{ galón}} \times \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ litros}} = 37.85 \text{ m}^3$$

$$m = V \rho$$

$$m = 37.85 \text{ m}^3 \times 1020 \text{ kg. / m}^3 = 38607 \text{ kg. ( 84935.4 lb )}$$

$$\omega = m / \text{número de horas de trabajo} = 84935.4 / 10 = 8493.54 \text{ lb / h}$$

$$T_1 = 150^\circ\text{C (302}^\circ\text{F)} \quad T_2 = 90^\circ\text{C (194}^\circ\text{F)}$$

$$Q = \omega \text{ cp } \Delta t$$

$$Q = 84935.4 \times 0.535 \times (302 - 194) = 490756.7412 \text{ Btu / h}$$

#### 2.3.1.4 Tanque de RC - 250 de 25.000 galones.

No requiere ser calentado, debido a que a la temperatura ambiente se encuentra en su fase líquida y a una mayor temperatura podría causar una explosión de los gases producidos por el producto.

#### 2.3.1.5 Consumo total de vapor

La presión manométrica recomendada para las plantas de asfalto es de 100 lb/plg<sup>2</sup>. El consumo de vapor utilizado en la planta de asfalto será la suma de todas las cargas aplicadas en el sistema.

a)	Tanque de almacenamiento AP3	-----	3231476.798 Btu / h
b)	Tanque de uso diario AP3	-----	1226891.853 Btu / h
c)	Tanqueros (camiones cisterna)	-----	490756.7412 Btu / h
d)	Tanque de almacenamiento RC-250	-----	0 Btu/ h
GENERACIÓN DE VAPOR TOTAL			----- 4949125.392 BTU/ h

La producción total de vapor a la presión de 100 lb/plg<sup>2</sup> cuyo calor latente de 889.2 Btu/ lb será:

$$\text{Consumo total de vapor} = \frac{\text{Cantidad de calor}}{\text{Calor latente}} = \frac{4949125.392 \text{ Btu / h}}{889.2 \text{ Btu/ lb}}$$

$$\text{Consumo total de vapor} = 5565.81803 \text{ lb / h}$$

El condensado generado es nuevamente utilizado para alimentar a la caldera. Las pérdidas existentes en el sistema debidas a purgas, extracciones, y otras serán recompensadas con agua de reposición (fuente de alimentación), provenientes de la planta de tratamiento. Estas se mezclarán antes de ingresar por medio de una bomba a la caldera.

Las pérdidas por radiación y convección libre y natural en los accesorios, tuberías y otras, su calculo es complejo, no constituyendo parte del temario de estudio; diremos que estas pérdidas alcanzan a un 10% de la carga térmica de cada equipo.

### 2.3.1.6 Cálculo de la cantidad de calor suministrado por la caldera

La cantidad de calor por la caldera será:

$$Q_t = \omega (h_2 - h_1)$$

donde:  $Q_t$  = Cantidad de calor transmitido

$\omega$  = Flujo masico de agua a la caldera

$h_1$  = Entalpía del agua de entrada a la caldera

$h_2$  = Entalpía del agua de salida de la caldera

Temperatura del agua de entrada a la caldera  $T_1 = 158^\circ\text{F}$

Presión de descarga de la bomba  $P_1 = 150 \text{ lb/plg}^2 \text{ abs}$

Empleando las tablas de vapor a  $158^\circ\text{F}$ :  $h_1 = 125.89 \text{ Btu / lb}$

Temperatura de salida del vapor de la caldera  $T_2 = 305^\circ\text{F}$

Presión de vapor a la salida de la caldera  $P_2 = 225 \text{ lb/plg}^2 \text{ abs}$

Empleando las tablas de vapor:  $h_2 = h_g = 1181.15 \text{ Btu/lb}$

$$Q_t = \omega (h_2 - h_1)$$

$$Q_t = 5565.81803 \text{ lb / h } (1181.15 - 125.89) \text{ Btu / lb}$$

$$Q_t = 5873385.134 \text{ Btu / h}$$

Por lo tanto los caballos calderas requeridos son

$$\text{Caballos caldera (C.C.)} = \frac{\omega (h_2 - h_1)}{33475} = 175.4558 \text{ C.C.}$$

Al seleccionar la caldera más adecuada a nuestras necesidades que encontramos en las calderas Cleaver Brooks, una pirotubular o de tubos de fuego de capacidad 200 C.C.

## 2.4 Calderas

Son aparatos en que se produce intercambio de calor entre los gases producidos por la combustión y otro elemento generalmente agua o aceite, con el fin de producir vapor o calentamiento.

Los tipos más importantes de calderas son:

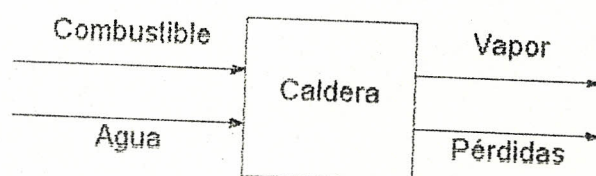
- Calderas de vapor
- Calderas de aceite térmico
- Calderas de agua caliente

Básicamente las calderas constan de tres partes fundamentales:

- El hogar, donde se produce la combustión
- Tubería a través de cuya superficie lateral se produce el intercambio de calor entre los gases de combustión y el agua o aceite con su respectivo colector de vapor. Los gases de combustión circulan por el interior de los tubos, mientras que el agua se encuentra en el exterior almacenada en un depósito por el cual pasan los tubos, ó por el contrario, existen calderos en los cuales el agua circula por el interior de los tubos y los gases de combustión, por el exterior de los tubos a través de cámaras.
- Chimenea para la salida de los gases de combustión a la atmósfera luego que han cedido el calor para la evaporación.

### 2.4.1 Calderas a vapor

Para una mejor comprensión de las mismas se da un balance térmico de la caldera.



Las calderas se clasifican de diferentes formas y criterios relacionados entre los cuales tenemos:

- Por la energía consumida
- Por la disponibilidad de los tubos
- Por la situación relativa de los espacios de combustión y agua
- Por los métodos de circulación de agua
- Por la presión de trabajo
- Por el número de pasos o retornos
- Por la disposición de los tubos
- Por la posición de las calderas

(Ref 3)

Dentro de esta gran gama de calderas se encuentran las calderas acuotubulares y las de tubos de fuego (pirotubulares). Las primeras usadas cuando los requerimientos de vapor son elevados como son las empresas generadoras de energía eléctrica, y en ingenios azucareros; en cambio las

pirotubulares por ser de menor capacidad de generación de vapor son las más empleadas en la industria.

Para la selección más adecuada de la calderas pirotubulares, debemos tomar en cuenta varios criterios:

- La posición
- El número de pasos
- El tipo de combustible

Una vez determinados los criterios antes mencionados, la caldera tendrá que cumplir varios requisitos:

- Equipo y accesorios de iguales o mayor capacidad a los requeridos por el fabricante
- Ser un modelo estándar
- Tener alta eficiencia de operación, debido a su eficiencia de combustión (80 - 90%)
- Con un margen de sobrecarga máximo del 100%
- Generación de vapor en pocos minutos
- Tener bajos nivel de ruido
- La operación debe ser automática y manual con completa seguridad
- Las pérdidas de calor por radiación, convección natural y libre deben ser pequeñas.

## **CAPITULO III**

### **SELECCIÓN DEL COMBUSTIBLE, ANÁLISIS DE LA COMBUSTIÓN, CÁLCULO Y DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA DE COMBUSTIBLE.**

Los combustibles son sustancias orgánicas utilizadas principalmente para la producción de calor. Se clasifican en: sólidos, líquidos y gaseosos. Los combustibles utilizados en la operación de calderas industriales en el país son derivados del petróleo entre los cuales tenemos: Diesel, bunker, fuel oil y muy raras veces se utilizan otros combustibles uno de ellos es el bagazo de la caña utilizado en los ingenios azucareros.

#### **3.1 PROPIEDADES FÍSICO - QUÍMICAS DE LOS COMBUSTIBLES**

Un conocimiento de las propiedades de los combustibles es importante para su uso, con el fin de garantizar un proceso de combustión eficiente. Entre las propiedades que caracterizan a un combustible están:

##### **3.1.1 Punto de inflamación.**

El punto de inflamación de un combustible es aquella temperatura a la cual empiezan a desprenderse vapores, que al combinarse con el aire se vuelven inflamables, pero a esta temperatura no hay presencia de llama.

### **3.1.2 Punto de ignición o combustión.**

Se distingue del punto de inflamación como la temperatura en que la llama formada por la combustión de los vapores es duradera y persistente. El punto de ignición suele estar a temperaturas de 20°C a 60°C superiores a las del punto de inflamación.

### **3.1.3 Punto de escurrimiento.**

El punto de escurrimiento o fluidez de un aceite combustible, en términos generales, es la temperatura a la cual se congela. Se determina simplemente enfriando lentamente al combustible y anotando la temperatura a la cual ya no puede fluir.

### **3.1.4 Viscosidad, densidad.**

La viscosidad y densidad de un aceite combustible es la medida de su fricción interna o resistencia al flujo. Hay varios métodos vistos en las propiedades de los asfalos.

### **3.1.5 Cenizas.**

El contenido de cenizas de un combustible se determina quemado una muestra en un recipiente cerrado hasta que sólo queden cenizas, las cenizas son

constituyentes incombustibles del combustible, las mismas que quedarán como depósitos en las superficies generadoras reduciendo la transferencia de calor.

### **3.1.6 Agua y sedimentos.**

Estos determinan la estabilidad del aceite combustible durante el almacenamiento. Un mezclado no satisfactorio, o la presencia de componentes inestables y oxidables del aceite producen a lo largo del tiempo la separación de lodos, emulsiones y sedimentos, que producen obstrucciones en filtros o boquillas y corroen la tuberías y tanques de almacenamiento.

### **3.1.7 Valor calórico o poder calorífico.**

Valor calórico es la energía que un combustible puede liberar, si tanto los reactantes, como los productos en el proceso de combustión se encuentran a la misma temperatura. Se utilizan los calificativos "Superior" (HHV) e "Inferior" (LHV). El valor calórico superior es determinado cuando el vapor de agua presente en los productos de combustión se condensa y el calor latente de vaporización del agua se incluye en el valor calórico del combustible. El valor calórico inferior es obtenido cuando el calor latente de vaporización no ésta incluido.

### **3.1.8 Contenido de azufre y vanadio**

Es la cantidad porcentual en peso de azufre i/o vanadio que contiene un combustible. Estos elementos son corrosivos en el lado de fuego de las calderas.

### 3.1.9 PROPIEDADES DEL DIESEL Y DEL FUEL OIL USADOS EN EL ECUADOR

Propiedades	Diesel oil N°1	Diesel oil N°2	Fuel oil N°6
Viscosidad SSU a 100	30 - 35	36 - 45	3714 - 3850
Gravedad específica	0.80 - 0.85	0.849 - 0.86	0.9503 - 0.9535
Grados °API	40 - 42	33 - 35	16.9 - 17.4
Punto de inflamación	140	180	285
Punto de fluidez	-	44	30
Poder calorífico superior (kcal/kg)	10500	10700	10900
Porcentaje agua-sedimentos %	trazas	trazas	trazas
Contenido de azufre	0.5	0.49	1.50
Contenido de vanadio (ppm)	-	1.5	120
Contenido de cenizas %	0.21	-	trazas
Contenido de sodio (ppm)	-	trazas	trazas
Temperatura de destilación	550	695	-

### 3.2 SELECCIÓN DEL COMBUSTIBLE.

Dentro de la selección más idónea del combustible a ser empleado en la caldera hay que tomar en consideración algunos aspectos:

- El combustible usado en las calderas pirotubulares sea líquido o gaseoso, para una mejor combustión del mismo.
- El costo del mismo
- El mantenimiento de los equipos
- La eficiencia de combustión.
- La seguridad de operación

De los combustibles que hay en nuestro medio, escogemos al diesel 2.

El proceso de combustión es muy complejo y sobre él intervienen factores de orden químico, térmico y mecánico de importancia variable. Se comprende por combustión la reacción química exotérmica entre una sustancia que se quema, el combustible (diesel oil, fuel oil, diesel, bunker, etc.) y el oxígeno o comburente. Dicha reacción genera desprendimiento de energía.

En los cálculos de combustión en que interviene el aire, para facilidades se considera compuesto del 21% de oxígeno y 79% de nitrógeno. La cantidad mínima de aire que proporciona suficiente oxígeno para la combustión completa de todo el carbono, hidrógeno y cualquier otro elemento combustible se llama "aire teórico" En la practica no se obtiene una combustión completa a menos que la cantidad de aire suministrada sea mayor a la teórica; la misma que se expresa en porcentajes. Una reacción es completa cuando el combustible es totalmente oxidado y se libera toda la energía.

Un análisis gravimétrico del diesel N<sup>o</sup>2 es el siguiente:

C = 86.5 %

H<sub>2</sub> = 11.0 %

N<sub>2</sub> = 0.29 %

S = 0.94 %

O<sub>2</sub> = 1.02 %

Cenizas = 0.05

V.C. 18600 Btu / lbm

Aplicando el concepto de mol, que es la cantidad de materia cuya masa en libras masa (lbm) es numéricamente igual al peso molecular de una sustancia.

<u>Sustancia</u>	<u>Peso molecular</u>	<u>Mol</u>
C	12	12 lbm
S	32	32 lbm
H <sub>2</sub>	2	2 lbm
O <sub>2</sub>	32	32 lbm
N <sub>2</sub>	28	28 lbm

La combustión incompleta puede ser debida a las siguientes causas:

- Insuficiencia de oxígeno
- Mezcla imperfecta entre el combustible y el oxígeno
- Temperatura demasiado baja para mantener la combustión.

De todos los componentes principales del aire sólo el oxígeno reaccionara con el combustible; el nitrógeno es un gas inerte que no participa en la reacción, actúa como diluyente del oxígeno y tiende a reducir la velocidad de reacción; al absorber parte del calor liberado, reduce la temperatura máxima de combustión y en consecuencia, el rendimiento con que puede transformarse el calor liberado durante la combustión.

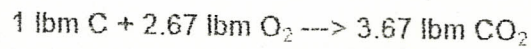
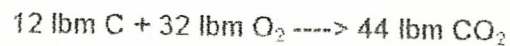
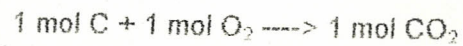
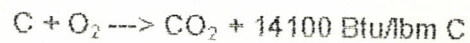
### 3.2.1 Reacciones de Combustión

Para los cálculos a realizar consideramos que el aire esta formado de:

$$1 \text{ lbm O}_2 + 3.31 \text{ lbm N}_2 = 4.31 \text{ lbm aire}$$

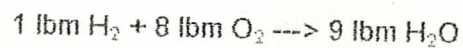
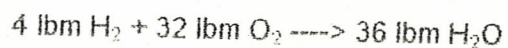
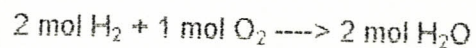
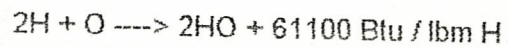
$$1 \text{ mol de O}_2 + 3.76 \text{ mol de N}_2 = 4.76 \text{ mol de aire}$$

Cuando el *carbono* se combina completamente se produce:



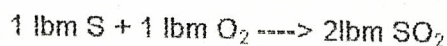
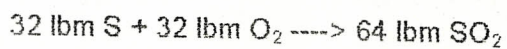
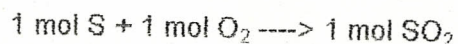
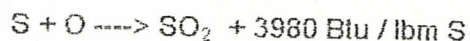
$$\frac{32 \text{ lbm O}_2}{12 \text{ lbm C}} = \frac{2.67 \text{ lbm O}_2}{\text{lbm sustancia}}$$

Cuando se quema el *hidrógeno* tenemos:



$$\frac{32 \text{ lbm O}_2}{4 \text{ lbm H}_2} = \frac{8 \text{ lbm O}_2}{\text{lbm sustancia}}$$

Cuando se quema *azufre* tenemos:



$$\frac{32 \text{ lbm O}_2}{32 \text{ lbm S}} = \frac{1 \text{ lbm O}_2}{\text{lbm sustancia}}$$

Sustancia	$\frac{\text{lbm sustancia}}{\text{lbm combustible}}$	$\frac{\text{lbm O}_2}{\text{lbm sustancia}}$	$\frac{\text{lbm O}_2}{\text{lbm combustible}}$
C	0.8650	2.67	2.309
H <sub>2</sub>	0.1120	8	0.896
S	0.0094	1	<u>0.009</u>
			3.214
Restando el oxígeno presente en el combustible			<u>- 0.0102</u>
			3.204

Entonces la cantidad de aire teórico requerido para la combustión es:

$$3.204 \frac{\text{lbm O}_2}{\text{lbm combustible}} \times 4.31 \frac{\text{lbm aire}}{\text{lbm O}_2} = 13.83 \frac{\text{lbm aire}}{\text{lbm combustible}}$$

En la práctica se recomienda, para obtener una combustión completa un 3% de oxígeno y un exceso de aire del 15%.

$$\text{Aire exceso} = \frac{\text{Aire real} - \text{Aire teórico}}{\text{Aire teórico}} \times 100$$

$$\text{Aire real} = \text{Aire teórico} (1 + \text{Aire exceso} / 100)$$

$$\text{Aire real} = 13.83 (1 + 15/100) = 14.98 \frac{\text{lbm aire}}{\text{lbm combustible}}$$

La firma Cleaver Brooks indica que el nivel óptimo de porcentaje de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) para calderas pirotubulares es de 12.8%. El diagrama de OSWALD se utiliza para determinar la combustión completa, dando un valor de 2.7% para el oxígeno libre en los gases de escape y un exceso de aire de 15%.

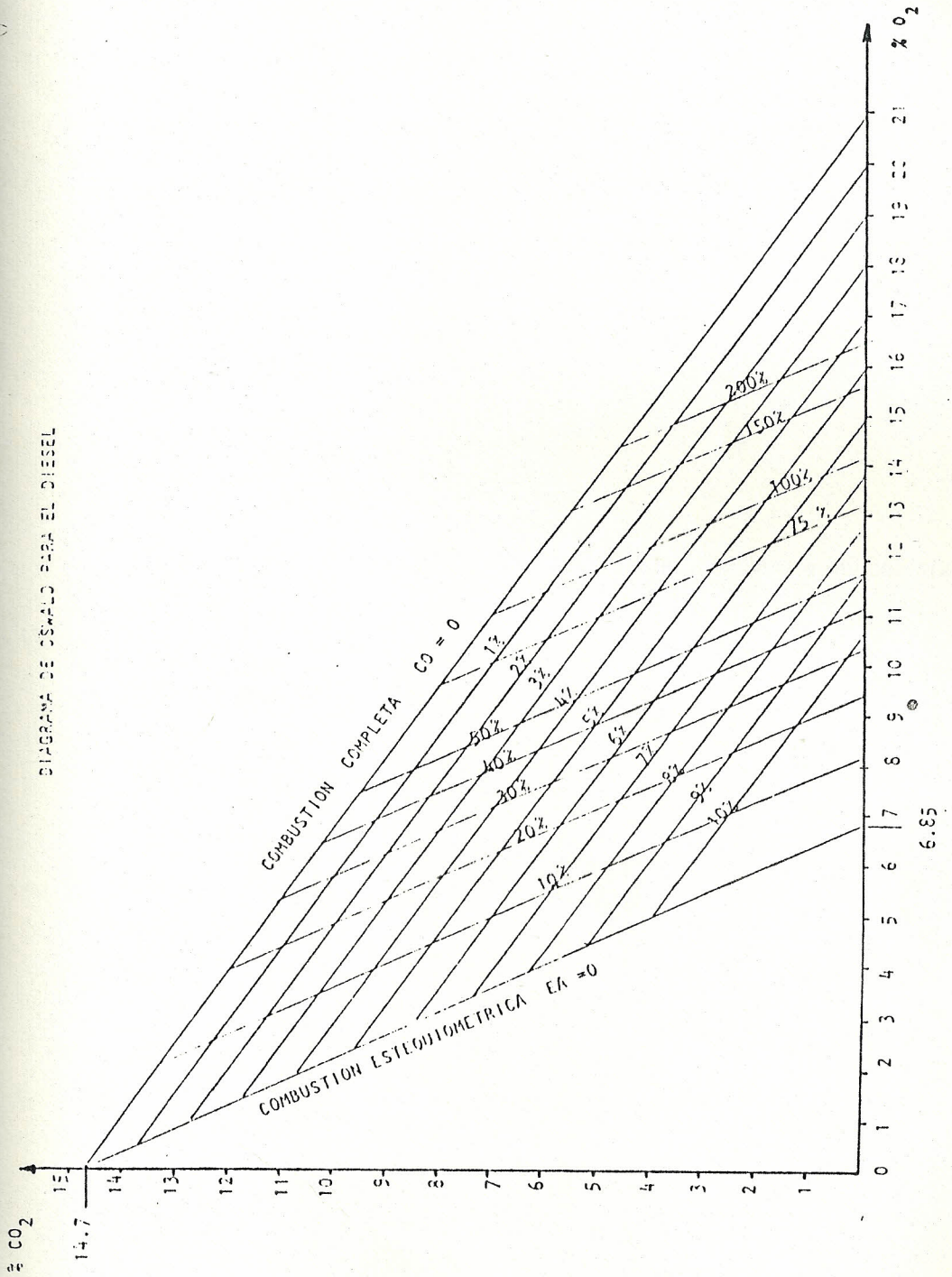
#### Eficiencia de combustión.

Para una mejor relación aire-combustible en la combustión se requiere del 15% de aire en exceso para una combustión completa. Demasiado aire es perjudicial ya que disminuye la temperatura de la llama e incrementa la cantidad de productos de combustión por lo tanto hay menor transferencia de calor y mayores pérdidas en los gases de escape. La falta de aire en cambio provoca una combustión incompleta, produciendo una pérdida de poder calorífico.

Los requisitos para una combustión eficiente son:

- El combustible debe ser totalmente atomizado.
- El aire inyectado debe mezclarse íntimamente con el combustible atomizado.
- El tiempo debe ser suficiente para que la gotita más grande tenga una combustión completa, antes que la gotita entre en contacto con una superficie fría.
- La temperatura dentro del hogar esta relacionada con el tiempo antes indicado.

DIAGRAMA DE CÁLCULO PARA EL DIESEL



La Cleaver Brooks indica que para una eficiente combustión se necesario:

- Tener control sistemático, constante, del aire en exceso, analizando los gases de escape para lograr una eficiente combustión.
- Controlar la temperatura de los gases de escape, los cuales no deben sobrepasar los 65°C sobre la temperatura del vapor generado; dándonos la eficiencia de combustión en el caldero (ver tabla 3.1):

$$T_g = T \text{ vapor generado } (^{\circ}\text{C}) + 65^{\circ}\text{C}$$

$$T_g = 150^{\circ}\text{C} + 65^{\circ}\text{C} = 215^{\circ}\text{C}$$

Como el exceso de aire es de 15% obtenemos que la eficiencia del caldera será de 84.27%

**Tabla 3.1 Temperatura de eficiencia de los gases de escape de combustión.**

% de exceso de aire	93	121	149	177	204	232	260	288	316	343	371
5	88.8	88.7	87.6	86.5	85.5	84.4	83.3	82.2	81.2	80.1	79.0
10	89.6	88.5	87.3	86.2	85.1	84.0	82.9	81.7	80.6	79.5	78.4
15	89.4	88.2	87.1	85.9	84.7	83.6	82.4	81.2	80.1	78.9	77.7
20	89.2	88.0	86.8	85.6	84.4	83.2	81.9	80.7	79.5	78.3	77.1
25	89.0	87.8	86.5	85.3	84.0	82.8	81.5	80.2	79.0	77.7	76.5
30	88.9	87.6	86.3	85.0	83.6	82.3	81.0	79.7	78.4	77.1	75.8
35	88.7	87.3	86.0	84.6	83.3	81.9	80.6	79.2	77.9	76.5	75.2
40	88.5	87.1	86.7	84.3	82.9	81.5	80.1	78.7	77.4	76.0	74.6
45	88.3	86.9	85.4	84.0	82.6	81.1	79.7	78.2	76.8	75.4	73.9
50	88.1	86.7	85.2	83.7	82.2	80.7	79.2	77.8	76.3	74.8	73.3
55	88.0	86.4	84.9	83.4	81.9	80.3	78.8	77.3	75.7	74.2	72.7
60	87.8	86.2	84.6	83.1	81.5	79.9	78.3	76.8	75.2	73.6	72.0
65	87.6	86.0	84.4	82.7	81.1	79.5	77.9	76.3	74.6	73.0	71.4
70	87.4	85.7	84.1	82.2	80.8	79.1	77.4	75.8	74.1	72.4	70.8
75	87.2	85.5	83.8	82.1	80.4	78.7	77.0	75.3	73.6	71.8	70.1
80	87.0	85.3	83.5	81.8	80.0	78.3	76.5	74.8	73.0	71.3	69.5
85	86.9	85.1	83.3	81.5	79.7	77.9	76.1	74.3	72.5	70.7	68.9
90	86.7	84.8	83.0	81.2	79.3	77.5	75.6	73.8	71.9	70.1	68.2
95	86.5	84.6	82.7	80.8	78.9	77.1	75.2	73.3	71.4	69.5	67.6
100	86.3	84.4	82.5	80.5	78.6	76.6	74.7	72.8	70.8	68.9	67.0

### 3.3 DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA DE COMBUSTIBLE.

En las instalaciones generadoras de vapor es necesario considerar los componentes que conforman el sistema de combustible. Los principales son:

- Tanque de almacenamiento, de uso diario
- Sistemas de tuberías y accesorios
- Bombas de alimentación y filtros
- Quemadores

El diseño del tanque de almacenamiento o de reserva no es parte de este estudio. Se realizará el dimensionamiento del mismo con relación al tanque de servicio diario de combustible a la capacidad requerida por la caldera, teniendo en consideración su forma, ubicación y el tiempo requerido para mantener la producción a su máxima capacidad. El tiempo requerido oscila entre 15 a 30 días.

Por haber suficiente espacio en la planta se ubicará el tanque en un área donde no tenga incidencia en la instalación en caso de producirse un incendio. El tanque de va a estar provisto de un cinturón de seguridad, que es por hubiese alguna fuga o derrame del mismo. El tanque reserva es de tipo vertical construido sobre cimientos de hormigón armado con una inclinación del 2 al 4% hacia la válvula de purga para eliminar el agua y pequeñas impurezas que se depositan en el fondo. En el extremo opuesto deben situarse el punto de salida del combustible y a una altura no menor de 75 mm del fondo del tanque (ref.3). Se programarán limpiezas periódicas del mismo.

El circuito de distribución de combustible contará con un sistema que indique la disponibilidad de combustible, medios de seguridad apropiados y filtros para enviar un combustible más limpio al quemador.

La capacidad de almacenamiento de combustible no excederá el 90% del tanque, a fin de prevenir fugas por dilataciones debidas al incremento de temperatura:

$$6000 \text{ litros} \times 15 \text{ días} = 90000 \text{ litros}$$

### 3.3.1 Tanque de servicio diario.

Se lo utiliza para almacenar cantidades pequeñas de combustible, con el objetivo de calentarlo a una mayor temperatura, homogenizándose debido a una recirculación constante. Se recomienda un tanque por gravedad de manera que se ve favorecido el cebado, de forma cilíndrica horizontal, con una capacidad de almacenamiento de 24 horas de operación de los equipos, siendo ubicado dentro de las normas de seguridad permitidas.

En la siguiente tabla 3.2 se establece la capacidad mínima de almacenamiento en función de la potencia desarrollada para una caldera pirotubular.

**Tabla 3.2 Capacidad mínima de almacenamiento.**

Litros	Galones Americanos	Caballos Caldera
1500	396.3	hasta 50
2000	528.4	60 - 70
3000	792.6	80 - 100
4000	1056.8	125
5150	1360.6	150
6000	1585.2	200
7300	1928.7	250
10000	2642.0	300

(Ref.4)

El tanque de servicio diario es necesario por tres razones:

- a) Permite medir la cantidad de combustible consumido

- b) Provee de un lugar conveniente para retorno del exceso de combustible del quemador
- c) Proporciona un abastecimiento continuo mientras se da mantenimiento a los equipos instalados anteriormente.

### 3.4 SELECCIÓN DE LA BOMBA DE COMBUSTIBLE

Todas las calderas sean estas acuotubulares o piro-tubulares vienen provistas de una bomba de combustible, generalmente del tipo de desplazamiento positivo, rotativas o de engranajes; son de bajo peso y de una eficiencia mecánica entre 75 al 85%.

Las características más importante para la selección de una bomba son:

- Su cabezal o altura de descarga
- Su caudal volumétrico

*Determinación del caudal volumétrico.*

Depende de la capacidad de la caldera; para la Cleaver Brooks piro-tubulares con una eficiencia del 80%, que utilizan diesel N°2 es:

$$Q = \text{Consumo de combustible} = \text{Capacidad} \times 0.295 \text{ GPH} / \text{C.C.}$$

$$= 200 \text{ C.C.} \times 0.295$$

$$Q = \text{Consumo de combustible} = 59 \text{ GPH}$$

donde: GPH = galones por hora;

GPM = galones por minuto

$$Q = 0.9833 \text{ GPM}$$

Ver tabla 3.3 consumo de combustible recomendado por la Cleaver Brooks.

*Altura total dinámica de descarga*

$$TDH = \frac{(P_2 - P_1) \times 2.31}{\text{sp.gr.}} + P \text{ atomización} + Z + (H_{ts} + H_{td})$$

Como  $P_2 - P_1 = P$  atmosférica

Para calderas de 200 C.C. la presión de atomización es de  $125 \text{ lb/plg}^2 = 340$  pies

$$Z = 2.4 \text{ m (7.8744 pie)}$$

$$H_{ts} = \text{pérdidas totales succión} = H \text{ tubería} + H \text{ accesorios} = 7.25 + 2.5 = 9.75 \text{ pie}$$

$$H_{td} = \text{pérdidas totales descarga} = H \text{ tubería} + H \text{ accesorios} = 7.25 + 2.15 = 9.40 \text{ pie}$$

$$TDH = 340 + 7.8744 + 9.75 + 9.4$$

$$TDH = 367.0244 \text{ pies}$$

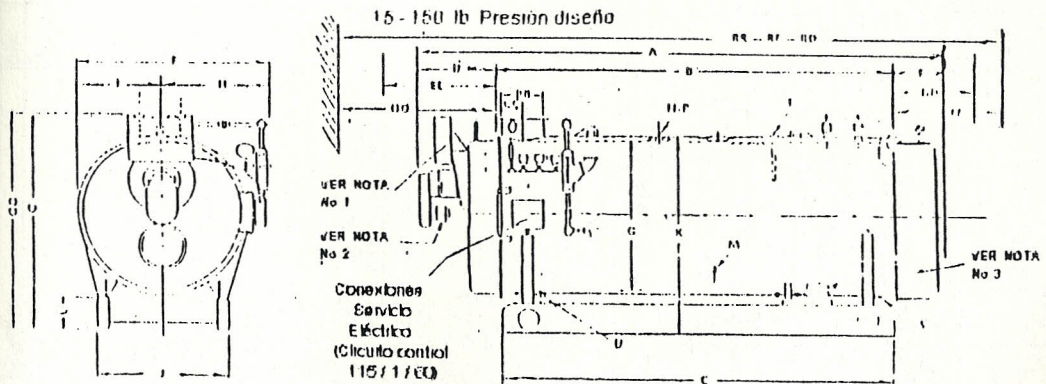
*Potencia requerida*

$$BHP = \frac{8.33 \times Q \times TDH \times \text{sp.gr.}}{33000 \times \eta} = \frac{8.33 \times 0.9833 \times 367.0244 \times 0.8265}{3300 \times 0.6} = 1.2549 \text{ hp}$$

Selecciona el más próximo 1.5 hp.

**Tabla 3.3 Consumo de combustible dado por la Cleaver Brooks.**

Potencia de Caldero (BHP)	Producción de vapor (lbs./hr)	Consumo máximo de combustible a 80% de eficiencia	
		No2	No6
50	1.725	15	14
60	2.070	18	16.5
70	2.415	21	19.5
80	2.760	24	22.5
100	3.450	30	28
125	4.313	37.5	35
150	5.175	45	42
200	6.900	60	56
250	8.625	74.5	69.5
300	10350	89.5	83.5
350	12.075	104.5	97.5
400	13.800	119.5	111.5
500	17.250	149.5	139.5
600	20.700	179.5	167.5
700	24.150	210	196
800	27.600	239	223



Dimensiones	Caballaje	Dim.	50	60	70	80	100	125	150	200	250	300	350	400	500	600	700	800***	
			Longitudes	A	3,3 m	3,3 m	4,3 m	4,3 m	4,8 m	4,4 m	5,0 m	6,0 m	5,1 m	5,8 m	21,8 m	5,2 m	6,1 m	7,0 m	7,9 m
	Anchuras	A	1,6 m	1,6 m	1,6 m	1,6 m	1,6 m	1,9 m	1,9 m	1,9 m	2,4 m	2,5 m	2,5 m	2,9 m	2,9 m	2,9 m	2,9 m	2,9 m	2,9 m
	Alturas	A	1,9 m	1,49 m	1,9 m	1,9 m	1,9 m	2,1 m	2,1 m	2,1 m	2,7 m	2,7 m	2,7 m	3,2 m	3,2 m	3,2 m	3,2 m	3,2 m	3,2 m
Mínimo espacio libre	Giro puerta trasera	DD	1,4 m	1,4 m	1,4 m	1,4 m	1,4 m	0,8 m	0,8 m	0,8 m	1,0 m	1,0 m	1,0 m	1,3 m	1,3 m	1,3 m	1,3 m	1,3 m	1,3 m
	Giro puerta delantera	EE	1,4 m	1,4 m	1,4 m	1,4 m	1,4 m	1,7 m	1,7 m	1,7 m	2,3 m	2,3 m	2,3 m	2,7 m	2,7 m	2,7 m	2,7 m	2,7 m	2,7 m
	Remoción del tubo, atrás	FF	2,1 m	2,1 m	3,1 m	3,1 m	3,6 m	2,9 m	3,5 m	4,3 m	3,3 m	3,9 m	4,7 m	3,4 m	4,3 m	5,2 m	6,0 m	6,0 m	6,0 m
	Remoción del tubo, adelante	GG	1,9 m	1,9 m	2,9 m	2,9 m	3,3 m	2,6 m	3,2 m	4,0 m	2,9 m	3,6 m	4,3 m	3,0 m	3,9 m	4,7 m	5,5 m	5,5 m	5,5 m
Chimenea	Diámetro (conexión brida)	BB	25 cm	25 cm	30 cm	30 cm	30 cm	40 cm	40 cm	40 cm	50 cm	50 cm	50 cm	61 cm	61 cm	61 cm	61 cm	61 cm	61 cm
	Brida del arco delantero al tubo (LC)	CC	15 cm	15 cm	18 cm	18 cm	18 cm	23 cm	23 cm	23 cm	28 cm	28 cm	28 cm	33 cm	33 cm	33 cm	33 cm	33 cm	33 cm
Capacidades nivel del mar hasta 914 m	Capacidad clasificada en kg vapor/hora (100 C)		782	939	1095	1252	1565	1956	2347	3129	3912	4595	5477	6259	7825	9389	10954	12605	
	Energía en Btu de salida (1000 Btu/h)		1674	2009	2343	2678	3348	4184	5021	6695	8369	10043	11716	13390	16738	20085	23432	26780	
	EDR - vapor bruto, en m <sup>2</sup> (EDR=Radiación directa equivalente)		1685	3796	4427	5052	6327	7915	9489	12655	15830	18963	22144	25310	31638	37966	44269	50622	
Consumo aproximado de combustible	Aceite liviano - l/h		58,8	68,1	79,5	90,8	113,5	141,5	170,3	227,1	282	338,8	395,5	452,3	565,9	679,4	791,1	904,7	
	Aceite pesado - l/h		53	62,4	73,8	85,1	106	132,5	159	211,9	263	316	369	422	528	634	740	844,1	
	Gas m <sup>3</sup> /h																		
	600 Btu - fuel		118,6	142,2	165,9	189,7	237	296,2	355,7	474	529,4	711,1	829,7	948,7	1195,1	1421,6	1659,5	1897,4	
	600 Btu - mezclado		74	88,9	103,8	118,6	148,2	185,2	222,3	296,2	370,4	444,4	518,6	593	740,7	888,5	1036,9	1184,9	
	1000 Btu - natural		59,3	71,1	82,9	94,9	118,58	148,1	177,8	237	296,2	365,5	414,8	474,3	592,6	710,8	829,7	948,7	
Gas (therms por hora)		21	25,1	29,3	33,5	41,98	52,3	62,8	83,7	104,6	125,5	146,5	167,5	209,3	251	293	335		
Requerimientos de potencia	Motor soplador, HP							5	7,5	10	7,5	10	15						
	Todos los modelos, excepto gas							5	7,5	10	7,5	10	15						
	Modelos gas solamente		2	2	2	2	3	5	5	10	7,5	7,5	15	10	15	20	30	50	
	Motor de bomba de aceite, hp																		
	Aceite No2		0,333	0,333	0,333	0,333	0,333	0,333	0,5*	0,5*	0,5*	0,5*	0,75	0,75	0,75	0,75	1	1	
	Aceite No4		0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5							
	Aceite No5 y No6		0,333	0,333	0,333	0,333	0,333	0,333	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	
	Calentador de aceite, KW																		
	Aceite No4		3	3	3	3	3	3	3	3	3								
	Aceite No5 y No6		5	5	5	5	5	5	5	15/7,5	7,5	7,5	7,5	7,5**	7,5**	7,5**	7,5**	7,5**	
Motor compresor de aire - hp (Alimentado por aceite solamente)								Compresor de aire accionado por correa desde el motor soplador											
Nivel de intensidad del sonido	LLAA, dBA (Abreviaciones)		79	79	79	79	81	83	83	83	88	88	89	83	83	83	83	85	88
	LLBA, dBA LLA = llama alta		78	78	78	78	79	81	82	81	86	86	85	80	82	82	82	84	
	LLAG, dBA LLS = llama baja		77	77	76	78	78	81	80	82	84	86	86	82	82	82	85	87	
	LLEG, dBA A = aceite G = gas		72	72	73	74	75	78	77	78	81	82	83	80	81	81	82	84	
t Aceite No6	Nota 1		Panel de control reubicado en calderas de 250 hp.																
t Aceite No5	Nota 2		Compresor de aire accionado por correa desde el motor soplador en modelos de 125 a 350 hp																
0,333 hp en Canada	Nota 3		Modulo del compresor de aire en modelos de 50 a 100 hp y de 400 a 700 hp.																
**10 kw vapor y agua caliente de baja presión			(Unidades fabricadas en Canadá. Modelos de 50 a 100 hp usan compresor de aire accionado por correa)																
*** Modelo de alto rendimiento																			

## CAPITULO IV

### TRATAMIENTO, CALCULO Y DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA DE AGUA DE ALIMENTACIÓN, DE LAS TUBERÍAS DE DISTRIBUCIÓN Y DE RETORNO DE CONDENSADO.

#### 4.1 TRATAMIENTO

El agua de alimentación en todo sistema de generación de vapor está constituida por el condensado o por el agua tratada, o bien una mezcla de ambos.

El suministro de agua a la caldera se realiza con una bomba de alimentación, su flujo se regula de manera que la cantidad que ingresa al caldero sea igual a la cantidad de vapor producido más el flujo de agua de purga. Para esto, el sistema de alimentación debe estar provisto de un control de flujo para mantener un nivel de agua en el interior del caldero. El caudal de agua debe satisfacer e incluso superar la máxima demanda de vapor que pueda producirse aún en condiciones emergentes.

La presión de diseño de la bomba de agua de alimentación será ligeramente superior a la máxima presión de vapor que podría alcanzar el caldero en condiciones extremas. En otras palabras, será superior a la presión de relevo de las válvulas de seguridad y del disparo automático del caldero por alta presión de vapor. Una de las condiciones imprescindibles en la operación de calderas, es

mantener en forma constante el nivel de agua durante los periodos de arranque, producción de vapor, parada hasta cuando el caldero se enfríe.

Con el nivel de agua en el caldero se debe garantizar la protección de las superficies de transferencia de calor.

Los visores de nivel se montan en la parte frontal del cuerpo cilíndrico de la caldera, de forma que puedan verse desde el suelo y en una posición tal que el tubo de vidrio quede lleno hasta la mitad cuando el nivel de agua sea el correcto.

La parte superior del visor se comunica con la cámara de vapor y la inferior con agua líquida.

Un indicador de nivel de agua puede ir provisto además de un dispositivo para corte o disparo del caldero por nivel demasiado bajo. Un funcionamiento básico consiste en el desplazamiento de flotadores suspendidos de dos palancas; el conjunto se halla en equilibrio estático cuando el nivel de agua es normal, permaneciendo cerrada la válvula de alarma. Al existir un alto o bajo nivel se rompe el equilibrio, la válvula se abre y escapa el vapor, lo cual hace funcionar el aparato de alarma.

### Temperatura

Para producir vapor económicamente, se necesita utilizar la máxima cantidad de calor a obtenerse a partir de un combustible. El calor que podría perderse en el

vapor por venteos o en los gases de la combustión que se pierden por la chimenea, se aprovecha para calentar el agua de alimentación de las calderas.

El calentamiento del agua de alimentación a las calderas ofrece las siguientes ventajas:

- Reduce las tensiones de las planchas y tubos de los calderos debido al menor choque térmico.
- Mayor utilización del calor del fluido de calentamiento que de otro modo se perdería.
- Purificación parcial del agua no tratada, por ejemplo con el uso de desgasificadores con vapor.
- Incremento en el rendimiento del caldero.

La economía debido al calentamiento del agua de alimentación se manifiesta en la disminución del consumo de combustible y en el aumento del rendimiento total de la instalación. La cantidad de combustible ahorrado en una caldera en la cual se utilizan las pérdidas de calor para calentar el agua de alimentación depende de las temperaturas inicial y final del agua de alimentación y del vapor producido.

El porcentaje de energía ahorrado al calentar el agua de alimentación aprovechando la energía calorífica del vapor o de los gases de combustión que se perdería, varía dependiendo de las condiciones de trabajo de la instalación.

### TRATAMIENTO DE AGUA

Un caldero es aprovechado eficientemente cuando se da un adecuado tratamiento al agua. Un caldero no cumplirá con su función en la planta si en las superficies de transferencia de calor existen depósitos o incrustaciones y se permite la presencia de elementos corrosivos.

El tratamiento del agua puede incluir el acondicionamiento de:

- Agua de reposición
- Condensados del vapor de proceso
- Agua del caldero.

Un apropiado acondicionamiento se obtendrá cuando:

- Se evite la formación de depósitos en las superficies internas
- Se controle la corrosión en las superficies internas
- No exista la formación de espuma y el arrastre de los sólidos presentes en el agua del caldero.

Las pérdidas de vapor en los procesos de purga y venteos son reemplazadas con agua de reposición.

El agua de alimentación en el caldero se evapora y los sólidos se concentran en el interior del mismo. Si la concentración de estos sólidos excede ciertos límites, la calidad del vapor se verá afectada por arrastre de los mismos. Además, los

sólidos presentes en el agua del caldero pueden adherirse a las superficies internas como depósitos o lodos. La concentración de sólidos en el agua del caldero puede ser controlada por remoción de una parte de ella en forma continua o en forma intermitente; esta remoción del agua del caldero se llama purga.

El agua nunca está presente en forma pura. Todas las aguas naturales contienen cantidades de materia disuelta y suspendida. Se puede expresar en términos de iones descritos en la tabla 4.1, o como dureza.

Cualquiera de los cationes puede combinarse con cualquiera de los aniones para producir una sal o sustancia diferente.

**Tabla 4.1 Principales iones contenidos en el agua.**

Anión	Símbolo	Catión	Símbolo
Hidróxido-Oxidrilo	OH	Hidrógeno	H <sup>+</sup>
Cloruro	Cl	Sodio	Na <sup>+</sup>
Bicarbonato	HCO <sub>3</sub>	Calcio	Ca <sup>++</sup>
Carbonato	CO <sub>3</sub>	Magnesio	Mg <sup>++</sup>
Sulfato	SO <sub>4</sub>	Aluminio	Al <sup>+++</sup>
Nitrato	NO <sub>3</sub>	Ferroso	Fe <sup>++</sup>
Fosfato	PO <sub>3</sub>	Férrico	Fe <sup>+++</sup>

(Ref. 4)

Las impurezas del agua de alimentación se describen en la tabla 4.2

Hay que considerar el pH que tenga el agua; comprendiéndose por pH a la medida que expresa la concentración del ion hidrógeno (H<sup>+</sup>) en el agua, su rango

varía de 1 a 14; es ácida una solución cuando varía entre 1 a 6, neutra cuando es 7 y alcalina cuando la solución presente contiene un pH de 8 a 14.

**Tabla 4.2 Impurezas del agua de alimentación**

Nombre	Fórmula	Efecto que causa
Carbonato de calcio	CaCO <sub>3</sub>	Incrustación
Bicarbonato de calcio	Ca (HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Incrustación
Sulfato de calcio	CaSO <sub>4</sub>	Incrustación
Cloruro de calcio	CaCl <sub>2</sub>	Corrosión
Sulfato de magnesio	MgSO <sub>4</sub>	Incrustación y corrosión
Bicarbonato de magnesio	Mg (HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Incrustación y corrosión
Cloruro de magnesio	Mg Cl <sub>2</sub>	Corrosión
Hidróxido de magnesio	Mg (OH) <sub>2</sub>	Incrustación
Nitrato de magnesio	NO <sub>3</sub> Mg	Corrosión
Cloruro de sodio	NaCl	Electrólisis
Carbonato de sodio	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	Alcalinidad
Óxido de Carbono	CO <sub>2</sub>	Corrosión
Bicarbonato de sodio	Na (HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Espuma
Hidróxido de sodio	NaOH	Fragilidad cáustica
Sulfato de sodio	NaSO <sub>4</sub>	Incrustación
Óxido de silicio	SiO <sub>2</sub>	Incrustación

(Ref. 4)

#### 4.1.1 Tipos

La selección del equipo y del tratamiento del agua de alimentación debe realizarse luego de un análisis de la composición del agua, cantidad requerida del agua de reposición, tipo de caldero, presión de operación.

Los diferentes tipo de tratamientos a los que se somete el agua del caldero son:

- Tratamiento externo
- Tratamiento interno

#### 4.1.1a Tratamiento externo.

En aguas superficiales se encuentra generalmente materia orgánica, la cual debe ser removida previamente. Los sólidos suspendidos son aquellos que no se disuelven en el agua. Sólidos disueltos son aquellos que están en solución, entre los más comunes podemos citar: sílice, hierro, calcio, magnesio y sodio.

Entre los principales tratamientos externos tenemos:

- a) Filtración
- b) Sedimentación
- c) Floculación
- d) Desaireación
- e) Ablandamiento
- f) Desalcalización
- g) Desmineralización
- h) Procesos de cal sodada (en frío y en caliente)
- i) Destilación
- j) Tratamiento de los condensados
- k) Sistema electromagnético

(Ref. 5)

#### 4.1.1b Tratamiento interno

Es aquel que se realiza en la caldera mientras ésta se encuentra en proceso de producción de vapor. Es un tratamiento químico consistente en precipitar los constituyentes de la dureza y/o intercambiar la dureza por iones "no duros" en un proceso llamado intercambio iónico.

Las incrustaciones ocurren cuando los compuestos de calcio y magnesio en el agua (aguas duras) se precipitan y se adhieren a las superficies internas. Las incrustaciones producen una disminución en el intercambio de calor y sobrecalentamiento de los tubos, seguido por fallas y daños del equipo. Estos compuestos son menos solubles cuando se incrementa la temperatura. Los depósitos porosos ayudan a concentrar más los sólidos; esta concentración particularmente con presencia de álcalis fuertes, ocasionará una severa corrosión en las superficies de los tubos.

Los posibles tratamientos químicos se describen en la tabla 4.3.

**Tabla 4.3 Tabla de tratamientos Internos**

Compuesto químico	Aplicación
Fosfato de sodio	Para prevenir incrustaciones
Hidróxido de sodio	Para prevenir incrustaciones y para minimizar la corrosión
Polímeros	Para prevenir incrustaciones y para minimizar la corrosión
Tánicos/Almidón	Para acondicionar lodos
Hidrazina/Sulfito de sodio	Para remover oxígeno
Antiespumantes	Para prevenir arrastre y espumeo
Aminas neutralizantes	Para neutralizar CO <sub>2</sub>

(Ref. 4)

#### 4.1.1.c Purgas

El caldero recibe el agua de alimentación que está constituida por una proporción variable de agua condensada recuperada, denominada agua de retorno y de agua nueva, más o menos depurada, llamada agua de reposición.

El agua de alimentación se transforma en vapor que se escapa de la zona de vaporización hacia el exterior. Se puede considerar que este vapor está constituido por moléculas de agua pura. En realidad contiene muchas gotitas de agua y gases, especialmente gas carbónico debido a la descomposición de los carbonatos, y a presiones elevadas, transporta sales volatilizantes por arrastre en el vapor, cloruros y sílice por ejemplo.

El agua que se mantiene líquida en la parte interior de la caldera, se concentra de todas las sustancias extrañas que contenía el agua que ha sido vaporizada (a excepción de las que han sido arrastradas con el vapor).

Las impurezas se concentran, por lo tanto, cada vez más en la fase líquida se efectúa una desconcentración sistemática, denominada "purga", vertiendo al drenaje una parte del agua de la caldera. En el siguiente esquema se explica el procedimiento de alimentación de agua al caldero y el de las purgas.

Si una caldera trabaja en régimen continuo, y si para simplificar la explicación admitimos que la salinidad que arrastra con el vapor es despreciable, se alcanzará el equilibrio estable cuando el peso de las sales extraídas con las

purgas sea igual al peso de las sales introducidas con el agua de reposición (puesto que el agua condensada de retorno se supone pura), se tendrá por lo tanto en el equilibrio.

$$Q_1 \times C_1 = Q \times C_2$$

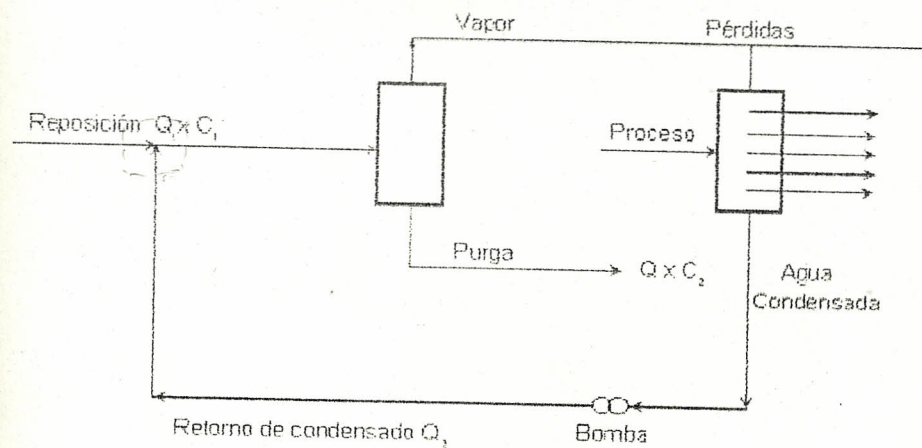
donde :

$Q_1$  = Caudal de agua de reposición

$Q$  = Caudal del agua de purga

$C_1$  = Concentración de sales en la reposición

$C_2$  = Concentración en la caldera



Ciclo del agua en un sistema de generación de vapor

#### 4.1.2.a Tipos

Existen dos tipos principales de purga del agua de la caldera, purga manual intermitente y continua.

### Purga manual intermitente.

Es necesaria para controlar puntualmente la concentración de sólidos en el agua, o cuando la purga continua no ha sido instalada. Consiste en abrir la válvula de extracción de fondo o de superficie realizándose de forma periódica de acuerdo con el programa de operación y/o el control de los análisis químicos.

La purga o extracción de agua se realiza para eliminar sólidos suspendidos o espuma presente, o para eliminar los sólidos asentados en le fondo; se pierde o desperdicia una cierta cantidad de calor (agua calentada). En los casos en que el agua de alimentación es excepcionalmente pura, como agua producida en evaporadores o con un alto porcentaje de retorno de condensado, la purga puede ser usada con menor frecuencia.

### Purga continua

Se efectúa una eliminación continua de las sales presentes en la caldera ofreciendo varias ventajas en comparación a la manual.

- Permite mantener bajo control permanente las concentraciones, así como la magnitud de las impurezas que se desee extraer.
- Hay un ahorro de energía con la instalación de equipos para recuperar su calor, cuando la presión del vapor es baja o cuando su calor se pueda aprovechar en un calentamiento del agua de alimentación.

## 4.2 Cálculo y Dimensionamiento del sistema del agua de alimentación.

En todo sistema de generación de vapor, es necesario que el agua se suministre, de acuerdo a los requerimientos que tenga la planta. El sistema de alimentación está conformado principalmente por:

- Tanque de alimentación y condensado al mismo tiempo
- Equipo de bombeo
- Válvula de regulación del agua de alimentación (calderas grandes)
- Dispositivos de control
- Desaireadores (eventualmente)

### 4.2.1 Dimensionamiento del tanque de alimentación

El sistema de generación de vapor depende del tamaño del tanque de alimentación ya que este debe contener suficiente cantidad de agua para sostener la evaporación de la caldera, por lo menos durante 20 minutos; requiriéndose para ello una evaporización de agua a 212°F a vapor a 212°F o en otros términos equivale a evaporar 0.069 galones americanos por minuto o 0.261 litros por minuto para un caballo caldera.

En nuestro caso el tanque de alimentación será también de condensado, obteniéndose una elevación de temperatura del agua de reposición evitando de esta manera, problemas de dilatación, contracciones y choques térmicos que se producirían si la misma fuera inyectada a la temperatura ambiente o

relativamente fría, compensándose las pérdidas suscitadas en el sistema. Por tanto:

$R_{\min}$  = Reserva mínima del tanque

$$R_{\min} = 200 \text{ C.C.} \times 0.261 \text{ lit/min C.C.} \times 20 \text{ min} = 1044 \text{ litros.}$$

Es recomendable que el tanque de alimentación no sobrepase el 70% de la capacidad del tanque, de tal manera que:

$$C_{\text{tanque}} = R_{\min} / 0.7$$

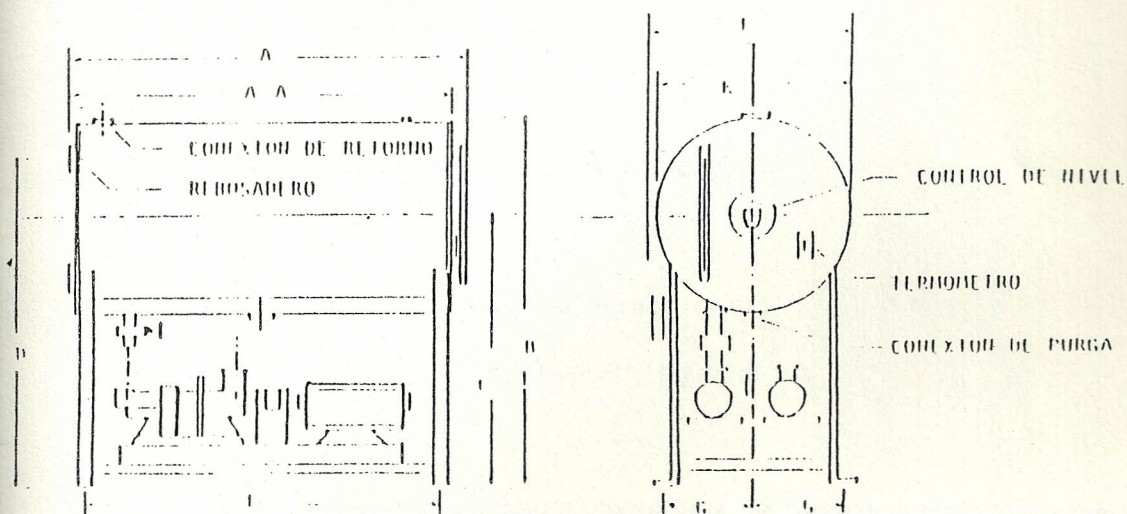
$$C = 1044 / 0.7 = 1491.428 \text{ litros o } 454.565 \text{ galones.}$$

Con este valor buscamos la capacidad del tanque de almacenamiento dadas por la Cleaver Brooks (tabla 4.4), seleccionamos la más adecuada; en nuestro caso 500 galones.

**Tabla 4.4 Capacidad del tanque de almacenamiento de agua.**

Capacidad del tanque	Código	B	C	E	F	G	H	J	K	M	N
	Galones	20	35	60	100	180	250	350	500	750	1000
Tamaño del tanque	K	16	18	22	27	30	36	42	42	48	48
	AA	27	35	39	73	64	64	64	88	100	130
A		39	43	48	50	71	71	71	95	107	137
B		38	40	50	78	78	78	77	78	85	85
C		29	30	48	64	62	59	55	56	60	80
D		35	37	55	74	73	74	72	73	80	80
E		34	34	34	34	56	56	56	78	90	90
T		42	42	45	44	37	43	48	48	54	54
V		1	2	2	3	4	4	4	4	4	4
G		17	17	18	18	15	18	20	20	23	23

Figura 4.1 Dimensiones tanque agua de alimentación



#### 4.2.2 Cálculo y selección de la bomba.

Al seleccionar una bomba debemos conocer las condiciones en que va a operar, si es en forma continua o intermitente, depende básicamente del tipo de caldera y tamaño. Como la caldera seleccionada es una pirotubular la cual esta provista de un flotador que acciona un interruptor que enciende o apaga la bomba de forma intermitente, dependiendo de la demanda de vapor, variará el flujo de agua proveniente del tanque de alimentación. La tubería de descarga de la bomba debe dirigirse directamente a la caldera sin restricciones o controles de flujo.

Por seguridad la temperatura debe ser  $20^{\circ}\text{C}$  menor que la temperatura del agua de alimentación, esto es tomando en cuenta la presión existente en el tanque de alimentación, ya que a temperaturas superiores ocasionan problemas de cavilación.

Temperatura de bombeo recomendada es de 70°C, empleando las tablas de vapor se obtiene la presión y viscosidad:

Presión agua alimentación a 70°C = 4.519 lb/plg<sup>2</sup>

Peso específico a 70°C = 0.978

Viscosidad dinámica = 222 x 10<sup>-6</sup> lb/ pie sg

Viscosidad cinemática = 4.4. x 10<sup>-6</sup> pies<sup>2</sup> / sg

La capacidad, presión de descarga, carga neta de succión positiva depende de los parámetros antes mencionados. Se recomienda el empleo de una bomba tipo turbina. Las bombas centrífugas se las emplea en operaciones continuas de alimentación. Las bombas siempre se las selecciona con un exceso de capacidad de agua evaporada.

Los fabricantes de bombas para la Cleaver Brooks recomiendan el valor de la capacidad de acuerdo al tipo de bomba seleccionada:

- Bomba de turbina      1.5 a 2.0 la capacidad de evaporación.
- Bomba centrífuga      1.10 a 1.15 la capacidad de evaporación.

Como se selecciono una tipo turbina elijo el 2.0 de exceso de agua evaporada, requiriendose 0.069 GPM o 0.261 lit/min

$C_{bmb}$  = Capacidad de bombeo

$C_{bmb} = 200 \text{ C.C} \times 0.069 \text{ GPM} / \text{C.C.} \times 2 = 27.6 \text{ GPM.}$

En la selección de bombas de la Cleaver Brooks tenemos que para una capacidad de 200 C.C. con una presión de descarga de 150 lb/plg<sup>2</sup> la capacidad es de 28.25 GPM.

#### 4.2.2.1 Condiciones de succión

1.- Se debe especificar primeramente el tipo de succión: de elevación o de carga. El diagrama del sistema de alimentación (pág. 89), observamos que existe una diferencia positiva de elevación entre el nivel líquido de succión y la línea de centro de la bomba es la *carga estática de succión*, el nivel del líquido de succión está por arriba de la línea de centro de la bomba.

2.- Nunca debe de reducirse la presión del líquido a la de vaporización, ya que conlleva a problemas de cavitación que afecta a la capacidad, eficiencia y presión que podría producir perforaciones en las paletas del impulsor.

Para el cálculo de la carga neta se succión positiva (NPSH), que es la altura total absoluta de succión en centímetros o en pies corregida al eje del impulsor, menos la presión de vapor del líquido en centímetros o en pies absolutos. Nos indica si el agua se vaporizará o no en el punto de menor presión de la bomba.

$$\text{NPSH} = \frac{(P_1 - P_v) 2.31}{\text{sp.gr.}} + Z_1 - (H_{fs} - H_i)$$

donde:

$P_1$  = Presión de succión (atmosférica Guayaquil) + 14.69 lb / plg<sup>2</sup> abs

$P_v$  = Presión de vapor a 70°C = 4.439 lb / plg<sup>2</sup> abs

sp.gr. = Peso específico a 70°C = 0.978

$Z_1$  = Altura de succión (pies)

$H_{fs}$  = Fricción en la succión

$H_i$  = Pérdidas a la entrada

Para 28.25 GPM. y tuberías de 2 pulgadas de diámetro en la tabla 4.5

tenemos:

$H_{fs} = 2.87$  (pies/100 pies)  $\times Z_1 + h$  accesorios =  $2.87 Z_1 / 100 + 0.99$

$H_i = 0.072$  pies

La diferencia de altura entre el nivel mínimo del tanque de agua de alimentación con respecto al centro de la bomba es de:

$Z_1 = 2.92$  pies (35 pulg)

Reemplazando valores obtengo:

$$NSPH = \frac{(14.69 - 4.439) 2.31 + 2.92 - (2.87 \times 2.92 / 100 + 0.99 + 0.072)}{0.978}$$

$NSPH = 28.2782$  pies

Para saber si este valor es el adecuado recurrimos a las gráficas dadas por los fabricantes de bombas (figura 4.2); es de 28.28 pies para una capacidad de 28.5 GPM. En la tabla 4.5 se dan las pérdidas por fricción en tuberías de acero Schedule 40 para agua.

**Datos de la bomba elegida.**

Marca	TACO PUMP
Modelo	2006
Tamaño	2 X 6
Diámetro mínimo del impeler	3 - 6 plg.
Eficiencia	41%
R.P.M	1750

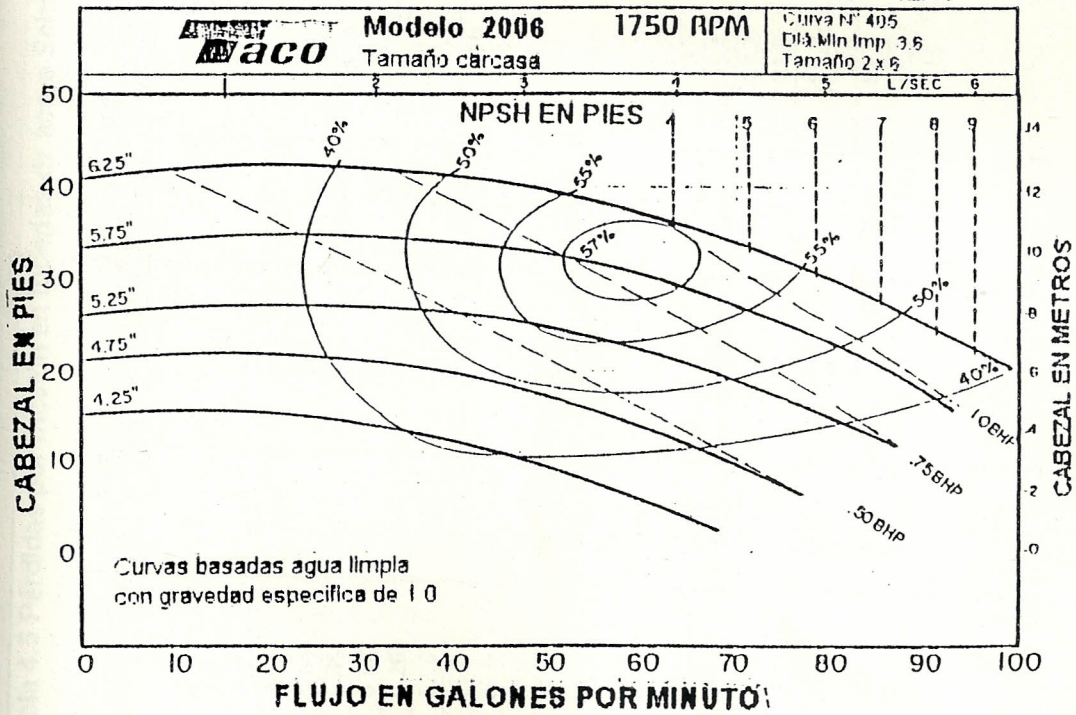


Fig. 4.2 Bomba modelo 2006

Tabla 4.5 Pérdidas por fricción en tuberías de acero Schedule 40 para agua

G.P.M	1 plg.		1 1/4 plg.		1 1/2 plg.		2 plg.		2,25 plg.	
	V (pies/sg)	hf (pies/100pies)	V (pies/sg)	hf (pies/100pies)	V (pies/sg)	hf (pies/100pies)	V (pies/sg)	hf (pies/100pies)	V (pies/sg)	hf (pies/100pies)
4	1,48	1,29								
5	1,86	1,93								
6	2,23	2,68	1,29	0,7						
7	2,6	3,56	1,5	0,93						
8	2,97	4,54	1,72	1,18	1,26	0,56				
9	3,34	5,65	1,83	1,46	1,42	0,69				
10	3,71	6,86	2,15	1,77	1,58	0,83				
12	4,45	9,26	2,57	2,48	1,89	1,16				
14	5,2	12,8	3	3,28	2,21	1,53				
16	5,94	16,5	3,43	4,2	2,52	1,96				
18	6,68	20,6	3,86	5,22	2,84	2,42				
20	7,42	25,1	4,29	6,34	3,15	2,94				
25	9,29	37,4	5,37	9,66	3,94	4,5	2,39	1,29		
30	11,1	54,6	6,44	13,6	4,73	6,26	2,87	1,82		
35	13	73,3	7,52	18,5	5,52	8,38	3,35	2,42	2,35	1
40	14,8	95	8,58	23,5	6,3	10,8	3,82	3,1	2,68	1,287
45	16,7	119	9,66	29,5	7,1	13,5	4,3	3,85	3,02	1,6
50	18,6	146	10,7	36	7,88	16,4	4,78	4,67	3,35	1,94
60	22,3	209	12,9	51	9,46	23,2	5,74	6,59	4,02	2,72
70	26	283	15	68,8	11	31,3	6,69	8,86	4,69	3,63
80			17,2	89,2	12,6	40,5	7,65	11,4	5,36	4,66
90			19,3	112	14,2	51	8,6	14,2	6,03	5,82
100			21,5	138	15,8	62,2	9,56	17,4	6,7	7,11
120			25,7	197	18,8	88,3	11,5	24,7	8,04	10
140					22,1	119	13,4	33,2	9,38	13,5
160							15,3	43	10,7	17,4
180									12,1	21,9
200									13,4	26,7
220									14,7	32,2
240									16,1	38,1
(ref. 8)										

#### 4.2.2.2 Condiciones de descarga.

La presión de la bomba alimentadora siempre debe ser mayor que la máxima presión de trabajo de la caldera, esto es debido a las pérdidas presentes por fricción y diferencia de altura entre el nivel de agua en la caldera y la localización de la bomba, pérdidas que deben ser superadas por la bomba.

Para calcular la presión desarrollada por la bomba, en pies, empleamos la ecuación de Bernulli:

$$TDH = \frac{(P_2 - P_1) 2.31}{sp.gr.} + Z_2 + Hts + Htd$$

donde:

TDH = Altura total dinámica de descarga

$P_1$  = Presión de succión = Presión atmosférica

$P_2$  = Presión máxima a desarrollar por la bomba

$Z_2$  = Altura del nivel de abastecimiento de agua en la caldera = 1.25 pies

Hts = Pérdidas de succión = 0.862 pies

Htd = Pérdidas de descarga = 0.077 pies

$$TDH = \frac{150 \times 2.31}{0.978} + 1.25 + 0.862 + 0.077$$

$$TDH = 356.4834 \text{ pies}$$

#### 4.2.2.3 Calculo de la potencia

La potencia desarrollada por la bomba es la potencia entregada al eje de la bomba, expresado por:

$$BHP = \frac{Q \times TDH \times sp.gr.}{3960 \times \text{efic.}}$$

$$\text{BHP} = \frac{28.25 \times 356.4834 \times 0.978}{3960 \times 0.43} = 5.784 \text{ hp}$$

El motor recomendado será de 6 hp o el inmediato superior disponible en el mercado.

#### 4.2.3 Cálculo y dimensionamiento de la tubería del agua de alimentación.

La tubería de alimentación tiene gran importancia ya que es la que conduce el fluido a la caldera. Consta de tuberías de aspiración y de impulsión (descarga), debiéndose tomar en cuenta los siguientes puntos de referencia:

a.- Las tuberías tanto de aspiración como de descarga deben ser iguales o de diámetro mayor, que el de la bomba nunca menor. Esto es para evitar pérdidas por fricción.

b.- En lo posible, se evitarán curvas de cambio brusco por que las mismas elevan la resistencia al paso del fluido, aumentando las pérdidas.

c.- Donde hagan los sistemas de control del fluido, transformarlo a la longitud respectiva en tubería (ver esquema 4.2.4).

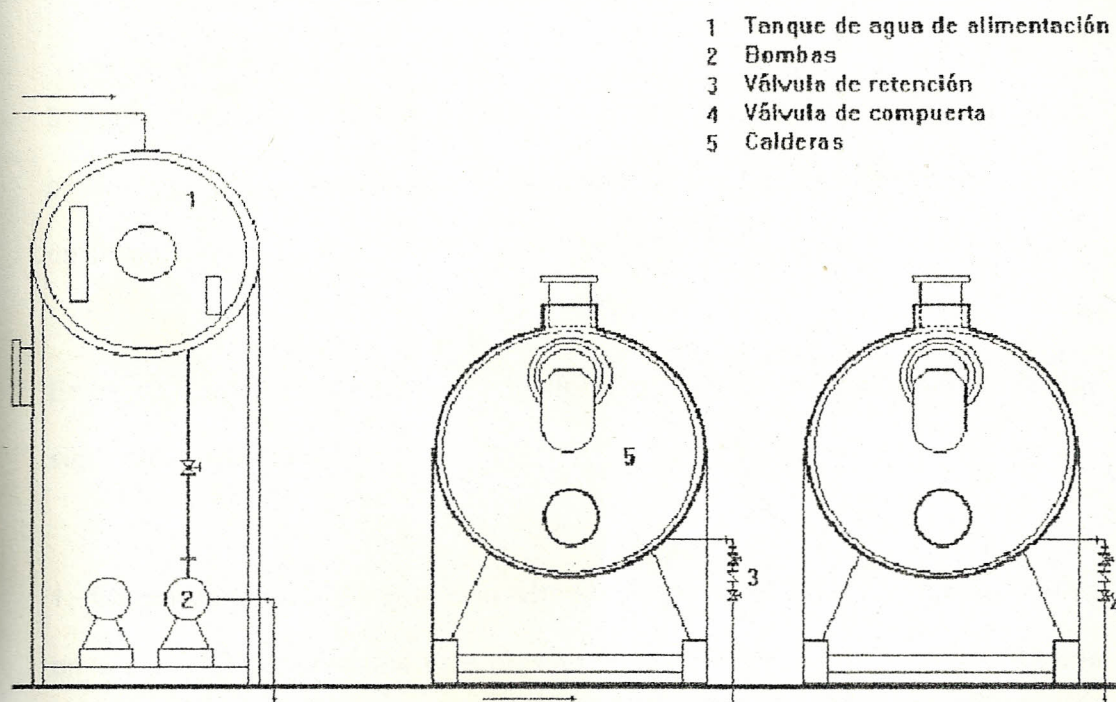
Para la tubería de aspiración se recomienda que sea lo más corta posible, en lo posible eludir la posición horizontal, esto es para prevenir la formación de bolsas de aire. Debido a los costos, el diámetro de salida será igual al de succión 2 pulgadas.

de aire. Debido a los costos, el diámetro de salida será igual al de succión 2 pulgadas.

En la de impulsión se colocarán una válvula de retención y una de compuerta, lo cual evita la circulación en sentido inverso y sirve para cebar y arrancar la bomba cuando se pare para inspección o reparación.

La Cleaver Brooks recomienda que la altura manométrica no pase de 30 metros (98.43pies). De igual forma la tubería de descarga tendrá el mismo diámetro de salida 2 pulgadas.

#### 4.2.4 Esquema del sistema de agua de alimentación



#### 4.3 Cálculo y dimensionamiento de la tubería de vapor y retorno de condensado

La planta de asfalto, para bajar los costos de producción, debe tener un sistema eficiente de retorno de condensado, y evitar pérdidas por radiación, convección libre y natural en la tubería de conducción del vapor. Por tanto, el vapor empleado debe tener las siguientes condiciones:

- 1.- El vapor generado será saturado, ya que el proceso y equipos de control de temperatura y presión están diseñados para el empleo de esta calidad de vapor.
- 2.- El sistema debe ser estable y confiable para los diferentes requerimientos que puedan ocurrir en el transcurso de la producción.
- 3.- Las cantidades de aire y humedad presentes en el vapor sean los más bajas posibles; ya que el aire disminuye su temperatura y la humedad disminuye el valor calorífico.

En el diseño de la tubería de distribución de vapor se debe cumplir con los siguientes requisitos:

- 1.- Dependiendo del diámetro de la tubería, un caudal alto provoca un incremento en la caída de presión; una baja presión requiere un mayor diámetro de tubería provocando un aumento en el volumen específico.

2.- Velocidades altas de vapor provoca ruidos y erosiona con más facilidad en codos o cambios de dirección, por lo que se recomienda velocidades de hasta 50 m/sg. en la línea principal y de 20 m/sg., o menos, en los tramos secundarios.

3.- La tubería a ser utilizada en nuestro sistema es la recomendada por la Cleaver Brooks y las normas ASTM es del tipo acero al carbono tipo 53-A Schedule 40 que, como se observa en los anexos, resiste hasta 570 lb/plg<sup>2</sup>.

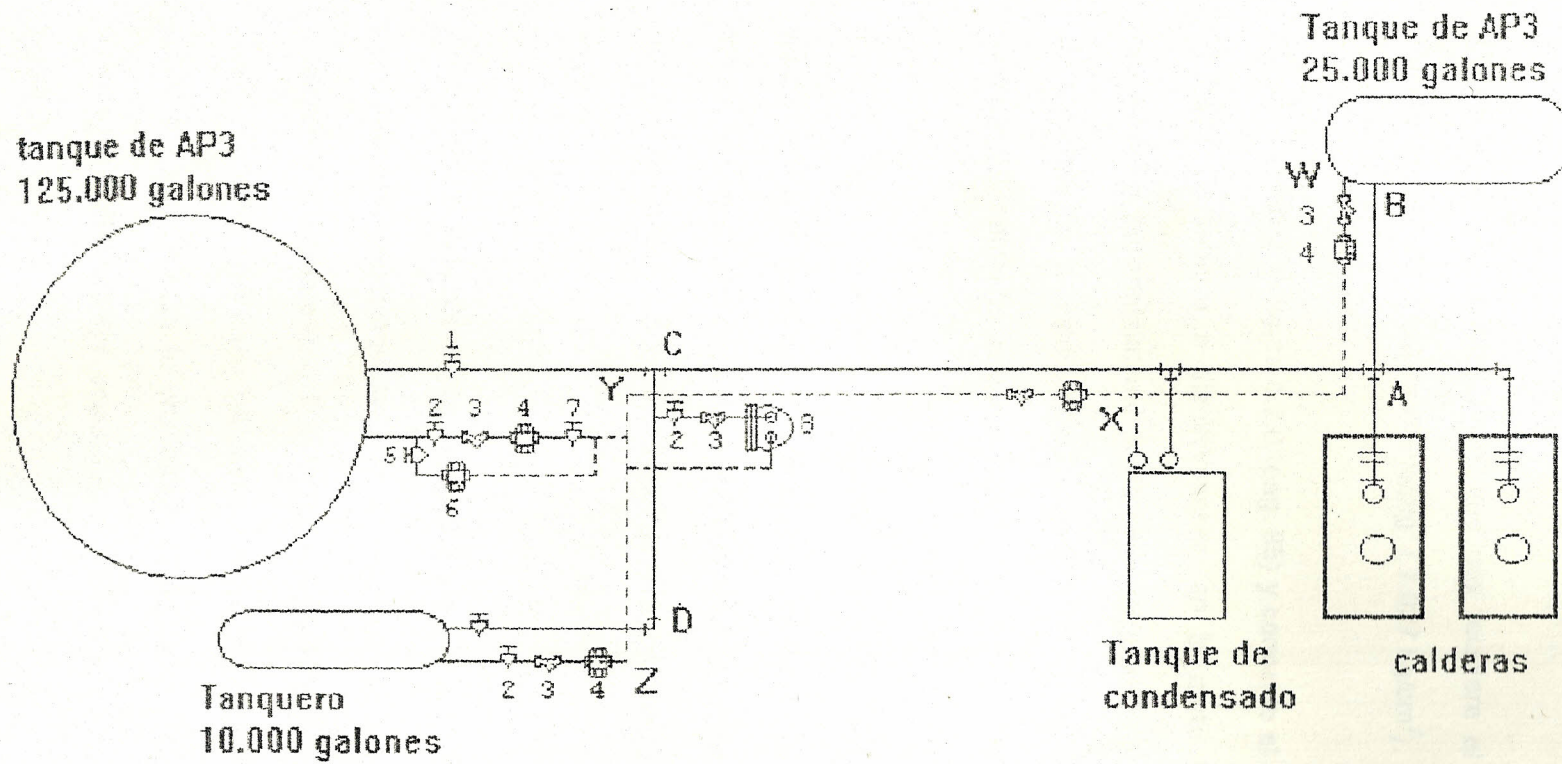
En la figura 4.2.5 se muestra el circuito de distribución de vapor en la planta de hormigón asfáltico.

#### **4.3.1 Cálculo del dimensionamiento de tuberías de vapor y determinación de la caída de presión.**

El propósito de un correcto dimensionamiento de las tuberías de vapor, en cada uno de los tramos, así como en la línea principal, es que no se produzcan caídas de presión y temperaturas en exceso. Los cálculos se realizarán usando diagramas experimentales que sirven para dimensionar las calderas de relativa poca magnitud. Los parámetros requeridos son:

- a.- Caudal másico (lb/h, kg/h)
- b.- Presión de vapor (lb/plg<sup>2</sup>), se tomará la presión al comienzo de cada tramo, el cual no debe sobrepasar los 100 metros, para evitar caídas de presión excesivas.
- c.- Se considera como longitud total, la tubería horizontal más la equivalente a válvulas, codos, conexiones, etc.

#### 4.2.5 Esquema del circuito de tuberías de vapor y condensado en la instalación



- 1 Válvula de entrega de vapor
- 2 Válvula de by-pass (desvío)
- 3 Filtro
- 4 Trampa de vapor principal
- 5 Válvula de retención para la entrada de la trampa de vapor de reserva
- 6 Trampa de vapor de reserva
- 7 Válvula de retención de la descarga
- 8 Trampa de flotador y termostática

Línea de vapor —————  
 Línea de condensado - - - - -

#### 4.3.1.1 Cálculo de las tuberías de vapor.

Debemos seguir algunos pasos que nos facilitara el cálculo. El vapor en nuestra instalación circula a  $100 \text{ lb/plg}^2$  ( $7.027 \text{ kg/cm}^2$ ).

Paso 1.- Usando la figura 4.2.6 (pág. 95) y conocido el caudal que circula por el tramo de tubería a dimensionarse, en la parte inferior izquierda nos desplazamos horizontalmente hasta interceptar la línea de presión ( $7 \text{ kg/cm}^2$ ) correspondiente a este caudal (kg/h). Para otras presiones se deberá multiplicar por el factor de corrección.

Paso 2.- En este punto ascendemos verticalmente hasta la parte superior del diagrama en donde se deberá leer el diámetro de la tubería correspondiente a la velocidad media recomendada (m/s) ubicada en la parte superior derecha. Si este estuviera entre dos líneas se deberá escoger el diámetro inmediato superior.

Paso 3.- Seguidamente empleando la figura 4.2.7 (pág. 96), con el caudal en la parte inferior ascendemos hasta interceptar la línea inclinada correspondiente al tamaño de tubería escogida anteriormente, a la derecha leemos la caída de presión en  $\text{kg/cm}^2$  por cada 100 metros de tubería. A la tubería recta debemos añadir el valor equivalente encontrado debido a accesorios, válvulas y otros sistemas de control. Por seguridad se recomienda tomar un 10% más de longitud.

Paso 4- Si la suma de caídas de presión en cada uno de los tramos resulta superior a la máxima permitida, se deberá rehacer los cálculos a base de velocidades inferiores, obteniéndose diámetros mayores en la tubería.

El circuito esta compuesto por 3 tramos que a continuación se describen:

- Tramo A - B
- Tramo A - C
- Tramo C - D

**Tramo A - B.** Es la tubería secundaria.

$$Q = 1660 \text{ kg/h} \quad P_e = 7 \text{ kg/cm}^2$$

$$V_p = 20 \text{ m/s} \quad L = 10 \text{ m}$$

Se obtiene

$$\text{diámetro } \varnothing = 3 \text{ "}$$

$$\Delta P = 0.2 \text{ kg/cm}^2 \text{ por cada } 100 \text{ metros de tubería}$$

$$\text{Presión final del tramo} = 7 \text{ kg/cm}^2 - \frac{0.2 \text{ kg/cm}^2 \times 10 \text{ m} \times 1.1}{100 \text{ m}}$$

$$P_f = 6.978 \text{ kg/cm}^2$$

**Tramo A - C.** Es considerada como tubería principal.

$$Q_c = 4370 \text{ kg/h} \quad P_e = 6.978 \text{ kg/cm}^2$$

$$V_p = 40 \text{ m/s} \quad L = 15 \text{ m}$$

Se obtiene

diámetro  $\varnothing = 3.0$  "

$\Delta P = 1.1 \text{ kg/cm}^2$  por cada 100 metros de tubería

Presión final del tramo =  $6.78 \text{ kg/cm}^2 - \frac{1.1 \text{ kg/cm}^2 \times 15 \text{ m} \times 1.1}{100 \text{ m}}$

$P_t = 6.795 \text{ kg/cm}^2$

Tramo C - D. Es considerada como tubería secundaria.

$Q = 675 \text{ Kg/h}$        $P_e = 6.795 \text{ kg/cm}^2$

$V_p = 20 \text{ m/s}$        $L = 18 \text{ m}$

Se obtiene

diámetro  $\varnothing = 1.5$  "

$\Delta P = 1.2 \text{ kg/cm}^2$  por cada 100 metros de tubería

Presión final del tramo =  $6.795 \text{ kg/cm}^2 - \frac{1.2 \text{ kg/cm}^2 \times 18 \text{ m} \times 1.1}{100 \text{ m}}$

$P_t = 6.5589 \text{ kg/cm}^2$

La caída de presión total de todo el sistema se representa en la siguiente tabla

4.6.

**Tabla 4.6 Caída de presión de vapor en el sistema.**

Tramo	Longitud (m)	Caudal (kg/h)	Tamaño (pulg.)	Resistencia x 100 m	Total
A - B	10	1660	3.0	0.2	0.02
A - C	15	4360	3.0	1.1	0.165
C - D	18	675	1.5	1.2	0.216
					0.401
				10 % extra por curvas y válvulas	0.0401
				Total pérdidas	0.4411

Las caídas de presión resultante son aceptables debido a que las presiones requeridas por los equipos son menores que las resultantes al final de los diferentes tramos del sistema.

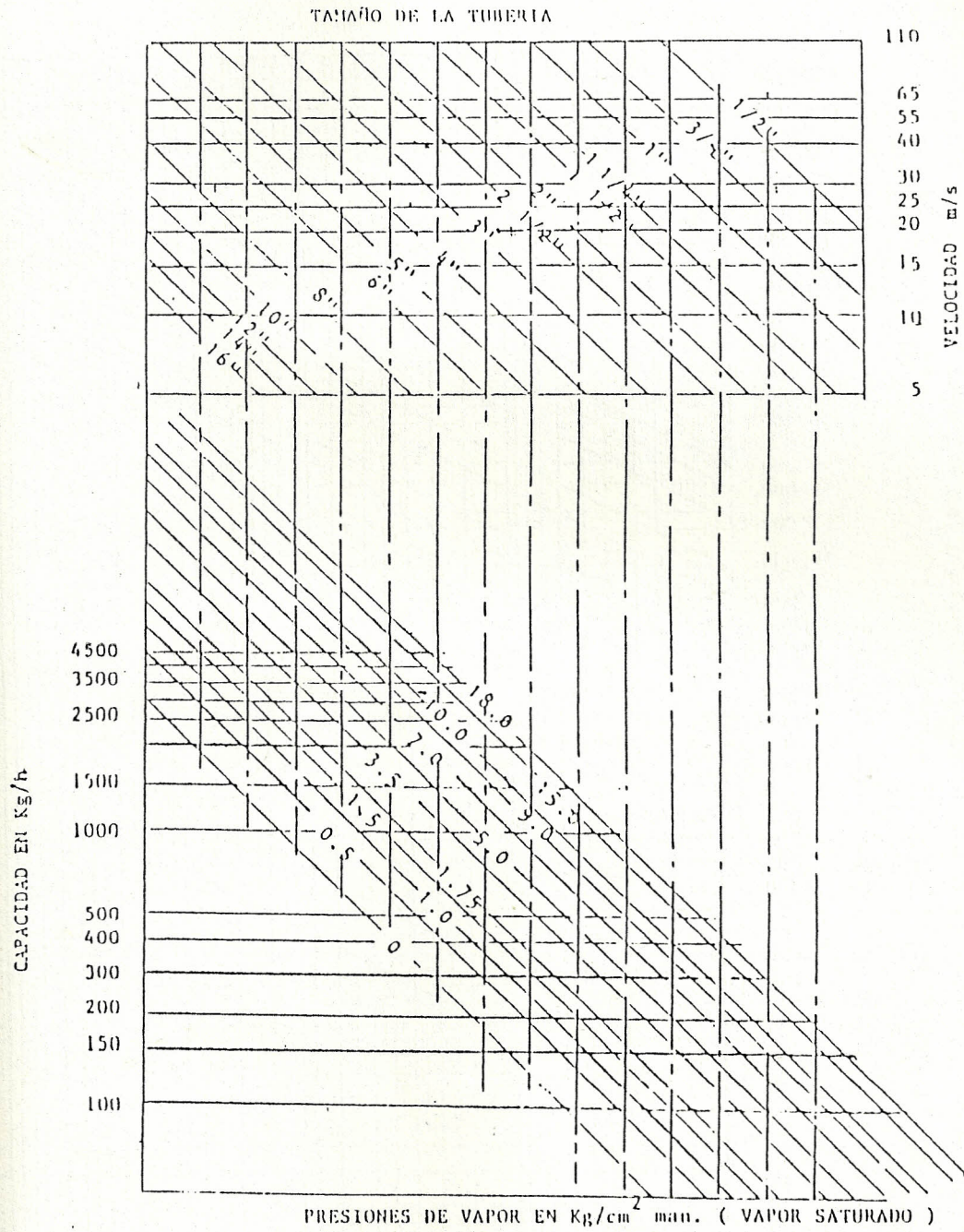
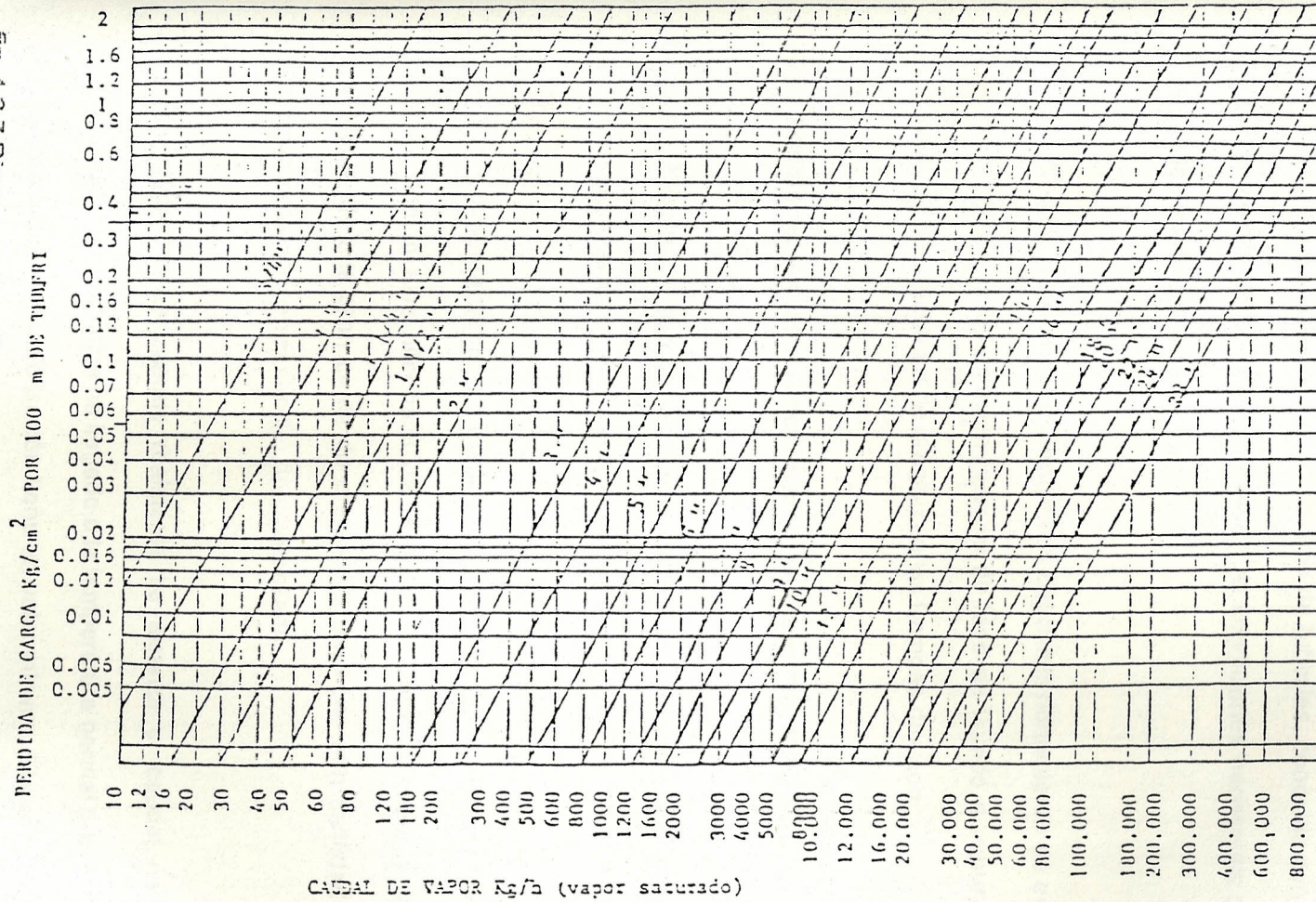


fig. 4.2.6 Diagrama para dimensionar tuberías de vapor.

PARA OTRAS PRESIONES USAR EL FACTOR DE CORRECCION

Fig. 4.2.7 Diagrama para dimensionar tuberías de vapor.  
 PERDIDA DE CARGA EN m POR 100 m POR  $\text{kg/cm}^2$



$\text{kg/cm}^2$	FACTOR
0	6.9
0.14	6.0
0.35	5.2
0.7	4.3
1	3.6
1.5	3.0
2	2.4
3	1.9
4	1.6
5	1.4
6	1.2
7	1
8	0.90
9	0.85
10	0.70
12	0.64
14	0.55
15	0.51
17	0.47
21	0.38
25	0.34
28	0.29
35	0.23
42	0.19

#### 4.3.1.2 Condiciones de diseño para el circuito de retorno de condensado.

Una vez que el vapor ha cedido el calor requerido en el proceso, retorna en forma de condensado, por un sistema de tuberías, conocido con el nombre de *sistema de retorno de condensado*. Las condiciones necesarias para el diseño de la tubería del sistema son:

1.- Uno de los principales problemas del dimensionamiento de esta tubería es el efecto de revaporización (cambio de fase de líquido a vapor), debido a la reducción instantánea de presión en las trampas de vapor.

Los siguientes criterios nos ayudarán a hacer los cálculos.

a.- Puesta en marcha. Período durante el cual el aire y el condensado son descargados a través de las trampas de vapor.

b.- Pre calentamiento. La trampa descarga una gran cantidad de condensado frío, debido a la diferencia de temperatura entre el vapor y la instalación. Habiendo una gran caída de presión se ocasiona una cantidad pequeña de revaporización en el circuito de condensado.

c.- Régimen. Es cuando realmente se alcanza el caudal operativo de la caldera. La instalación ha llegado a la temperatura normal máxima de trabajo, y la velocidad de condensación tiene un valor mínimo. El condensado tiene una

temperatura próxima a la del vapor, obteniéndose revaporizado. Para período de puesta de marcha, se recomienda el doble del caudal de régimen.

2.- La revaporización ocasionada por un volumen bastante mayor de vapor respecto al de agua produce presiones excesivas provocando un deterioro de la tubería de retorno de condensado. Se recomienda una velocidad de 25 m/sg (4922 pies/min), para este tipo de instalación.

3.- Caídas de presión elevadas originan una reducción de la capacidad de descarga en las trampas de vapor, es mayor en la puesta en marcha cuando el condensado es máximo y la presión es mínima. La Cleaver Brooks recomienda una caída de presión máxima entre 0.05 a 0.1 kg/cm<sup>2</sup> por cada 100 metros de trayecto. En la fig. 4.2.5 se describe la trayectoria de retorno de condensado.

#### **4.3.1.3 Cálculo del diámetro de las tuberías de retorno de condensado y determinación de la caída de presión.**

Se requieren varios parámetros para un correcto dimensionamiento de la tubería de retorno de condensado estos son:

- Carga de condensado (kg/h)
- Presión de vapor (lb/plg<sup>2</sup>)
- Presión de tubería de retorno (lb/plg<sup>2</sup>abs)
- Velocidad permisible en la tubería de retorno (pies/min), la recomendada por la Cleaver Brooks es de 5000 pies/min ó 25 m/sg

- Una cierta pendiente para permitir que el condensado fluya por gravedad esto es entre 1 a 2% por cada metro lineal de tubería.

Procedimiento de cálculo.

a.- Debemos encontrar la velocidad en el sistema por cada 100 lb/h que es igual a :  $V_{sist} = \text{Velocidad permisible (pies/min)} \times 100 / \text{carga de condensado (lb/h)}$

b.- Empleando la figura 4.2.8 (pág. 103) a presión de vapor y retorno encontramos el factor de escala.

c.- Con la velocidad obtenida en el literal a., se divide éste para el factor de escala y su resultado es el valor de la velocidad final pies/min por cada 100 lb/h.

d.- Con la velocidad final hallada entramos a la figura 4.2.8 para encontrar el punto de intersección con el dato de presión de vapor, leyéndose el diámetro de la tubería.

e.- Para obtener la caída de presión empleamos la figura 4.2.9 (pág. 104) y con el caudal de puesta en marcha, el diámetro obtenido en el literal anterior, obtenemos la caída de presión por cada 100 metros de tubería.

El esquema de retorno de condensado consta de 3 tramos (figura 4.2.5) y son los siguientes:

Tramo Z - Y

Tramo Y - X

Tramo W - X

Tramo Z - Y

$$V_p = 5000 \text{ pies/min}$$

$$Q_t = 675 \text{ kg/h} \times 2 = 1350 \text{ kg/h (2970 lb/h)}$$

$$p_v = 100 \text{ lb/plg}^2$$

$$p_{tc} = 15 \text{ lb/plg}^2$$

$$L = 18 \text{ m}$$

Se obtiene:

$$V = \frac{5000 \text{ pies/min} \times 100}{2970 \text{ lb/h}} = 168.3501 \text{ pies/min por cada } 100 \text{ lb/h}$$

En la figura 4.2.8

$$\text{Factor de escala} = 0.37$$

$$V_{\text{final}} = 168.3501/0.37 = 455.00 \text{ pies/min por cada } 100 \text{ lb/h}$$

En la figura 4.2.8 se determina el diámetro correspondiente; escojo el de mayor diámetro

$$\varnothing = 1.5 \text{ pulgada}$$

Utilizando la figura 4.2.9 obtengo la caída de presión

$$\Delta P = 3.2 \text{ kg/cm}^2 \text{ por cada } 100 \text{ metros de tubería}$$

**Tramo Y-X**

$$V_p = 5000 \text{ pies/min}$$

$$Q_t = 5035 \text{ kg/h} \times 2 = 10070 \text{ (22154 lb/h)}$$

$$p_v = 100 \text{ lb/plg}^2$$

$$p_{tc} = 15 \text{ lb/plg}^2$$

$$L = 13 \text{ m}$$

Se obtiene:

$$V = \frac{5000 \text{ pies/min} \times 100}{22154 \text{ lb/h}} = 22.5699 \text{ pies/min por cada } 100 \text{ lb/h}$$

En la figura 4.2.8

$$\text{Factor de escala} = 0.37$$

$$V_{\text{final}} = 22.5699/0.37 = 60.998 \text{ pies/min por cada } 100 \text{ lb/h}$$

En la figura 4.2.9 se determina el diámetro correspondiente

$$\varnothing = 5 \text{ pulgada}$$

Utilizando la figura 4.29 obtengo la caída de presión

$$\Delta P = 0.0018 \text{ kg/cm}^2 \text{ por cada } 100 \text{ metros de tubería.}$$

**Tramo W-X**

$$V_p = 5000 \text{ pies/min}$$

$$Q_t = 1660 \text{ kg/h} \times 2 = 3320 \text{ kg/h (7304 lb/h)}$$

$$p_v = 100 \text{ lb/plg}^2$$

$$p_{tc} = 15 \text{ lb/plg}^2$$

$$L = 15 \text{ m}$$

Se obtiene:

$$V = \frac{5000 \text{ pies/min} \times 100}{7304 \text{ lb/h}} = 68.4556 \text{ pies/min por cada } 100 \text{ lb/h}$$

En la figura 4.2.8

$$\text{Factor de escala} = 0.37$$

$$V_{\text{final}} = 68.4556 / 0.37 = 185.0152 \text{ pies/min por cada } 100 \text{ lb/h}$$

En la figura 4.2.8 se determina el diámetro correspondiente escojo el de mayor diámetro

$$\varnothing = 2.5 \text{ pulgada}$$

Utilizando la figura 4.2.9 obtenga la caída de presión

$$\Delta P = 0.00035 \text{ kg/cm}^2 \text{ por cada } 100 \text{ metros de tubería.}$$

**Tabla 4.7 Caída de presión en la tubería de condensado en el sistema.**

Tramo	Longitud (m)	Caudal (kg/h)	Tamaño (pulg.)	Resistencia x 100 m	Total
Z - Y	18	1350	1.5	0.015	0.0027
Y - X	13	10070	5	0.0018	0.000234
X - W	15	3320	2.5	0.0028	0.000525
					0.003459
		10 % extra por curvas y válvulas			0.0003459
			Total pérdidas		0.003805

El resultado obtenido es aceptable considerando la distancia total (30 metros) de retorno de condensado.

Para otras tuberías multiplicar la velocidad de tubería de 3 pulgadas por:

FACTOR	0.98	0.37	0.25	0.15	0.0095
TAMANO DE LA TUBERIA	4	5	6	8	10

Cuando se descarga a una presión mayor que la atmosférica multiplicar la velocidad por el factor correspondiente para la presión de suministro y descarga

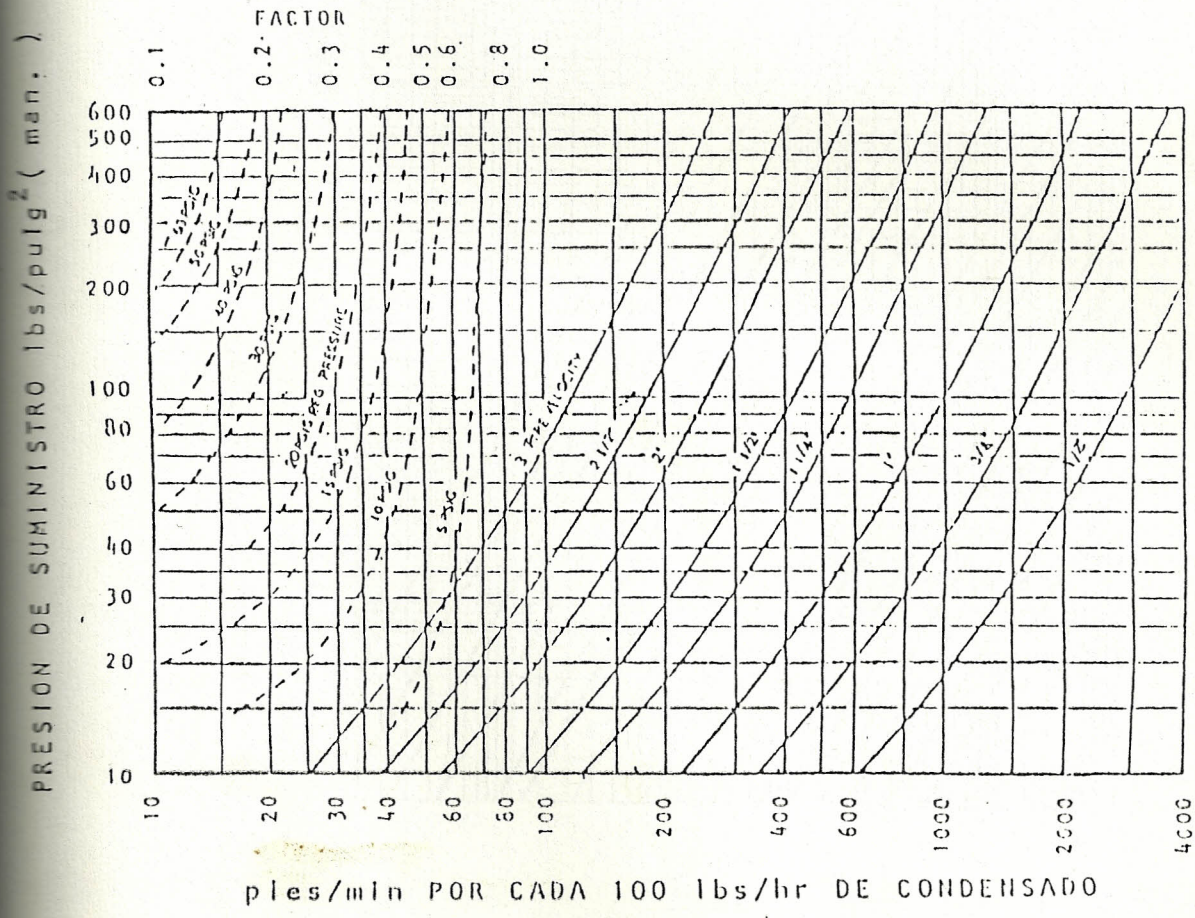


fig. 4.2.8 Diagrama para dimensionar tuberías de retorno de condensado.

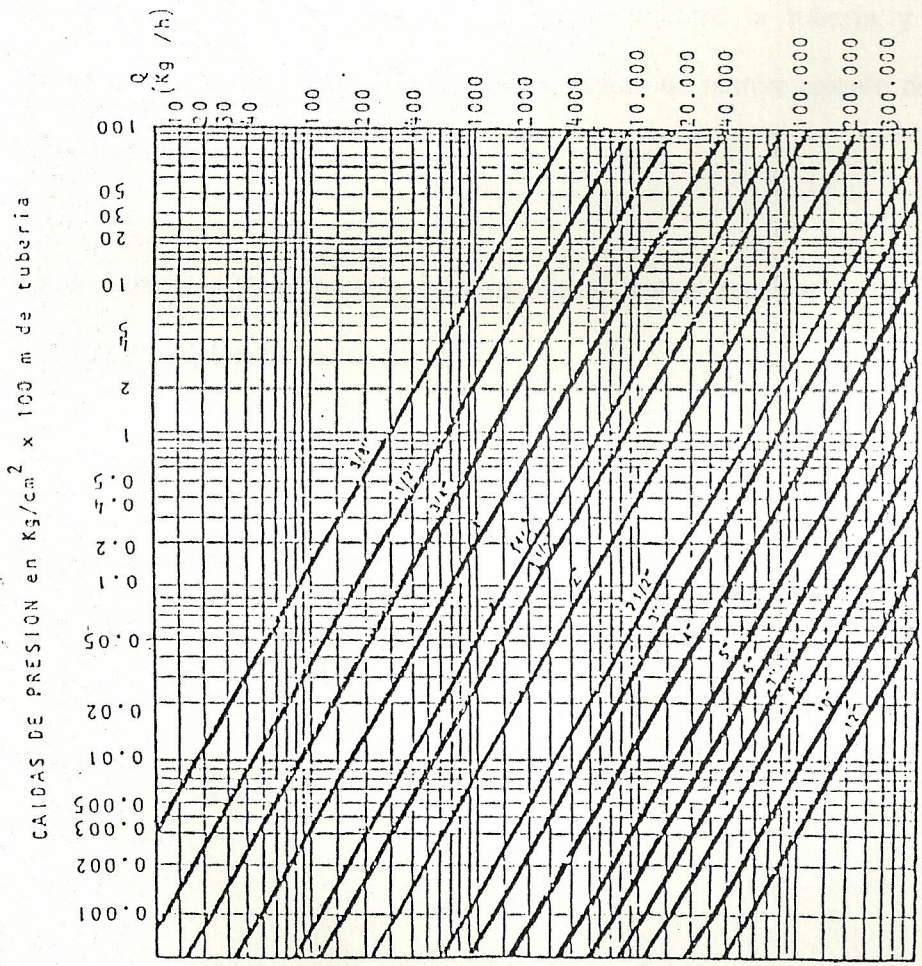


DIAGRAMA caudal vs. caída de presión

fig. 4.2.9 Diagrama para dimensionar tuberías de retorno de condensado.

#### 4.3.2 Selección del aislamiento y selección de espesores.

Las tuberías del sistema de distribución y condensado son de acero Schedule 40A, tienen la propiedad de conducir el calor a través de sus paredes el cual será disipado al medio ambiente a menos que se aisle con materiales térmicos resistentes al calor que impedirán el contacto entre la tubería y el medio ambiente; ahorrando costos de energía y costos de mantenimiento del sistema productor de vapor.

Estos materiales térmicos son los llamados aislantes térmicos de los cuales en el mercado existen de varios tipos:

- Asbesto en fibra, polvo papel (laminado, corrugado)
- Vidrio (lana, fibra, bloques)
- Silicatos de calcio hidratado "Kaylo"
- Magnesita 85 %
- Cerámicas y
- Polímeros.

Todos estos materiales reúnen las siguientes facilidades:

- Buenas características de aislante (alta resistencia a la transferencia de calor)
- Facilidad de instalación
- Durables
- No se quema y no le afecta la humedad del medio

- Son económicos
- Fáciles de obtener en el mercado.

El material a ser instalado en las tuberías de vapor y de retorno de condensado a ser utilizado en la instalación es lana de vidrio cuyas características se describen a continuación:

- Rango de trabajo                      500°F (260°C)
- Conductividad térmica                0.033
- Densidad específica                    4.25 lb/pie<sup>3</sup>

Para determinar los espesores óptimos, obteniendo costos bajos con el material, a continuación se describen en las siguientes tablas de valores de referencia en cuanto al diámetro de la tubería y temperatura admisible así como las pérdidas para cilindros en función de la diferencia de temperaturas entre la superficie y el aire.

**Tabla 4.8 Espesor del aislante (lana de vidrio)**

<b>Diámetro (plg)</b>	<b>Temperatura aislante (°F)</b>	<b>Espesor (plg)</b>
0.5	200	1
1	300	1.5
1.25	300	2
1.25	200	1
1.5	200	1.5
2	300	2

**Tabla 4.9 Coeficiente de pérdida superficial de calor para cilindros descubiertos**

Btu/h pie lineal (°F diferencia entre la tubería y el aire circundante)

Diámetro nominal tubería (plg)	Agua caliente				Vapor		
	120°F	150°F	180°F	210°F	5psig	50 psig	100 psig
	Diferencia de temperatura						
	50°F	80°F	110°F	140°F	157°F	230°F	268°F
0.5	0.46	0.50	0.55	0.58	0.61	0.71	0.76
0.5	0.56	0.61	0.67	0.72	0.75	0.87	0.93
1	0.68	0.74	0.82	0.88	0.92	1.07	1.15
1.5	0.85	0.92	1.01	1.09	1.14	1.32	1.43
1.5	0.9	1.04	1.15	1.23	1.29	1.49	1.63
2	1.18	1.28	1.41	1.51	1.38	1.84	1.99
2.5	1.40	1.53	1.68	1.80	1.88	2.19	2.36
3	1.68	1.83	2.01	2.15	2.26	2.63	2.84
3.5	1.90	2.06	2.22	2.43	2.55	2.97	3.22
4	2.12	2.30	2.53	2.72	2.85	3.32	3.59
5	2.58	2.80	3.08	3.30	3.47	4.05	4.39
6	3.04	3.29	3.63	3.89	4.07	4.77	5.16
8	3.38	4.22	4.64	4.96	5.21	6.10	6.61
10	4.76	5.18	5.68	6.09	6.41	7.49	8.12
12	5.59	6.07	5.67	7.15	7.5	8.80	9.53

(Ref 6)

#### 4.4 Trampas de vapor.

Las trampas de vapor o válvulas automáticas son dispositivos indispensables en todo sistema de vapor, permitiendo eliminar el condensado, aire y gases no

condensables, impidiendo a la vez las pérdidas de vapor en el sistema de vapor o equipos.

#### **4.4.1 Condiciones de diseño de las trampas de vapor.**

Para un óptimo diseño de las trampas de vapor se debe ubicar en los lugares más idoneos, seguidamente seleccionar la trampa en sí, para dimensionar las tuberías en las trampas de vapor.

##### **4.4.1.a Localización de la trampa de vapor.**

Las trampas se instalarán de acuerdo a:

- Deben colocarse debajo del equipo o tubería que se desee drenar.
- Al final de la tubería principal
- En puntos donde se pueda formar condensado
- Filtros antes de la trampa (protección que se pueda originar en la tubería)

##### **4.4.1.b Selección de la trampa a vapor**

Una vez que conocemos los lugares más adecuados para la instalación de las trampas debemos seleccionarlas de acuerdo a:

- Cantidad máxima de condensado
- Presión diferencial entre la entrada y la salida de la trampa

- Factor de seguridad
- Evacuación de gases no condensables
- Tipo de descarga.

#### 4.4.1.c Dimensionamiento de la tubería en los grupos de trampas de vapor.

- La tubería de entrada y salida de las trampas de vapor deben ser mayores o igual que las conexiones de las trampas.
- Si la tubería hasta y desde la trampa tiene más de 4 ó 5 pies de largo deben ser de un tamaño mayor que las trampas.

#### 4.4.2 Tipos de trampas de vapor.

Las diferentes trampas existentes en el mercado se las puede agrupar de la siguiente forma:

- Tipo termostática
  - De presión equilibrada
  - Para expansión líquida
  - Bimetálica
- Tipo mecánico
  - De flotador y termostática
  - De balde
    - Invertido
    - Abierto

- Tipo termodinámico
- Tipo impulso.

#### 4.4.3 Cálculo de la carga de condensado de las trampas.

Para el cálculo de la carga de condensado en las trampas de vapor debemos considerar los siguientes requisitos:

- Las temperaturas de salida de los diferentes equipos del sistema de vapor.
- El caudal de salida de los diferentes equipos
- Los calores latentes a la temperatura final (temperatura de salida de la trampa)
- El factor de seguridad recomendado por la Cleaver Brooks es de 2

$$C = \frac{w (t_2 - t_1) * 0.114 * 2}{L}$$

donde: w = caudal

$t_2$  = temperatura final °C

$t_1$  = temperatura inicial °C

L = calor latente

a.- A la salida del tanquero.

$$C = \frac{829 * (60 - 20) * 0.114 * 2}{4181.8} = 1.8079$$

b.- A la salida del tanque de RC-250.

$$C = \frac{1159 * (90 - 20) * 0.114 * 2}{4181.8} = 4.4233$$

c.- A la salida del tanque de almacenamiento.

$$C = \frac{1960 * (150 - 20) * 0.114 * 2}{4181.8} = 16.0294$$

d.- A la salida del tanque de uso diario.

$$C = \frac{3219 * (90 - 20) * 0.114 * 2}{4181.8} = 12.2854$$

#### 4.4.4 Selección de las trampas de vapor.

La selección más adecuada de los diferentes tipo de trampas de vapor se observa en la siguiente tabla 4.10

Tabla 4.10 Selección de trampas de vapor.

Aplicación	Alternativa preferible	Alternativa tolerable
Intercambiadores de calor		
Pequeños - alta presión	Termodinámica	Flotador y termostática
Grandes - Baja y media presión	Flotador y termostática	--
Recalentadores	Flotador y termostática	--
Trampas para drenar líneas principales de vapor		
0 - 15 psig	Flotador y termostática	--
16 - 125 psig	Termodinámica	Flotador y termostática
126 - 600 psig	Termodinámica	Balde invertido
Serpentines de tanques de almacenamiento	Expansión líquida	Termodinámica

#### 4.4.4 Cálculo y selección de juntas de expansión.

En todo sistema de vapor existen dilatación térmica (expansión y contracción), debida a la alta temperatura que lleva el vapor; las cuales sin no se las considera ocasiona daño en los diferentes dispositivos y equipos de la instalación. Para prevenir dicho efecto se recurre a las juntas de expansión.

##### 4.4.5.1 Cálculo de juntas de expansión

Para el cálculo de las juntas utilizaremos la figura 4.2.9 que relaciona la expansión térmica con la temperatura.

##### Línea de distribución de vapor:

##### Tramo A - C

Longitud = 15 m (49.215 pies)

$\phi = 3$  plg

T = 300 °F

Expansión según el gráfico 4.2.10 = 1.8 plg por cada 100 pies

Expansión total =  $1.80 \text{ plg} \times \frac{49.215 \text{ pies}}{100 \text{ pies}} = 0.8858 \text{ plg}$

##### Tramo C - D

Longitud = 18 m (59.058 pies)

$\phi = 3$  plg

T = 300 °F

Expansión según el gráfico 4.2.10 = 1.8 plg por cada 100 pies

$$\text{Expansión total} = 1.80 \text{ plg} \times \frac{59.058 \text{ pies}}{100 \text{ pies}} = 1.063 \text{ plg}$$

Tramo A - B

Longitud = 10 m (30.281 pies)

$$\phi = 3 \text{ plg}$$

$$T = 300 \text{ }^{\circ}\text{F}$$

Expansión según el gráfico 4.2.10 = 1.8 plg por cada 100 pies

$$\text{Expansión total} = 1.80 \text{ plg} \times \frac{30.281 \text{ pies}}{100 \text{ pies}} = 0.545 \text{ plg}$$

Línea de condensado

Tramo Z - Y

Longitud = 18 m (59.058 pies)

$$\phi = 1.5 \text{ plg}$$

$$T = 100 \text{ }^{\circ}\text{F}$$

Expansión según el gráfico 4.2.10 = 0.4 plg por cada 100 pies

$$\text{Expansión total} = 1.10 \text{ plg} \times \frac{59.058 \text{ pies}}{100 \text{ pies}} = 0.2362 \text{ plg}$$

Tramo Y - X

Longitud = 13 m (42.653 pies)

$$\phi = 5 \text{ plg}$$

$$T = 100 \text{ }^{\circ}\text{F}$$

Expansión según el gráfico 4.2.10 = 0.4 plg por cada 100 pies

$$\text{Expansión total} = 1.10 \text{ plg} \times \frac{42.653 \text{ pies}}{100 \text{ pies}} = 0.1706 \text{ plg}$$

Tramo W - X

Longitud = 15 m (49.215 pies)

$\phi = 2.5 \text{ plg}$

$T = 100 \text{ }^\circ\text{F}$

Expansión según el gráfico 4.2.10 = 0.4 plg por cada 100 pies

$$\text{Expansión total} = 1.10 \text{ plg} \times \frac{49.215 \text{ pies}}{100 \text{ pies}} = 0.19686 \text{ plg}$$

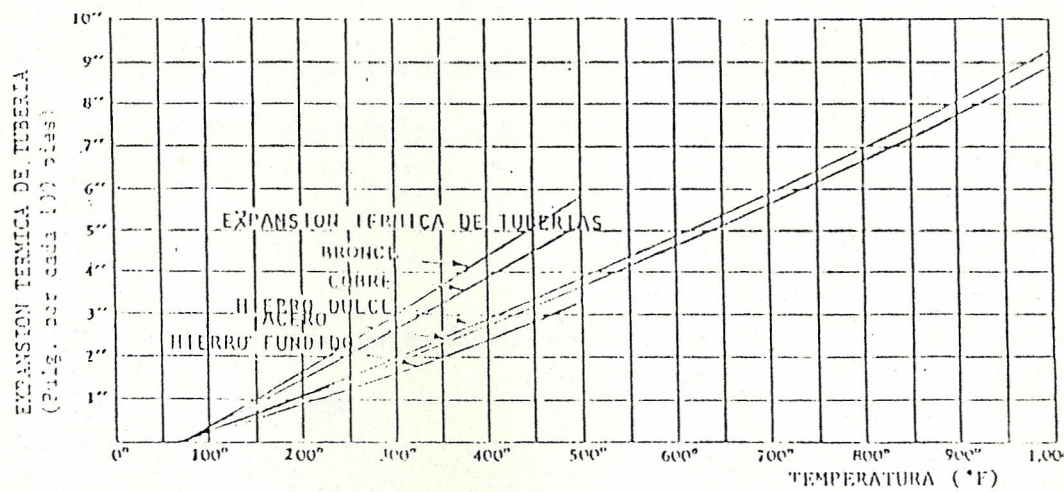


fig. 4.2.10 Expansión térmica de tuberías

#### 4.4.5.3 Selección de las juntas de expansión.

Para seleccionar el tipo de junta óptima a nuestros requerimientos, existen tres tipos de juntas de expansión:

- Tipo de dilatación con empaquetadura de relleno
- Tipo fuelle
- Tipo expansión de caucho

Para baja presión se recomienda el empleo de juntas de dilatación con empaquetadura de relleno. En los condensadores, tuberías de baja presión (hasta 25 psi), vacío, etc se sugiere el empleo de juntas de expansión de caucho.

Se seleccionara la junta de expansión tipo fuelle ya que se la puede usar tanto para altas y bajas temperatura como para elevadas presiones en la instalación de vapor.

En la tabla 4.11 se dan las dimensiones de las juntas respecto al tamaño de tubería y presiones.

#### 4.4.5.3 Factores para la selección de soportes de las tuberías de vapor.

Siempre se instalarán soportes, tirantes de varilla, para proteger la junta contra recorridos excesivos y para guiar exteriormente su movimiento.

Tabla 4.11 Dimensionamiento de las juntas de expansión

Tamaño del tubo	Series de presiones lb/plg man	Dimensionamiento de cara a cara			Movimientos laterales ** equivalentes a los axiales de		
		movimientos axiales de * 1 plg	2 plg	3 plg	1 plg	2 plg	3 plg
4	150	8,5	11	15,5	0,0625	0,25	0,5625
	300	12	17	24	0,125	0,5	1
	600	17,5	26,5		0,25	1	
	900	31,5			0,6875		
6	150	9,5	12	16,5	0,0625	0,1875	0,375
	300	13	18	25	0,09375	0,40625	0,9375
	600	18,5	27,5		0,21875	0,64375	
	900	33,5			0,5		
8	150	10,5	13	17,5	0,03125	0,1875	0,375
	300	14	19	26	0,09375	0,375	0,84375
	600	20	29		0,1875	0,75	
	900	35,5			0,46875		
10	150	10,5	13	17,5	0,03125	0,125	0,3125
	300	14	19	26	0,0625	0,3125	0,71875
	600	21,5	30,5		0,15625	0,625	
	900	37			0,375		
12	150	22,5	14	18,5	0,03125	0,125	0,25
	300	15	20	27	0,0625	0,25	0,59375
	600	21,5	30,5		0,125	0,5	
	900	38,5			0,3125		
14	100	12,5	15,5		0,03125	0,125	
	150	15	20		0,0625	0,21875	
	300	20,5			0,09375		
16	100	12,5	15,5		0,03125		
	150	15	20		0,03125	0,1875, 0,09375	
	300	20,5			0,09375		
18	100	13,5	16,5		0,03125	0,09375	
	150	16	21		0,03125	0,1875	
	300	21,5			0,09375		
20	100	14,5	16,5			0,09375	
	150	16	21		0,03125	0,1875	
	300	21,5			0,09375		
24	100	14,5	17,5			0,0625	
	150	17	22		0,03125	0,15625	
	300	22,5			0,0625		
30	100	9,5	12,5			0,0625	
	150	12	17		0,03125	0,125	
	300	19,5			0,0625		

Ref 7

\* Para extremos soldables añadense 4 pulgadas a la dimensión de cara a cara indicada

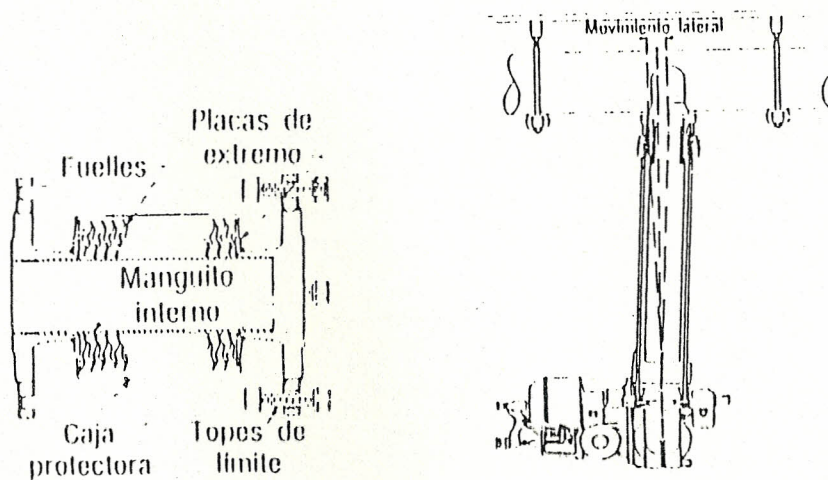
\*\* Consultese al fabricante respecto a la deformación axial y lateral combinada permisible

No hay un tipo de soporte definido para las diferentes aplicaciones en las que se emplean.

Se necesitan varias características según su funcionamiento. El código americano para tuberías ASA 31.1 indica que:

- a.- Un soporte apropiado para tuberías debe tener una base resistente y rígida sostenida en forma adecuada.
- b.- El soporte debe mantener la alineación en cualquier dirección.
- c.- Debe evitarse el rozamiento producido por el movimiento de la tubería en los soportes.

#### 4.6 Esquema.



Junta de expansión para tubería de vapor. Disposición de las juntas de expansión para gran deflexión

#### 4.7 Control del tratamiento del agua

En los diferentes tipos de tratamientos del agua para calderas analizados en la sección 4.1 los sulfatos y cloros presentes no se remueven, originando sales de sodio que si es elevada la concentración producirá espumeo que ocasiona daños como incrustaciones y recalentamiento del metal; por lo que se requiere purgas continuas con el respaldo de los diferentes análisis químicos de agua.

## CAPITULO V

### GRANULOMETRÍA DEL MATERIAL PÉTREO EMPLEADO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS

En la figura 5.1 se indican los 8 tipos de mezclas asfálticas "en caliente" recomendados por el Instituto de Asfalto de los Estados Unidos (Ref. 7). El tamaño máximo del agregado a emplearse varía desde 2 ½" para el tipo macadán hasta el número 4 para láminas asfálticas. Así mismo, en la figura 5.1, se indica la proporción de agregados grueso, fino y polvo mineral, recomendables en las zonas "críticas" e "intermedia", de la figura 5.1, deberá emplearse de la siguiente manera:

1) *Zona "crítica"*. El contenido de polvo mineral indicado en esta zona debe emplearse sólo cuando se tiene amplia experiencia con este tipo de mezclas y además, cuando se hayan realizado los correspondientes ensayos de laboratorio.

2) *Zona "intermedia"*. El contenido de polvo mineral indicado en esta zona, puede emplearse en mezclas destinadas a capas de rodamiento y de nivelación, así como en capas ligantes y de base.

En los cuadros 5.1 a 5.7, que indicamos a continuación, se da a conocer la composición granulométrica del agregado pétreo y los contenidos de asfalto para cada uno de los 8 tipos de mezclas asfálticas sugeridas por el Instituto de Asfalto de los Estados Unidos.

**CUADRO 5.1**  
**COMPOSICIÓN DE LA MEZCLA TIPO I**  
**( Tipo macadam )**

Mezcla N°	la
Uso recomendado	Base
Espesor compactado. Recomendado para capas individuales	3 " - 4 "
Tamices (abertura cuadrada)	Porcentaje que pasa Por peso
2 1/2"	100
1 1/2"	35 - 70
1"	-
3/4"	0 - 15
1/2"	-
3/8"	-
# 4	-
# 8	0 - 5
# 30	-
# 100	-
# 200	0 - 3

*Contenido normal de asfalto:* 3,0 - 4,5%, por peso total de la mezcla. El límite superior podrá aumentarse si se usa agregado absorbente.

Limitaciones de tránsito: Ninguna

Textura superficial: Muy abierta y porosa (necesita una capa superficial)

Agregado requerido: La piedra, grava o escoria que se emplee, debe ser dura, sana y fracturada.

Estabilidad: Buena

Flexibilidad: Excelente

**CUADRO 5.2**  
**COMPOSICIÓN DE LA MEZCLA TIPO II**  
**( Gradación fina )**

Mezcla N°	Ila	Ilb	Ilc	Ild	Ile
Uso recomendado	sello	sello o capa seuperficial	capa superficial o capa ligante	capa ligante o capa base	capa base
Espesor compactado. Recomendado para capas individuales	3/8" 3/4"	3/4" 1 1/2"	1" - 2"	1 1/2" - 3"	3" - 4"
Tamices (abertura cuadrada)	Porcentaje que pasa por peso				
1 1/2"					100
1"				100	70 - 100
3/4"			100	70 - 100	50 - 80
1/2"		100	70 - 100	-	-
3/8"	100	70 - 100	45 - 75	35 - 60	25 - 50
# 4	40 - 85	20 - 40	20 - 40	15 - 35	10 - 30
# 8	5 - 20	5 - 20	5 - 20	5 - 20	5 - 20
# 30	-	-	-	-	-
# 100	-	-	-	-	-
# 200	0 - 4	0 - 4	0 - 4	0 - 4	0 - 4

*Contenido normal de asfalto:* 3.0 - 6.0%, por peso total de la mezcla. El límite superior podrá aumentarse si se usa agregado absorbente.

Limitaciones de tránsito: Ninguna

Textura superficial: Abierta

Agregado requerido: La piedra, grava o escoria que se emplee, debe ser dura, sana y fracturada

**CUADRO 5.3**  
**COMPOSICIÓN DE LA MEZCLA TIPO III**  
**( Gradación gruesa )**

Mezcla N°	IIIa	IIIb	IIIc	IIId	IIIe
Uso recomendado	capa superficial	capa superficial de nivelación o capa ligante	capa ligante	capa ligante o capa base	capa base
Espesor compactado. Recomendado para capas individuales	3/4"  1 1/2"	1" - 2"	1" - 2"	1 1/2" - 3"	3" - 4"
Tamices (abertura cuadrada)	Porcentaje que pasa por peso				
1 1/2"				100	100
1"				100	75 - 100
3/4"		100	100	75 - 100	60 - 85
1/2"	100	75 - 100	75 - 100	-	-
3/8"	75 - 100	60 - 85	60 - 85	45 - 70	40 - 65
# 4	35 - 55	35 - 55	30 - 50	30 - 50	30 - 50
# 8	20 - 35	20 - 35	20 - 35	20 - 35	20 - 35
# 30	10 - 22	10 - 22	5 - 20	5 - 20	5 - 20
# 50	6 - 10	6 - 10	3 - 12	3 - 12	3 - 12
# 100	4 - 12	4 - 12	2 - 8	2 - 8	2 - 8
# 200	0 - 4	0 - 4	0 - 4	0 - 4	0 - 4

*Contenido normal de asfalto:* 3,0 - 6,0%, por peso total de la mezcla. El límite superior podrá aumentarse si se usa agregado absorbente.

Limitaciones de tránsito: Ninguna

Textura superficial: Abierta, mediana a gruesa

Agregado requerido: La piedra, grava o escoria que se emplee, debe ser dura, sana y fracturada

**CUADRO 5.4**  
**COMPOSICIÓN DE LA MEZCLA TIPO IV**  
**( Gradación gruesa )**

Mezcla N°	IVa	IVb	IVc	IVd
Uso recomendado	capa superficial	capa superficial	capa ligante	capa ligante o base
Espesor compactado. Recomendado para capas individuales	3/4" 1 1/2"	1" - 2"	1" - 1/2" 2 1/2"	2" - 3"
Tamices (abertura cuadrada)	Porcentaje que pasa por peso			
1 1/2"				100
1"			100	80 - 100
3/4"		100	80 - 100	70 - 90
1/2"	100	80 - 100	-	-
3/8"	80 - 100	70 - 90	60 - 80	55 - 75
# 4	55 - 75	50 - 70	48 - 65	45 - 62
# 8	35 - 50	35 - 50	35 - 50	35 - 50
# 30	18 - 29	18 - 29	19 - 30	19 - 30
# 50	13 - 23	13 - 23	13 - 23	13 - 23
# 100	8 - 16	8 - 16	7 - 15	7 - 15
# 200	4 - 10	4 - 10	0 - 8	0 - 8

*Contenido normal de asfalto:* 3,5 - 7,0%, por peso total de la mezcla. El límite superior podrá aumentarse si se usa agregado absorbente.

Limitaciones de tránsito: Ninguna

Textura superficial: Mediana a fina

Agregado requerido: La piedra, grava o escoria que se emplee, debe ser dura, sana y fracturada

**CUADRO 5.5**  
**COMPOSICIÓN DE LA MEZCLA TIPO V**  
**( Gradación fina )**

Mezcla N°	Va	Vb
Uso recomendado	capa superficial	capa superficial o de nivelación
Espesor compactado. Recomendado para capas individuales	3/4" - 1 1/2"	1" - 2"
Tamices (abertura cuadrada)	Porcentaje que pasa por peso	
3/4"	-	100
1/2"	100	85 - 100
3/8"	85 - 100	-
# 4	65 - 85	65 - 85
# 8	50 - 65	50 - 65
# 30	25 - 40	25 - 40
# 100	10 - 20	10 - 20
# 200	3 - 10	3 - 10

*Contenido normal de asfalto:* 4,0 - 7,5%, por peso total de la mezcla. El límite superior deberá aumentarse cuando se emplee agregados absorbentes.

#### Aplicaciones Sugeridas

**Capa superficial:** Generalmente usada en calles y carreteras, estacionamientos y campos deportivos. Muy empleada cuando el agregado grueso escasea o es muy costoso.

**Limitaciones tránsito:** Para tránsito muy pesado; las variaciones en los porcentajes de los materiales tienden a afectar sensiblemente las mezclas. Por lo tanto, se recomienda un gran control de laboratorio, antes de indicar la mezcla a usarse.

**Textura superficial:** Densa y arenosa

**CUADRO 5.6**  
**COMPOSICIÓN DE LA MEZCLA TIPO VI**  
**(Gradación fina)**

Mezcla N°	Via	Vlb
Uso recomendado	capa superficial	capa superficial o de nivelación
Espesor compactado. Recomendado para capas individuales	1" - 2"	1" - 2"
Tamices (abertura cuadrada)	Porcentaje que pasa por peso	
3/4"	-	100
1/2"	85 - 100	85 - 100
3/8"	-	-
# 4	65 - 85	65 - 85
# 8	50 - 70	47 - 68
# 30	35 - 60	30 - 55
# 50	25 - 48	20 - 40
# 100	15 - 30	10 - 25
# 200	6 - 12	3 - 8

*Contenido normal de asfalto:* 4,5 - 8,5%, por peso total de la mezcla. El límite superior podrá aumentarse si los agregados son absorbentes.

#### Aplicaciones Sugeridas

**Capa superficial:** Para calles, campos deportivos, canchas de tenis y pisos de fábricas. Es empleado en carreteras cuando el agregado grueso escasea o es muy costoso.

**Capa niveladora:** Comúnmente usada como capa niveladora

**Limitaciones tránsito:** Ninguna

**Textura superficial:** Densa y arenosa

**Agregado requerido:** Bien gradado. Se prefiere arenas moderadamente angulosas

**CUADRO 5.7**  
**COMPOSICIÓN DE LA MEZCLA TIPO VII**  
*(Lámina de arena)*

Mezcla N°	Vila
Uso recomendado	Capa superficial
Espesor compactado. Recomendado para capas individuales	1/2 " - 1 "
Tamices (abertura cuadrada)	Porcentaje que pasa Por peso
3/8"	100
# 4	85 - 100
# 8	80 - 95
# 16	70 - 89
# 30	50 - 80
# 50	30 - 60
# 100	10 - 35
# 200	4 - 14

*Contenido normal de asfalto: 7.0 - 11.0%, por peso total de la mezcla. El límite superior podrá aumentarse si los agregados son absorbente.*

Aplicaciones Sugeridas:

Textura superficial: Densa y arenosa

Agregado requerido: Bien graduado. Se prefiere que sea ligeramente anguloso.

**CUADRO 5.8**  
**COMPOSICIÓN DE LA MEZCLA TIPO VIII**

*(Lámina fina)*

Mezcla N°	Villa
Uso recomendado	Capa superficial
Espesor compactado. Recomendado para capas individuales	1/2 " - 1 "
Tamices (abertura cuadrada)	Porcentaje que pasa Por peso
3/8"	100
# 4	85 - 95
# 8	80 - 95
# 16	70 - 89
# 30	50 - 80
# 50	30 - 60
# 100	10 - 35
# 200	4 - 14

*Contenido normal de asfalto:* 7.0 - 11.0%, por peso total de la mezcla. El límite superior podrá aumentarse si los agregados son absorbente.

Aplicaciones Sugeridas:

Textura superficial: Densa y arenosa

Agregado requerido: Bien graduado. Se prefiere que sea ligeramente anguloso.

PROPORCION DE AGREGADOS PARA MUESTRAS ASFALTICAS

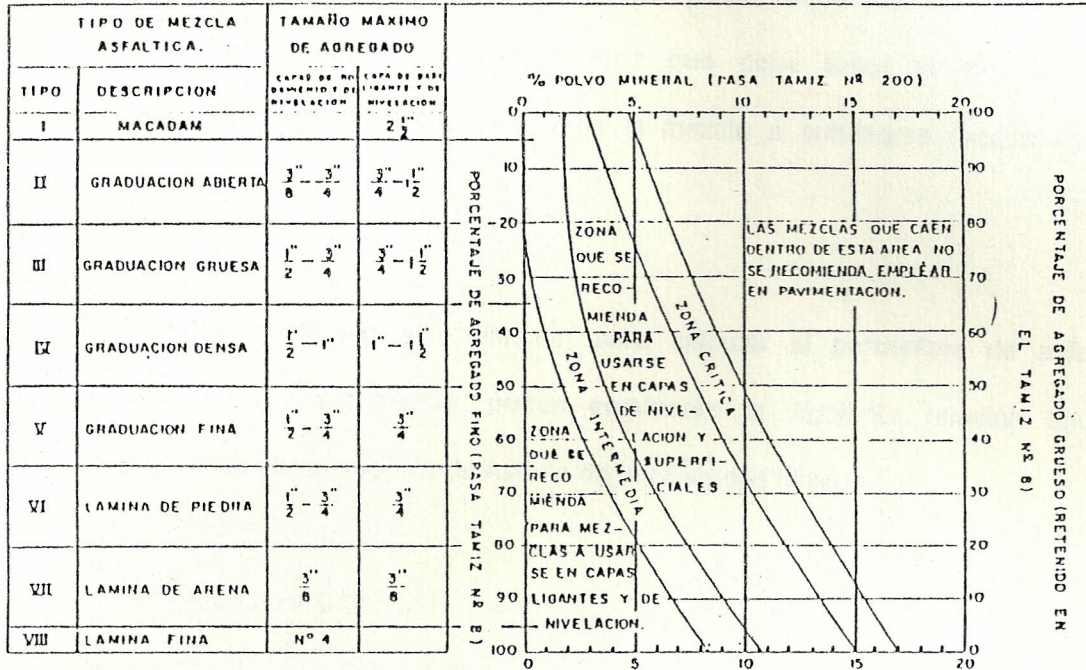


fig. 5.1

5.2 MEZCLAS ASFÁLTICAS

Una mezcla asfáltica se compone de material pétreo mezclado con asfalto. El material pétreo, comúnmente llamado "agregado", se clasifica en: agregado grueso, agregado fino, relleno mineral "filler" y polvo mineral.

5.2.1 Preparación de mezclas asfálticas

Al preparar una mezcla asfáltica, debe controlarse debidamente la granulometría del material pétreo y el porcentaje de asfalto a emplearse.

Es necesario que el material pétreo o "agregado", tenga una buena resistencia y éste bien gradado. La granulometría que debe tener el material pétreo dependerá del tipo de asfalto y de la mezcla a emplearse (véase fig.5.1 y cuadros 5.1 a 5.8).

Como una primera, aproximación para calcular el porcentaje de asfalto a utilizarse en una mezcla, puede emplearse la siguiente relación empírica propuesta por el Instituto de Asfalto de los Estados Unidos.

$$P = 0.035 a + 0.045 b +$$

0.15c, cuando 11 - 15% pasa el tamiz N°200	
0.18c, cuando 6-10% pasa el tamiz N° 200	+ F
0.20c, cuando 5%, o menos pasa el tamiz N° 200	

donde: P = Porcentaje de asfalto, por peso total de la mezcla

a = Porcentaje del agregado retenido en el tamiz N° 8

b = Porcentaje del agregado que pasa el tamiz N° 8 y queda retenido en el tamiz N° 200

c = Porcentaje del agregado que pasa el tamiz N° 200.

La fórmula anterior se basa en pesos específicos del agregado, comprendidos entre 2.60 y 2.70.

Para asfaltos líquidos del grado SC-2, el coeficiente "a" deberá reducirse a 0.02.

Para asfaltos líquidos más pesados, deberán usarse valores comprendidos entre 0.02 y 0.035, dependiendo de la cantidad de asfalto residual.

El valor F, agregado tipo filler, varía de 0.0% a 1.5% y ocasionalmente, llega hasta 2%, cuando el agregado es poroso. Generalmente el valor F, está comprendido entre 0.7% a 1.0%.

La fórmula dada a conocer anteriormente deberá usarse únicamente, cuando no haya posibilidad de contar con un equipo de laboratorio para determina la cantidad de asfalto a emplearse en el diseño de la mezcla.

#### 5.2.2 Pesos específicos de las mezclas asfálticas

*Peso Específico Masivo (Bulk), de mezclas asfálticas compactadas (Método AASHO Standar, Designación T-166)*

Las mezclas asfálticas cuyo *peso específico masivo* se quiere determinar, pueden ser moldeadas en laboratorio u obtenerse directamente de un pavimento. El diámetro y la longitud de las muestras deben ser no menores a cuatro veces el tamaño máximo del agregado empleado y su altura, por lo menos, una vez y media el tamaño del agregado.

Las muestras obtenidas directamente de un pavimento deben ser representativas de la mezcla empleada y no contener materias extrañas al

propio pavimento. Al hacer el ensayo, las muestras deben cubrirse con parafina derretida, a fin de tapar todos los poros o vacíos de la mezcla, luego dejar la muestra al aire 30 minutos antes de pesarla. La balanza que se emplee debe tener una sensibilidad no menor a 0.01% del peso de la muestra.

El *peso específico másico*, de la mezcla asfáltica, se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Peso específico másico de la mezcla asfáltica compactada} = \frac{A}{D - E - (D - A) / P_f}$$

donde: A = Peso al aire, de la muestra secada al horno

D = Peso al aire, de la muestra seca cubierta con parafina

E = Peso en agua, de la muestra seca cubierta con parafina

P<sub>f</sub> = Peso por unidad de volumen de la parafina, a 25° C (77° F)

### 5.2.3 Porcentaje de vacíos de una mezcla asfáltica compactada.

En una mezcla asfáltica, una parte de los vacíos o poros existentes entre las partículas del agregado mineral se llena de asfalto, quedando lleno de aire el resto de los vacíos. En un pavimento asfáltico, es importante que el porcentaje de vacíos llenos de aire se controle. Se ha comprobado que una mezcla asfáltica compactada se "ablanda" en un pavimento, tiene poca resistencia, si el porcentaje de vacíos de aire es inferior al 2%. En cambio si este porcentaje es superior al 6%, el pavimento se vuelve "quebradizo" y presenta mayor desgaste

bajo la acción del tránsito de los vehículos. Por tanto, el porcentaje de vacíos llenos de aire, en una mezcla asfáltica compactada, no debe ser menor del 2%, ni mayor al 6%.

#### 5.2.4 Estabilidad de las mezcla asfálticas

Para medir la estabilidad de las mezclas asfálticas o seas su resistencia al desplazamiento lateral se emplean generalmente los métodos Hubbard-Field, Marshall o Triaxial.

#### 5.3 Resumen

En el cuadro 5.9, damos a conocer los ensayos Hubbard Field, Marshall y Triaxial sugeridos por el Instituto de Asfalto de los Estados Unidos, para los ocho tipos de mezclas indicados en los cuadros 5.1 a 5.8, y en el cuadro 5.10, los valores límites mínimos y máximos de los ensayos a ejecutarse, que deben considerar para los diferentes tipos de mezclas, tomado en cuenta la clase de tránsito: pesado, mediano o ligero.

Cuadro 5.9

## Ensayos de laboratorio, sugeridos para el diseño de mezclas

Tipo de mezcla	Hubbard-Field (original)	Hubbard-Field (modificado)	Marshall	Hveem	Triaxial
I Macadam	x	x	x	x	x
II Tipo abierto	x	x	x	D	D
III Gradación gruesa	x	D	D	A	A
IV Gradación densa	x	A	A	A	A
V Gradación fina	x	A*	A	A	A
VI Lamina de piedra (Stone Sheet)	A	A*	A	A	A
VII Lámina fina (Fine Sheet)	A	A*	A	A	A

(Ref. 7)

CUADRO 5.10  
VALORES LIMITES SUGERIDOS PARA ENSAYOS A EFECTUARSE  
EN MEZCLAS ASFÁLTICAS (\*)

Método de diseño	Tránsito pesado y muy pesado		Tránsito mediano		Tránsito ligero	
	MÍN	MÁX	MÍN	MÁX	MÍN	MÁX
MARSHALL						
Número de golpes del martillo en cada extre- mo de la muestra	7 5		5 0		3 5	
Estabilidad en libras.	750	-----	500	-----	500	-----
Fluidez en unidades 0.01 pig (**)	8	16	8	18	8	20
Vacios en el total de la mezcla, %						
Capa superficial o de nivelación	3	5	3	5	3	5
Lámina de piedra o arena	3	8	3	8	3	8
Capa ligante o Base	3	8	3	8	3	8
% de vacíos del agregado que se hallan cubiertos:						
Capa superficial o de nivelación	75	82	75	85	75	85
Lámina de piedra o arena	85	72	85	75	75	85
Capa ligante o Base	85	72	85	75	75	85
HUBBARD- FIELD						
Método original:						
Estabilidad libras	2000	-----	1200	2000	1200	2000
Vacios en el total de la mezcla, %	2	5	2	5	2	5
Método modificado:						
Estabilidad libras	3500	6000	2500	6000	2500	6000
Vacios en el total de la mezcla, %	2	5	2	5	2	5
HVEEM						
Valor del estabilómetro	35	-----	35	-----	30	-----
Valor del cohesiómetro	50	-----	50	-----	50	-----
% de hinchamiento	-----	0,03	-----	0,03	-----	0,03
Vacios en el total de la mezcla, %	4	-----	4	-----	4	-----
SMITH-TRIAXIAL						
Cohesión C (lb/pig <sup>2</sup> )						
Ángulo de fricción O						
Vacios en el total de la mezcla, %	5	10	5	10	5	10

(\*) Criterio válido únicamente si los ensayos son efectuados de acuerdo a los métodos indicados en la publicación "Mix Design Methods for Hot-Mix Asphalt Paving", del Instituto de Asfalto de los Estados Unidos.

(\*\*) En las paradas de autobuses, intersecciones y áreas similares, se sugiere especificar los valores de fluidez cercanos al mínimo. (ref. 7)

## ANÁLISIS DE RESULTADOS

Del estudio realizado de las diferentes partes integrantes del sistema de vapor de la planta de hormigón asfáltico; para facilitar la descripción de todo el conjunto, se analizará según la secuencia seguida durante el desarrollo de la presente tesis.

En el capítulo dos se trata lo referente a los requerimientos de servicios de la instalación; seguidamente se dimensiona el tanque de almacenamiento dando obteniéndose un tanque de 5.5 metros de alto por 11 metros de ancho. El cálculo y diseño del serpentín de vapor o intercambiador, se basa en los requisitos de suministro de vapor al mismo; requiriendo 3231476.798 Btu/h que es la cantidad de energía requerida para mantener el AP3 en estado líquido, considerándose las variaciones climáticas del medio ambiente. Luego se determina la capacidad de la bomba óptima empleada para mover el AP3 dentro del tanque con lo cual logramos la convección forzada necesaria para evitar el gasto excesivo de energía empleándose una bomba de desplazamiento positivo tipo engranaje de 15 hp.

De la misma forma se procedió para calcular el suministro de vapor necesario para calentar los 25.000 galones de AP3, requiriendo 1226891.853 Btu/h y una bomba de 4 hp de iguales características que la anteriormente descrita. Empleando el mismo criterio se calculó la cantidad de vapor requerido por el tanquero de 10.000 galones.

Con estos datos se selecciono el tipo de caldera más adecuado a nuestras necesidades que encontramos en las calderas piro-tubulares, con una capacidad de generación de vapor a una razón de 200 C.C. de la Cleaver Brooks.

En el capítulo tres se selecciona el tipo de combustible más adecuado basado en el análisis gravimétrico de varios de ellos; se escoge diesel N°2; se dan las diferentes temperaturas de eficiencia de los gases de escape originados por la combustión del mismo, se optimiza la combustión regulando una relación aire/combustible y control de los gases de escape. El dimensionamiento y consumo del sistema de combustible utilizado en los diferentes componentes como el tanque de uso diario se establece mediante tablas. La selección de la bomba requerida en el sistema es de 1.5 hp de tipo desplazamiento positivo con un consumo de 59 galones por hora.

Para el cuarto capítulo se analiza el agua de alimentación a la caldera; primeramente se trata el agua proveniente del sistema local de abastecimiento y los condensados por medios químicos. Se detallan los diferentes tipos de tratamiento e impurezas existentes en el agua de alimentación al caldero.

Se calcula y dimensiona el sistema de agua de alimentación, obteniéndose una bomba tipo turbina de 6 hp. Para las tuberías de agua de alimentación utilizamos las recomendaciones dadas por la Cleaver Brooks dando una tubería de 2 pulgadas de diámetro tanto en la succión como en la descarga. Un esquema del sistema de alimentación se representa.

En el cálculo de las tuberías de vapor y retorno de condensado con sus caídas de presión, se dimensiona para cada tramo del recorrido y al final se resumen en tablas en función del caudal, la longitud y el diámetro de la tubería se obtiene la caída de presión respectiva. El diseño de la tubería de retorno de condensado se dimensiona para conducir un volumen del doble de condensado que se produce durante el

arranque en frío de los equipos. Selecciono el tipo de aislante óptimo para las diferentes tuberías de vapor y retorno de condensado, se determina que la lana de vidrio es la más adecuada a nuestras necesidades. La recuperación de condensado es importante por el ahorro de combustible y productos químicos para su tratamiento.

Conocido la carga de condensado que circula, calculo las trampas de vapor, tomando en cuenta las diferentes condiciones de diseño y tipos; seleccionándose la de tipo fuelle por las características, se recomienda el empleo de una trampa para cada equipo. Seguidamente se calcula y selecciona las juntas de expansión, se esquematizan diferentes tipo de juntas. La línea de vapor y de retorno de condensado se instalan juntas, esto nos facilita un mejor mantenimiento de las mismas

Para el ultimo capítulo se analiza el hormigón asfáltico su granulometría, preparación, porcentajes de vacíos, pesos específicos y se resumen los ensayos de estabilidad sugeridos por el Instituto de Asfalto de los Estados Unidos.

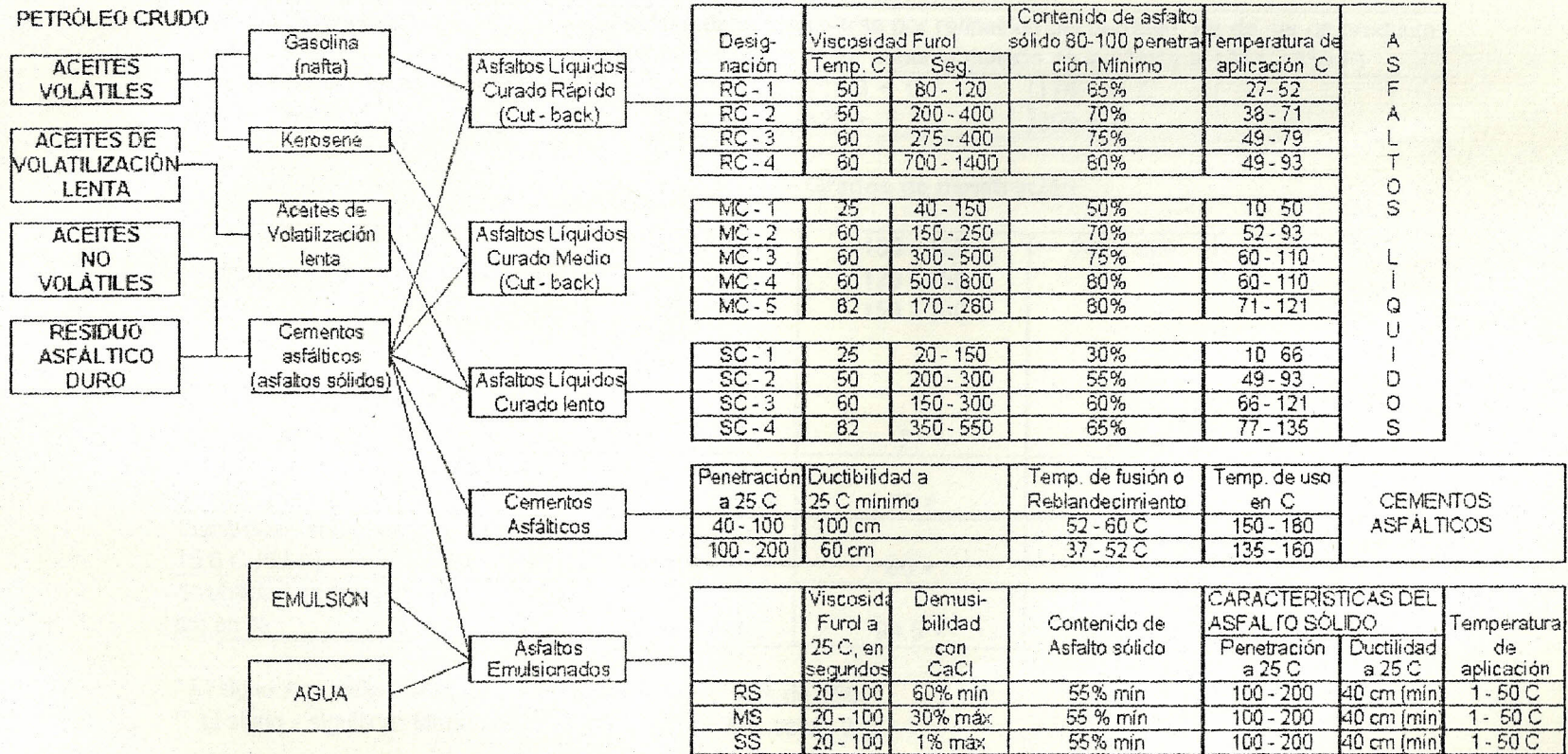
### Conclusiones y recomendaciones.

- El hormigón asfáltico es una materia prima empleado en una diversidad de usos, siendo el más aplicado como carpeta asfáltica. El asfalto o AP3 llega a la instalación desde Esmeraldas el mismo que es suministrado por Petrocomercial. Una vez mezclado con los áridos, agregados, en las cantidades requeridas según el destino y ubicación de la misma en el suelo, según las diferentes normas internacionales.
- La planta esta diseñada para producir 600.000 toneladas al año de hormigón asfáltico con una producción diaria de 1666.7 toneladas.
- Uno de los principales objetivos de esta tesis ha sido la aplicación de las normas dadas por la Cleaver Brooks; las normas internacionales como la ASTM, ASA, entre otras para la instalación y utilización más eficiente de los recursos energéticos.
- Esta tesis esta dirigida a personas, entidades sean estas publicas o privadas, que se encuentren laborando en el área de la construcción.

ANEXOS

Cuadro 1

TIPOS DE ASFALTOS EN PAVIMENTACIÓN



Cuadro 2

## ESPECIFICACIONES PARA ASFALTOS

Características	Cemento asfáltico usado en pavimentación		
Requisitos Generales	El asfalto debe prepararse por refinación del petróleo. Ha de ser un producto uniforme y no debe tener espuma cuando se lo clienta a 176 C (350 F)		
Punto de llama (medio en la taza abierta Cleveland)	232.2* + C 450 + F	218.3 + C 425 + F	176.7 + C 350 + C

## Grados de penetración

Penetración a 25 C (77 F); 100 gr. 5 seg.	40 - 50	100 - 120	200 - 300
	50 - 60	120 - 150	
	60 - 70	150 - 200	
	70 - 85		
	85 - 100		
Pérdida al calor a 162.8 C (325 F) 5 horas, en %	1 - **	2 -	2 -
Penetración después del calentamiento anterior	70+	70 +	60 +
Ductibilidad en cm, a 25 C (77 F) 15.6 C (60 F)	100+	60 +	60 +
Solubilidad en tetracloruro de carbono; en %	99.5+	99.5 +	99.5 +

\* El signo + significa: Más de... - Ejemplo: 450 + = Más de 450

\*\* El signo - significa: Menos de... - Ejemplo: 2 - = Menos de 2







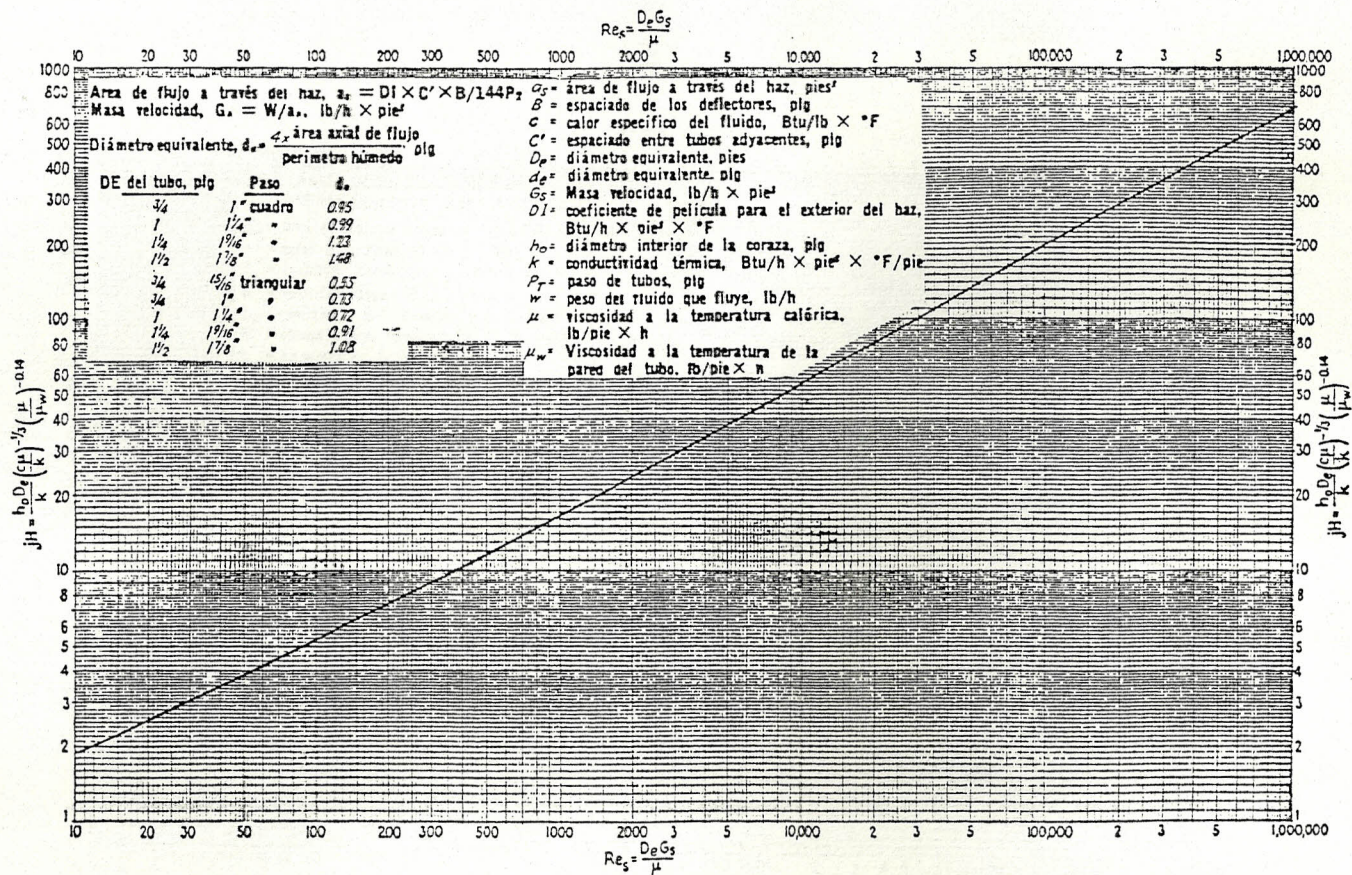


Fig. 1 Curva de transferencia de calor para lado de la coraza con haz de tubos con deflectores segmentados 25%

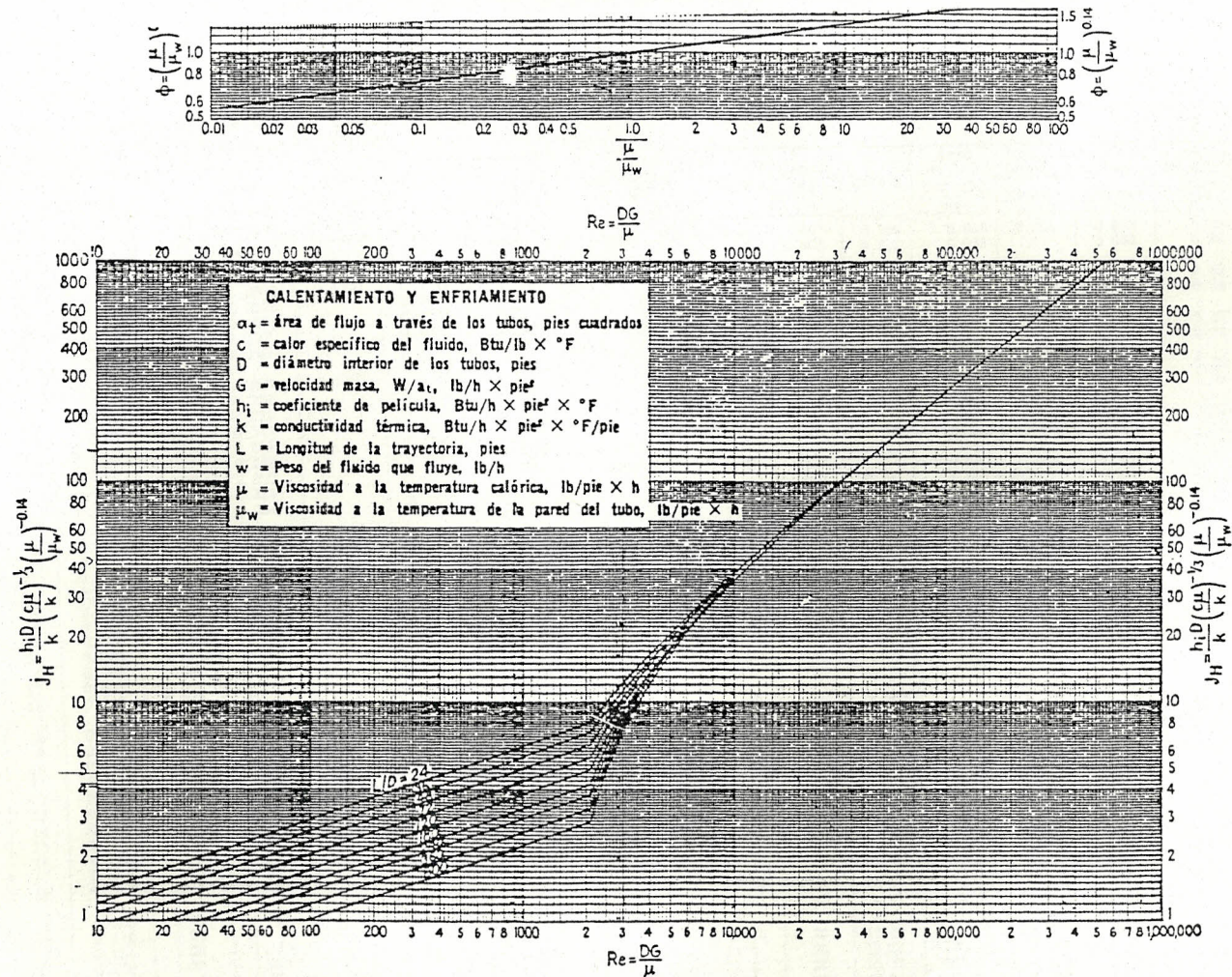


FIG. 2 Curva de transferencia de calor lado de tubos. (Adaptada de Sieder y Tate)

DATOS DE TUBOS PARA CONDENSADORES  
E INTERCAMBIADORES DE CALOR

Tubo DE, plg	BWG	Espesor de la pared,	DI, plg	Area de flujo por tubo, plg <sup>2</sup>	Superficie por pie lin. pies <sup>2</sup>		Peso por pie lineal, lb, de acero
					Exterior	Interior	
1/2	12	0.109	0.282	0.0625	0.1309	0.0748	0.493
	14	0.083	0.334	0.0876		0.0874	0.403
	16	0.065	0.370	0.1076		0.0969	0.329
	18	0.049	0.402	0.127		0.1052	0.258
	20	0.035	0.430	0.145		0.1125	0.190
3/4	10	0.134	0.482	0.182	0.1963	0.1263	0.965
	11	0.120	0.510	0.204		0.1335	0.884
	12	0.109	0.532	0.223		0.1393	0.817
	13	0.095	0.560	0.247		0.1466	0.727
	14	0.083	0.584	0.268		0.1529	0.647
	15	0.072	0.606	0.289		0.1587	0.571
	16	0.065	0.620	0.302		0.1623	0.520
	17	0.058	0.634	0.314		0.1660	0.469
	18	0.049	0.652	0.334		0.1707	0.401
	1	8	0.165	0.670		0.355	0.2618
9		0.148	0.704	0.389	0.1843	1.47	
10		0.134	0.732	0.421	0.1916	1.36	
11		0.120	0.760	0.455	0.1990	1.23	
12		0.109	0.782	0.479	0.2048	1.14	
13		0.095	0.810	0.515	0.2121	1.00	
14		0.083	0.834	0.546	0.2183	0.890	
15		0.072	0.856	0.576	0.2241	0.781	
16		0.065	0.870	0.594	0.2277	0.710	
17		0.058	0.884	0.613	0.2314	0.639	
18	0.049	0.902	0.630	0.2361	0.545		
1 1/4	8	0.165	0.920	0.665	0.3271	0.2409	2.09
	9	0.148	0.954	0.714		0.2498	1.91
	10	0.134	0.982	0.757		0.2572	1.75
	11	0.120	1.01	0.800		0.2644	1.58
	12	0.109	1.03	0.836		0.2701	1.45
	13	0.095	1.06	0.884		0.2775	1.28
	14	0.083	1.08	0.923		0.2839	1.13
	15	0.072	1.11	0.960		0.2896	0.991
	16	0.065	1.12	0.985		0.2932	0.900
	17	0.058	1.13	1.01		0.2969	0.808
18	0.049	1.15	1.04	0.3015	0.688		
1 1/2	8	0.165	1.17	1.075	0.3925	0.3063	2.57
	9	0.148	1.20	1.14		0.3152	2.34
	10	0.134	1.23	1.19		0.3225	2.14
	11	0.120	1.26	1.25		0.3299	1.98
	12	0.109	1.28	1.29		0.3356	1.77
	13	0.095	1.31	1.35		0.3430	1.56
	14	0.083	1.33	1.40		0.3492	1.37
	15	0.072	1.36	1.44		0.3555	1.20
	16	0.065	1.37	1.47		0.3587	1.09
	17	0.058	1.38	1.50		0.3623	0.975
18	0.049	1.40	1.54	0.3670	0.831		

DIMENSIONES DE TUBERIA DE ACERO (IPS)

Tamaño nominal del tubo, IPS plg	DE, plg	Cédula No.	DI, plg	Area de flujo por tubo, plg <sup>2</sup>	Superficie por pie lineal, pies <sup>2</sup> /pie		Peso por pie lineal, lb de acero
					Exterior	Interior	
1/2	0.405	40*	0.269	0.058	0.106	0.070	0.25
			0.215	0.036			
3/4	0.540	40*	0.364	0.104	0.141	0.095	0.43
			0.302	0.072			
1	0.675	40*	0.493	0.192	0.177	0.129	0.57
			0.423	0.141			
1 1/4	0.840	40*	0.622	0.304	0.220	0.163	0.85
			0.546	0.235			
1 1/2	1.05	40*	0.824	0.534	0.275	0.216	1.13
			0.742	0.432			
2	1.32	40*	1.049	0.864	0.344	0.274	1.68
			0.957	0.718			
2 1/4	1.66	40*	1.380	1.50	0.435	0.362	2.28
			1.278	1.23			
3	1.90	40*	1.610	2.04	0.498	0.422	2.72
			1.500	1.76			
4	2.38	40*	2.067	3.35	0.622	0.542	3.66
			1.939	2.95			
5	2.88	40*	2.469	4.79	0.753	0.647	5.80
			2.323	4.23			
6	3.50	40*	3.068	7.38	0.917	0.804	7.58
			2.900	6.61			
8	4.50	40*	4.026	12.7	1.178	1.055	10.8
			3.826	11.5			
10	6.625	40*	6.065	28.9	1.734	1.590	19.0
			5.761	26.1			
12	8.625	40*	7.981	50.0	2.258	2.090	28.6
			7.625	45.7			
14	10.75	40*	10.02	78.8	2.814	2.62	40.5
			9.75	74.6			
16	12.75	30	12.09	115	3.338	3.17	43.8
			14.0	138			
18	14.0	30	13.25	138	3.665	3.47	54.6
			16.0	163			
20	16.0	30	15.25	183	4.189	4.00	62.6
			18.0	234			
22	18.0	20†	17.25	234	4.712	4.52	72.7
			20.0	291			
24	20.0	20†	19.25	291	5.236	5.05	78.6
			22.0	355			
26	22.0	20†	21.25	355	5.747	5.58	84.0
			24.0	425			
28	24.0	20	23.25	425	6.283	6.09	94.7

\* Comúnmente conocido como estándar.

† Comúnmente conocido como extragrueso.

‡ Aproximadamente.

DISPOSICION DE LOS ESPEJOS DE TUBOS (CUENTA DE TUBOS). ARREGLO EN CUADRO

Tubos de 3/4" DE, arreglo en cuadro de 1 plg					Tubos de 1" DE, arreglo en cuadro de 1 1/4 plg						
Coraza DI, plg	1-P	2-P	4-P	6-P	8-P	Coraza DI, plg	1-P	2-P	4-P	6-P	8-P
8	32	26	20	20		8	21	16	14		
10	52	52	40	36		10	32	32	26	24	
12	81	76	68	68	60	12	48	45	40	38	36
13 1/4	97	90	82	76	70	13 1/4	61	56	52	48	44
15 1/4	137	124	116	108	108	15 1/4	81	76	68	64	64
17 1/4	177	166	158	150	142	17 1/4	112	112	96	90	82
19 1/4	224	220	204	192	188	19 1/4	138	132	128	122	116
21 1/4	277	270	246	240	234	21 1/4	177	166	158	152	148
23 1/4	341	324	308	302	292	23 1/4	213	208	192	184	184
25	413	394	370	356	346	25	260	252	238	226	222
27	481	460	432	420	408	27	300	288	278	268	260
29	553	526	480	468	456	29	341	326	300	294	286
31	657	640	600	580	560	31	406	398	380	368	358
33	749	718	688	676	648	33	465	460	432	420	414
35	845	824	780	766	748	35	522	518	488	484	472
37	934	914	886	866	838	37	596	574	562	544	532
39	1049	1024	982	968	948	39	665	644	624	612	600

Tubos de 1 1/4" DE, arreglo en cuadro de 1 9/16 plg Tubos de 1 1/2" DE, arreglo en cuadro de 1 7/8 plg

10	16	12	10			12	16	16	12	12	
12	30	24	22	16	16	12	22	22	16	16	
13 1/4	32	30	30	22	22	13 1/4	22	22	16	16	
15 1/4	44	40	37	35	31	15 1/4	29	29	25	24	22
17 1/4	56	53	51	48	44	17 1/4	39	39	34	32	29
19 1/4	78	73	71	64	56	19 1/4	50	48	45	43	39
21 1/4	96	90	86	82	78	21 1/4	62	60	57	54	50
23 1/4	127	112	106	102	96	23 1/4	78	74	70	66	62
25	140	135	127	123	115	25	94	90	86	84	78
27	166	160	151	146	140	27	112	108	102	98	94
29	193	188	178	174	166	29	131	127	120	116	112
31	226	220	209	202	193	31	151	146	141	138	131
33	258	252	244	238	226	33	176	170	164	160	151
35	293	287	275	268	258	35	202	196	188	182	178
37	334	322	311	304	293	37	224	220	217	210	202
39	370	362	348	342	336	39	252	246	237	230	224

DISPOSICION DE LOS ESPEJOS DE TUBOS (CUENTA DE TUBOS). (Continúa). ARREGLO TRIANGULAR

Tubos de 3/4" DE, arreglo triangular de 15/16 plg						Tubos de 3/4" DE, arreglo triangular de 1 plg					
Coraza DI, plg	1-P	2-P	4-P	6-P	8-P	Coraza DI, plg	1-P	2-P	4-P	6-P	8-P
8	36	32	26	24	18	8	37	30	24	24	
10	62	56	47	42	36	10	61	52	40	36	
12	109	98	86	82	78	12	92	82	76	74	70
13 1/4	127	114	96	90	86	13 1/4	109	106	86	82	74
15 1/4	170	160	140	136	128	15 1/4	151	138	122	118	110
17 1/4	239	224	194	188	178	17 1/4	203	196	178	172	166
19 1/4	301	282	252	244	234	19 1/4	262	250	226	216	210
21 1/4	361	342	314	306	290	21 1/4	316	302	278	272	260
23 1/4	442	420	386	378	364	23 1/4	384	376	352	342	328
25	532	506	468	446	434	25	470	452	422	394	382
27	637	602	550	536	524	27	559	534	488	474	464
29	721	692	640	620	594	29	630	604	556	538	508
31	847	822	766	732	720	31	745	728	678	666	640
33	974	938	878	852	826	33	856	830	774	760	732
35	1102	1068	1004	988	958	35	970	938	882	864	848
37	1240	1200	1144	1104	1072	37	1074	1044	1012	986	970
39	1377	1330	1258	1248	1212	39	1206	1176	1128	1100	1078

Tubos de 1" DE, arreglo triangular de 1 1/4 plg						Tubos de 1 1/4" DE, arreglo triangular de 1 9/16 plg					
Coraza DI, plg	1-P	2-P	4-P	6-P	8-P	Coraza DI, plg	1-P	2-P	4-P	6-P	8-P
8	21	16	16	14		10	20	18	14		
10	32	32	26	24		12	32	30	26	22	20
12	55	52	48	46	44	13 1/4	38	36	32	28	26
13 1/4	68	66	58	54	50	15 1/4	54	51	45	42	38
15 1/4	91	86	80	74	72	17 1/4	69	66	62	58	54
17 1/4	131	118	106	104	94	19 1/4	95	91	86	78	69
19 1/4	163	152	140	136	128	21 1/4	117	112	105	101	95
21 1/4	199	188	170	164	160	23 1/4	140	136	130	123	117
23 1/4	241	232	212	212	202	25	170	164	155	150	140
25	294	282	256	252	242	27	202	196	185	179	170
27	349	334	302	296	286	29	235	228	217	212	202
29	397	376	338	334	316	31	275	270	255	245	235
31	472	454	430	424	400	33	315	305	297	288	275
33	538	522	486	470	454	35	357	348	335	327	315
35	608	592	562	546	532	37	407	390	380	374	357
37	674	664	632	614	598	39	449	436	425	419	407
39	766	736	700	688	672						

Tubos de 1 1/2" DE, arreglo triangular de 1 7/8 plg					
Coraza DI, plg	1-P	2-P	4-P	6-P	8-P
12	18	14	14	12	12
13 1/4	27	22	18	16	14
15 1/4	36	34	32	30	27
17 1/4	48	44	42	38	36
19 1/4	61	58	55	51	48
21 1/4	76	72	70	66	61
23 1/4	95	91	86	80	76
25	115	110	105	98	95
27	136	131	125	118	115
29	160	154	147	141	136
31	184	177	172	165	160
33	215	206	200	190	184
35	246	238	230	220	215
37	275	268	260	252	246
39	307	299	290	284	275

## BIBLIOGRAFIA

- 1 Kern Donald Q., Procesos de transferencia de calor, editorial Cecsca 1991, vigésimotercero reimpresión, impreso en México.
- 2 J. Kenan & J. Keya, Gas Tables, Thermodynamic Properties of air, Products of combustion and Component gases,. Editorial J.Wiley & Sons Inc, Twelfth printing, April 1966. Printed USA.
- 3 Programa de capacitación en gerencia de la energía en la industria, Sistemas de calderos.. Instituto Nacional de Energía, Comisión de comunidades Europeas, 1992
- 4 Ing. Vargas Zúñiga Angel, Calderas industriales y marinas editorial series VZ, 1984
- 5 Ing. Vargas Zúñiga Angel, Mantenimiento de calderas industriales y marinas, editorial series VZ, 1990.
- 6 Hagler, Bailly & Co., Manual de auditoría energética industrial, Washington D.C. 1985.
- 7 T. Baumeister, E. Avollone, T. Baumeister III, Marks Manual del ingeniero Mecánico, octava edición (segunda edición español)