



Ingeniería Mecánica
FACULTAD DE CIENCIAS
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
UNIVERSIDAD DE CHILE

ME56B

Taller de Diseño Mecánico

Instalaciones Portuarias

Terminal de Descarga de Gas Natural Licuado

Alejandro Cuevas Streeter
Guillermo del Castillo Camus
Jorge Rivera Torres

Santiago, Julio del 2008

Índice

1. Antecedentes	3
1.1. Procesamiento de GNL	3
1.1.1. Proceso de Licuefacción	4
1.1.2. Proceso de Enfriamiento	5
1.1.3. Almacenamiento del GNL	5
1.1.4. Transporte del GNL	5
1.2. Proyecto Quintero	6
2. Layout	7
2.1. Subsistemas	7
2.2. Especificaciones	7
2.2.1. Caudal de Descarga	7
2.2.2. Almacenamiento	7
2.2.3. Condiciones de Trabajo	8
3. Brazos de descarga de GNL	10
4. Materiales para Piping	13
4.0.4. Tuberías	13
4.0.5. Aislante	14
5. Cálculos de Piping	16
5.1. Pérdidas	16
5.1.1. Pérdidas por Transporte	16
5.1.2. Absorciones Térmicas	17
6. Válvulas	20
6.1. Sistema de Bombeo	22

7. Sistema de almacenamiento	25
7.1. Materiales	26
7.2. Cálculo del grosor de la pared interna	28
7.3. Cálculo de la aislación	28
8. Sistema de re-gasificación	29
8.1. Vaporizadores	29
8.2. Área de transferencia de calor	30
A. Layout del Puerto de GNL	33
B. Data Sheet para Cotizar Brazos de Descarga	35
C. Diagrama de cálculo de pérdidas singulares	38
D. Planilla de Cálculos de pérdidas en tuberías	40
E. Planilla de Cálculos de estanques de almacenamiento	42
F. Single Burner Sub-X® Vaporizer	44

Capítulo 1

Antecedentes

El gas natural licuado (GNL) es gas natural que ha sido procesado para ser transportado en forma líquida. El gas natural se transporta generalmente utilizando gasoductos pero, para grandes distancias, resulta más económico usar buques. Para transportarlo así es necesario licuarlo, dado que a la temperatura ambiente y a la presión atmosférica ocupa un volumen considerable. El proceso de licuefacción reduce el volumen del gas natural 600 veces con respecto a su volumen original. Sin embargo, al licuarlo, puede transportarse con total seguridad hasta su mercado de destino utilizando buques, de manera similar al petróleo crudo. En esta condición, el gas natural está a presión atmosférica y a -161 [°C].^[1] Por esta razón, se requieren plantas y piping de considerable aislación.



Figura 1.1: Buque de transporte de GNL.

1.1. Procesamiento de GNL

Un proyecto de GNL posee altas complejidades técnicas y comerciales. Estos proyectos poseen diversas etapas, las cuales podemos resumir en:

1. Explotación del Yacimiento.
2. Tratamiento preliminar en los pozos.
3. Transporte por tubería a la planta de licuefacción.

4. Carga (llenado) de barcos.
5. Viaje a puerto de descarga.
6. Descarga de barcos.
7. Transporte a las unidades de revaporización.
8. Venta y Distribución.

Para el presente proyecto, los puntos de mayor importancia son: *descarga y transporte a las unidades de revaporización*. A continuación se describirá brevemente algunos procesos interesantes comprendidos en las etapas anteriores.

1.1.1. Proceso de Licuefacción

Cuando se extrae el gas natural de los yacimientos subterráneos, a menudo contiene otros materiales y componentes que deben ser eliminados antes de que pueda ser licuado para su uso:

Helio : Por su valor económico y por los problemas que podría producir durante el licuado.

Azufre : Debido a su carácter corrosivo.

Dióxido de Carbono : Solidifica en las condiciones de licuefacción.

Mercurio : Puede depositarse en instrumentos y falsificar las mediciones.

Agua : Al enfriar el gas se congelaría formando hielo o bien hidratos que provocarían bloqueos en el equipo si no se eliminaran.

Condensado : Son hidrocarburos pesados, los cuales pueden congelarse al igual que el agua y producir bloqueos del equipo y problemas en la combustión del gas.

El GNL producido debe de ser usado en procesos de combustión y por lo tanto hay que extraer algunos hidrocarburos para controlar su poder calorífico y el índice de Wobbe¹. Dependiendo del mercado final, la remoción de etano, propano y otros hidrocarburos debe estar controlada mediante una unidad de remoción de líquidos que puede estar integrada en el proceso de licuefacción.

¹Índice de Wobbe: Principal indicador de la intercambiabilidad de gases combustibles. Fuente: http://en.wikipedia.org/wiki/Wobbe_index

1.1.2. Proceso de Enfriamiento

Para convertir el gas natural en líquido, se enfría el gas tratado hasta aproximadamente -161 [°C], que es la temperatura a la cual el metano -su componente principal- se convierte a forma líquida. El proceso de licuefacción es similar al de refrigeración común: se comprimen los gases refrigerantes produciendo líquidos fríos, tales como propano, etano/etileno, metano, nitrógeno o mezclas de ellos, que luego se evaporan a medida que intercambian calor con la corriente de gas natural. De este modo, el gas natural se enfría hasta el punto en que se convierte en líquido. Una vez que el gas ha sido licuado se somete a un proceso de *Joule-Thompson* o *expansión con extracción de trabajo* para poderlo almacenar a presión atmosférica. El GNL así producido se almacena en tanques especiales para ser luego transferido a buques tanques especiales de transporte.

El diseño de estas plantas está gobernado por estrictas normas. En la industria de GNL hay cuatro diseños de plantas que se usan industrialmente: proceso con intercambiados de tubos en espiral de Air Products (APCI y APX), la cascada optimizada de Phillips, el triple ciclo refrigerante de Linde y el proceso de caja fría con mezcla refrigerante de Black and Veatch (PRICO).

Todos estos procesos son usados en la industria y competencias de diseño son realizadas para seleccionar el proceso que va a generar el proyecto más rentable a lo largo de toda su vida útil.

1.1.3. Almacenamiento del GNL

El GNL se almacena a -161 [°C] y a presión atmosférica en tanques criogénicos especiales para baja temperatura. El típico tanque de GNL tiene doble pared: una pared externa de *hormigón armado*, recubierto con acero al carbono, y una pared interna de *acero niquelado al 9%*. La seguridad y la resistencia son las consideraciones de diseño primarias al construir estos tanques, los cuales se diseñan para soportar terremotos y fuertes vientos.

1.1.4. Transporte del GNL

El GNL se transporta a presión atmosférica en buques especialmente construidos con casco doble. El sistema de contención de carga se diseña y construye utilizando materiales especiales para el aislamiento y tanque, para asegurar el transporte seguro de esta carga criogénica.

El GNL en los tanques de carga del buque se mantiene a su temperatura de saturación (-161 [°C]) a lo largo de toda la navegación, pero se permite que una pequeña cantidad de vapor se disipe por ebullición, en un proceso que se denomina *autorrefrigeración*. El gas evaporado se utiliza para impulsar los motores del buque.

Aproximadamente 40 % de los buques de GNL actualmente en servicio cuentan con sistemas de contención de carga del tipo de membrana, de modo que tienen un aspecto muy similar al de otros cargueros. El resto de los buques tienen un sistema de contención de carga más particular, que incluye

cuatro o más tanques esféricos grandes. Ambos tipos de sistema de contención poseen antecedentes de operación extremadamente seguros y confiables.

1.2. Proyecto Quintero

El Proyecto Quintero está en plena etapa de construcción y control de proyectos. Este proyecto plantea la construcción de un terminal de GNL para así asegurar el suministro de gas natural por parte de Metrogas a sus clientes. El proyecto contempla que a partir del 2009, los volúmenes de descarga permitan abastecer un 100 % del consumo residencial y comercial (Rescom).

La implementación del complejo de Quintero contempla una inversión del orden de US\$1,000 millones, y a la fecha ya se ha invertido un tercio de este monto, acorde con la planificación establecida para llevar a cabo este proyecto.

La infraestructura que demanda este proyecto consiste en:

- Un muelle de 1,600 metros de longitud.
- Cinco brazos que permitirán descargar un barco en aproximadamente 12 horas.
- Tres vaporizadores para regasificar el gas natural en estado líquido.
- Un gasoducto que une Quintero y Quillota.
- Tres estanques que almacenarán en estado líquido el equivalente a 198 millones de $[m^3]$ de gas natural medido en forma gaseosa. A modo de ejemplo, la demanda máxima del sector Rescom (que corresponde al sector residencial y al sector comercial de la Región Metropolitana), alcanza durante el invierno a 2 millones de m^3 .

Todas estas obras estarán listas a mediados de 2009, salvo los estanques de almacenamiento, cuya fecha de término está proyectada para mediados de 2010. En el intertanto, se implementará una operación de fast track, en la cual un barco almacenará el GNL y lo inyectará en forma directa a los vaporizadores, puntualiza Bernstein. Además, para enfrentar emergencias durante este periodo habrá un estanque de almacenamiento en tierra, que permitirá almacenar 6 millones de $[m^3]$ gaseosos.[2]

Capítulo 2

Layout

2.1. Subsistemas

Las instalaciones de descarga poseerán los siguientes subsistemas:

Descarga : Brazos de descarga y fittings.

Transporte : Principalmente piping, válvulas y bombas.

Almacenamiento : Tanques de almacenamiento criogénico.

Gasificadores : Plantas gasificadoras y piping para la distribución.

En los anexos se incluye un *Layout general* de las instalaciones requeridas.

2.2. Especificaciones

2.2.1. Caudal de Descarga

Usando como referencia el Terminal Quintero, la instalación deberá ser capaz de recibir buques metaneros de hasta 180.000 [m^3] líquidos de GNL¹. Además, existen cinco brazos de descarga los cuales serán capaces de vaciar un buque en 12 [horas].[2]

$$\dot{Q} = \frac{180,000[m^3]}{12[hr] \cdot 5[brazo]} \quad (2.1)$$

$$\dot{Q} = 3000 \left[\frac{m^3}{hr \cdot brazo} \right] \quad (2.2)$$

2.2.2. Almacenamiento

Se usarán tres estanques de almacenamiento, los cuales tendrán una capacidad individual de 110,000[m^3], mientras que como conjunto, almacenarán 330,000[m^3] de GNL.²

¹108 millones de [m^3] de gas natural en forma gaseosa.

²En estado líquido.

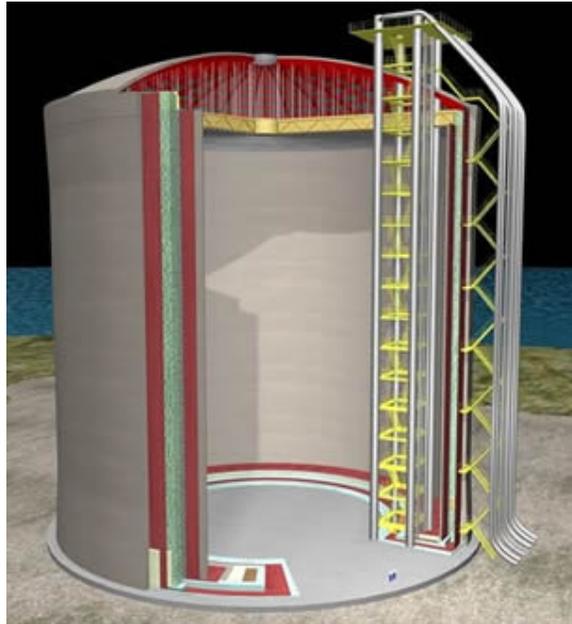


Figura 2.1: Tanque criogénico de GNL.[9]

2.2.3. Condiciones de Trabajo

El GNL deberá mantenerse en todo momento dentro de la condición de licuado, la que corresponde a 1[atm] y -161 [°C]. Estas condiciones tienen directa influencia en los cálculos de almacenamiento, piping, bombas y válvulas.

Brazos de Descarga

Se usará la misma configuración que Quintero, con cinco brazos de descarga. Los equipos elegidos poseen diámetros de trabajo de 10 a 20 [pulg].[\[5\]](#)



Figura 2.2: Brazo de descarga.

Capítulo 3

Brazos de descarga de GNL

El sistema de descarga de GNL desde el barco al puerto, comprende la instalación de un equipo de brazos de tuberías que permiten acoplar la red portuaria al barco, de manera de extraer de manera segura el GNL desde la embarcación.

Estos brazos deben operar, al igual que el piping, a una temperatura de $-162^{\circ}C$.

En el anexo B se incluye un *Data Sheet* a partir del cual se puede requerir una cotización para los brazos de descarga, y en la figura 3.4 se muestran algunos datos que ya hemos podido recopilar para rellenar la planilla, faltando aún otros datos que nos permitan completar satisfactoriamente el *Data Sheet* requerido.

El diseño de estos brazos es bastante similar en las diferentes configuraciones. En la figura 3.1 podemos apreciar un esquema del brazo requerido donde se muestran sus componentes principales, y a partir de la cual es posible comprender de mejor manera su funcionamiento.

Las dimensiones principales de un brazo de descarga las podemos observar en la figura 3.2. De estos datos podemos ver que el flujo de GNL estimado para cada brazo ($3,000[m^3/h]$) está dentro del rango que soporta este brazo.

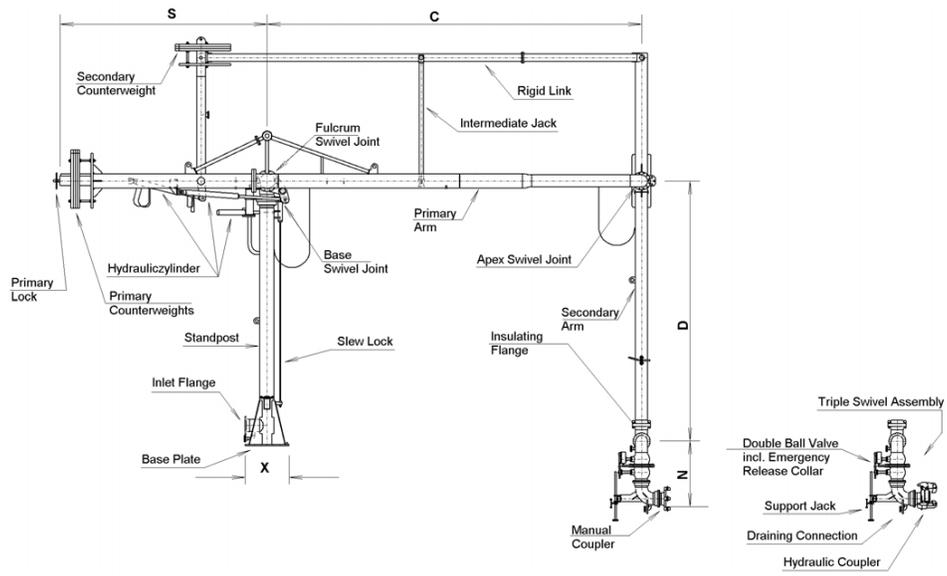


Figura 3.1: Esquema de un brazo de descarga

Size	Stand Post Height	X	C	D	N	S	flow rate	weight	bending moment
inch	mm	mm	mm	mm	mm	mm	m ³ /h	KN	KNm
16"	7 000	1 500	11 000	11 000	1 310	6 250	4 000	224	500

Figura 3.2: Dimensiones y pesos principales

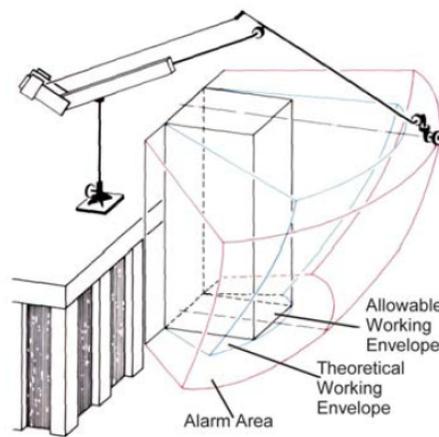


Figura 3.3: Esquema del área de funcionamiento de un brazo de descarga

Arm Data

- arm number/ tag No.
- Inlet Connection
 - size [inch]
 - rating [lbs]
- ship's end connection
 - size [inch]
 - rating [lbs]
- drain connection size
 - shore end [inch]
 - ship's end [inch]
- operation
 - manual/hydraulic
- arms connected simultaneously

	1	2	3	4
	16			
	16			
	Hydraulic			
	5			

Accessories required (cross boxes for "yes")

- bolted flange
- manual coupler
- hydraulic coupler
- vacuum breaker
- insulation joint
- nitrogen purge to apex
- platforms & ladders
- emergency release system
- other requirements

	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Product data

- product name
- operating pressure [bar g]
- design pressure [bar g]
- operating temperature [°C]
- design temperature [°C]
- flow rate (max.) [m³/h]
- specific gravity [kg/dm³]
- viscosity at **-162 °C** [cSt]

	LNG			
	1			
	1			
	-162			
	-162			
	3000/arm			
	0.448			
	0.25			

Site data

- ambient temperature [°C]
- design wind speed (max.) [m/s]
- seismic factor (if any)

	20			

Figura 3.4: Algunos datos ingresados al *Data Sheet*

Capítulo 4

Materiales para Piping

Dadas las características de muy baja temperatura con que se debe transportar el GNL, es importante en primer lugar que el material de las tuberías tenga buenas propiedades mecánicas a -162°C , y además debemos tener un aislante que impida grandes ganancias de calor desde el exterior. Mantener la temperatura adecuada en el transporte de GNL es crucial.

4.0.4. Tuberías

Los aceros inoxidable austeníticos poseen una combinación única de propiedades que lo hacen muy útiles a temperaturas criogénicas. Estos aceros presentan una resistencia mecánica más altas que a temperatura ambiente, mientras que su dureza se ve muy poco degradada.

En la figura 4.1 podemos ver como se comporta el un acero inoxidable austenítico, en este caso los aceros 304 y 316, durante un ensayo de Charpy. Se ve claramente que en un amplio rango de temperatura el material mantiene sus buenas propiedades mecánicas.

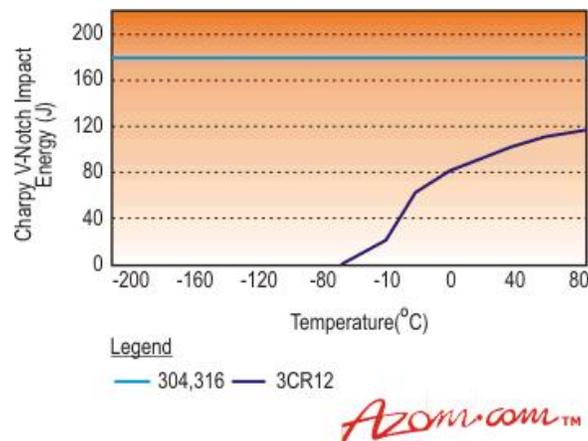


Figura 4.1: Charpy: Energía[J] versus temperatura.

Consecuentemente, los aceros inoxidable austeníticos han sido comúnmente utilizados en aplica-

Tabla 4.1: Propiedades mecánicas y térmicas relevantes del acero 304

AISI304 - ASTM A167			
Propiedades Mecánicas			
Dureza Brinell	123		
Impacto Charpy	325		[J]
σ_{uts}	505		[Mpa]
σ_Y	215		[Mpa]
Propiedades Térmicas			
Conductividad Térmica	16.2		[W/mK]

Tabla 4.2: Conductividad térmica de la Lana Mineral

Lana Mineral Aislante	
Densidad Nominal [kg/m^3]	k [W/mK]
40	0.042
80	0.038
100	0.039

ciones de transporte de GNL; en particular, para este proyecto se utilizará un acero *ASTM-304*. Podemos ver sus propiedades en la tabla 4.0.4

4.0.5. Aislante

Para impedir un aumento de temperatura del gas, es decir, impedir una ganancia de energía térmica, debemos encontrar un material con una conductividad térmica baja, y que a la vez sea fácil de instalar, de reparar y que su costo sea razonable.

Un material que presenta una baja conductividad térmica es la lana mineral, comúnmente utilizada en diversas aplicaciones de aislación. Es un material de alta disponibilidad y de buenas propiedades térmicas como se muestra en la tabla 4.0.5. La figura 4.2 muestra un tipo de comercialización como carpeta de lana mineral.

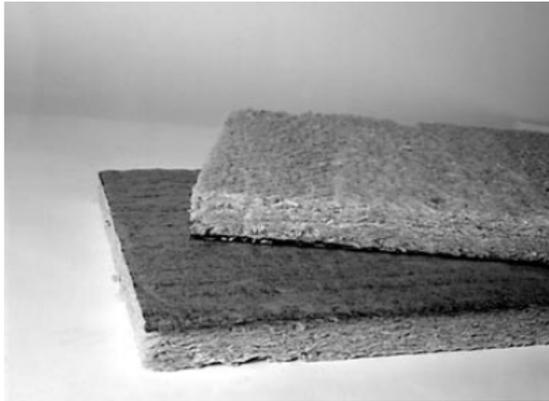


Figura 4.2: Colchoneta de Lana Mineral

Capítulo 5

Cálculos de Piping

5.1. Pérdidas

5.1.1. Pérdidas por Transporte

Las pérdidas de carga por transporte se calculan de acuerdo a las típicas ecuaciones de flujo viscoso en ductos, habiendo dos tipos de pérdidas: las pérdidas regulares, que son causadas por la rugosidad del ducto, lo que origina pérdidas de energía por fricción, y las singulares, que son causadas por elementos adicionales en las tuberías, tales como válvulas, codos, expansiones, etc.

Para calcular las pérdidas regulares, primero se debe tener el número de Reynolds del fluido, el cual está dado por la siguiente expresión:

$$Re = \frac{V \cdot D}{\nu} \quad (5.1)$$

Donde V es la velocidad del fluido, D es el diámetro interno del ducto y ν es la viscosidad cinemática del fluido.

En nuestro caso, el fluido cumple con creces $Re > 4,000$ (condición de flujo turbulento), por lo que ahora se pasa a calcular el factor de fricción (f) con la ecuación explícita de Swamee y Jain:

$$f = \frac{0,25}{\log\left(\frac{e}{3,7 \cdot D} + \frac{5,74}{Re^{0,9}}\right)^2} \quad (5.2)$$

Donde e es la rugosidad del ducto, dato que está tabulado.

Ahora, para calcular las pérdidas regulares, necesito el largo de la cañería, el cual se obtiene con respecto al Layout propuesto, para luego calcular las pérdidas regulares como:

$$Perdidas = \frac{L}{D} \cdot f \cdot \rho \cdot 0,5 \cdot V^2 \quad (5.3)$$

Donde L es el largo de la cañería y ρ es la densidad del fluido.

Las pérdidas singulares se calculan sumando las pérdidas que cada singularidad causa en el fluido. Estas

pérdidas están tabuladas, pues debido a la complejidad del fenómeno que ocurre en estas la obtención analítica de las pérdidas es muy complicada, por lo que se obtienen experimentalmente. Los datos para nuestro caso se obtienen del diagrama del anexo C.

Se contabilizaron un total de 7 codos en 90°, 2 codos en 45° y 3 válvulas de compuerta, se determinó mediante el diagrama recién nombrado las pérdidas (medidas en largo equivalente), para luego calcular las pérdidas singulares mediante la ecuación 5.3.

Finalmente, sumando las pérdidas regulares y las singulares, se determinó que en cada cañería se produce una pérdida de 5.51 [bar].

5.1.2. Absorciones Térmicas

Para determinar las absorciones térmicas, se usan los conceptos básicos de transferencia de calor. Dadas las características del pipeline (largo y fluido), se puede suponer con certeza que las paredes interiores de la tubería se encuentran a la misma temperatura del fluido, en forma constante.¹ Luego, se tiene un problema simple de conducción en sistemas radiales. La ecuación de calor es:

$$\dot{Q} = h_{eff} \cdot A \cdot \Delta T \quad (5.4)$$

Donde h_{eff} es el coeficiente de transferencia de calor efectivo, A es el área de transferencia y ΔT es el gradiente de temperatura.

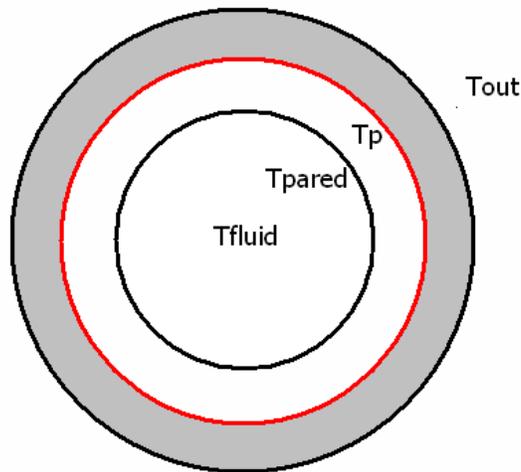


Figura 5.1: Esquema de un corte transversal sobre uno de los dos pipes.

Si se tiene una cañería compuesta de dos materiales, como se puede apreciar en la figura 5.1, al analizar la parte interna se tiene:

$$\dot{Q}_1 = h_{eff,1} \cdot A_1 \cdot (T_p - T_{in}) \quad (5.5)$$

¹Temperatura Impuesta.

Donde:

$$h_{eff,1} = \frac{k_1}{t_{eff,1}} = \frac{2 \cdot k_1}{d_{int} \cdot \ln\left(\frac{d_{ext}}{d_{int}}\right)} \quad (5.6)$$

k_1 : Conductividad térmica de la cañería.

d_{int} : Diámetro interno de la cañería.

d_{ext} : Diámetro externo de la cañería.

T_p : Temperatura en el borde cañería-aislante.

T_{in} : Temperatura del fluido.

Ahora, al analizar el aislante que recubre la cañería se procede de la misma manera:

$$\dot{Q}_2 = h_{eff,2} \cdot A_2 \cdot (T_{out} - T_p) \quad (5.7)$$

Donde:

$$h_{eff,2} = \frac{k_2}{t_{eff,2}} = \frac{2 \cdot k_2}{d_{int,a} \cdot \ln\left(\frac{d_{ext,a}}{d_{int,a}}\right)} \quad (5.8)$$

k_2 : Conductividad térmica del aislante.

$d_{int,a}$: Diámetro interno del aislante.

$d_{ext,a}$: Diámetro externo de la cañería.

T_{out} : Temperatura del ambiente exterior.

Luego, al conservar el flujo de calor:

$$\dot{Q}_1 = \dot{Q}_2$$

Por lo que se obtiene la temperatura de pared:

$$T_p = \frac{T_{out} + \alpha \cdot T_{in}}{1 + \alpha} \quad (5.9)$$

$$\alpha = \frac{h_{eff,1} \cdot A_1}{h_{eff,2} \cdot A_2} \quad (5.10)$$

Con esta información, se puede proceder a calcular la temperatura real del fluido trasladado debido a las absorciones térmicas y de transporte.

Considerando que:

$$\dot{W} = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_{inicial} - T_{final}) \quad (5.11)$$

Donde:

\dot{W} : Son las absorciones (*termicas + transporte*) en unidades de potencia.

\dot{m} : Es el caudal másico $\dot{m} = Q \cdot \rho$.

C_p : Corresponde a la capacidad térmica del GNL.

$T_{inicial}$: Temperatura inicial del GNL ($111[^\circ K]$).

Luego, como se conocen las absorciones térmicas y de transporte, se procede a iterar. Primero, se impone que la temperatura del fluido es la inicial, obteniendo las absorciones térmicas. A continuación se obtiene la temperatura tras las absorciones despejando T_{final} de la ecuación anterior. De esta manera se obtiene una nueva temperatura de fluido, con la cual tras 2 iteraciones se llega a que el fluido llega al punto final a $111,7[^\circ K]$. Esto significa un calentamiento ínfimo y aceptable. Las absorciones por transferencia de calor, por cada pipeline son de $3069,52[kW]$.

Capítulo 6

Válvulas

Las válvulas son el elemento de control para sistemas de piping. Se utilizan para aislar equipos y sistemas de cañerías, regular flujos, y regular presiones. Los parámetros mínimos para el diseño o selección de válvulas son: tamaño, material de construcción, presión y temperaturas, y conexiones.

Material de Construcción: Dadas las condiciones criogénicas del fluido, al igual que en el piping, es necesario que las válvulas sean de acero inoxidable austenítico.

Presión y temperaturas: Las presiones de trabajo en este sistema son bastante bajas, esto nos llevará a utilizar válvulas clase 150. Lo importante en este caso es la temperatura, la cual es de interés para la selección de materiales.

Conexiones: Las conexiones más utilizadas son flanges o soldadas. Las conexiones soldadas tienen la ventaja de prevenir fugas a toda temperatura y presión. Debido a la condición extrema de temperatura en este caso y las características especiales del fluido, las uniones soldadas se recomiendan como la mejor alternativa.

La empresa *VELAN* tiene una completa línea de válvulas criogénicas, que cumplen con altos estándares de calidad y son ya utilizadas en diversos terminales de GNL.

Para caracterizar las válvulas requeridas se utilizará el formato de pedido que se encuentra en el catálogo. Este formato se muestra en la imagen 6.1.

HOW TO ORDER

The figure numbers shown on this key are designed to cover essential features of Velan valves. Please use figure numbers to ensure prompt and accurate processing of your order. A detailed description must accompany any special orders. For butterfly valves contact the factory for figure number information.

B *SIZE OF CONNECTION (ALL VALVES)

Customers have the choice of specifying valve size as part of the valve figure ("B") using the numbers below, or indicating valve size separately.

Examples:

F10-0064C-02TY (valve size is part of figure number)

03 – ½"	07 – 1½"	10 – 3"	13 – 5"	16 – 10"
04 – ¾"	08 – 2"	11 – 3½"	14 – 6"	18 – 12"
05 – 1"	09 – 2½"	12 – 4"	15 – 8"	19 – 14"

3°F-0064C-02TY (valve size is shown separately)

20 – 16"	23 – 22"	28 – 28"	34 – 34"	48 – 48"
21 – 18"	24 – 24"	30 – 30"	36 – 36"	99 – SPECIAL
22 – 20"	26 – 26"	32 – 32"	42 – 42"	

GATE, GLOBE & CHECK

Type of connection	Size of connection	Pressure rating	Type	Body/Bonnet & Style	Body Material	Trim Material
A	B	C	D	E	F	G
						

eg: F 1 0 - 0 0 6 4 C - 1 3 T Y

(Flanged 3" 150 class cast stainless steel full bore gate valve with TY trim).

A TYPE OF CONNECTION

A – Special	F – Flanged	S – Threaded
B – Butt weld	R – Flanged, ring joint	W – Socket weld

B SIZE OF CONNECTION*

(SEE EXPLANATION ABOVE)

C CLASS

0 – 150 1 – 300 2 – 600 3 – 1500 4 – 2500 6 – 400 7 – 900

D VALVE TYPE

05 – Conventional port gate	07 – Stop (globe)	09 – Needle
06 – Full port gate	08 – Stop check	11 – Swing check

E BODY/BONNET STYLE

4C – Vertical bolted bonnet
4E – Extended bonnet for cryogenic service

F BODY MATERIAL

11 – Stainless steel, F304, CF8	23 – Alloy 20
12 – Stainless steel, F304L, CF3	25 – LCB
13 – Stainless steel, F316, CF8M	26 – LF2
14 – Stainless steel, F316L, CF3M	27 – LF3
15 – Stainless steel, F347, CF8C	31 – LCC
19 – Monel	

G TRIM MATERIAL: GATE, GLOBE & CHECK

Code	Wedge/Disc Seating Surface ⁽¹⁾	Seat Surface ⁽¹⁾	Stem
MY	CF8M or 316	Stellite 6	SS 316
MS	CF8M or 316	Stellite 6	SS 316
MX	CF8M	SS 316	SS 316

(1) Base material is either the same as the body or solid a manufacturer's option.

Figura 6.1: Como ordenar válvulas VELAN

Para las válvulas V-6(3) a V-9, ver layout en Anexo A, se consideró una unión soldada, esto ya que la probabilidad de falla de estas válvulas es muy baja dado en parte por la baja carga de operación a la que están sometidas. Se tiene entonces la siguiente especificación:

- B20-006-4E-12MY

Para las válvulas V-10 a V-12, ver layout en Anexo A, la diferencia será el tamaño de la tubería, que en esta etapa es $\phi = 4[in]$. De esta manera tendremos la siguiente especificación:

- B12-006-4E-12MY

6.1. Sistema de Bombeo

Para encontrar el sistema de bombeo adecuado, como primera iteración se asumió una bomba por cañería, lo que resulta en un sistema paralelo de dos bombas. Con esto, se procedió a calcular la altura manométrica de la bomba junto a la potencia necesaria. Con esta información, luego se buscó infructuosamente por una bomba que pudiera funcionar con estas condiciones, incluyendo criogeneidad. Al no poder hacerlo, se procedió a realizar una segunda iteración

Dado que existen cinco brazos, se propone tener una bomba por cada uno. Luego, este sistema de piping derivan en las dos cañerías principales, las cuales dirigen el LNG descargado al centro de almacenamiento. El esquema de bombas se observa en la figura 6.2.

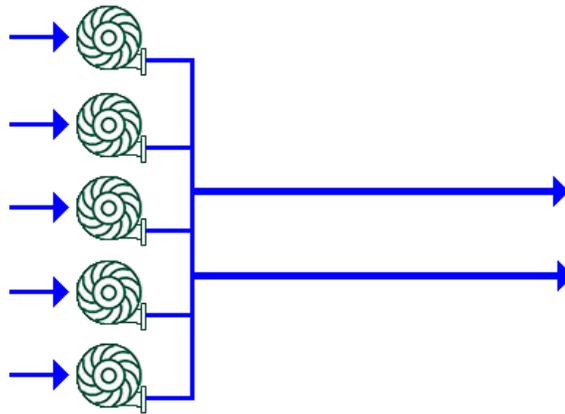


Figura 6.2: Esquema de distribución del sistema de bombeo.

La potencia que requiere una bomba viene dada por:

$$P = \frac{\rho \cdot g \cdot \dot{Q}_i \cdot HMT}{\eta_b} \quad (6.1)$$

De donde:

ρ : Densidad de LNG.

g : Aceleración de gravedad.

\dot{Q}_i : Caudal.

HMT : Altura Manométrica.

η_b : Rendimiento de la Bomba.

Notar que la distribución de las bombas es en paralelo. Luego, se tiene:

$$\dot{Q} = \sum_{i=1}^5 \dot{Q}_i \quad (6.2)$$

Usando el caudal ya obtenido anteriormente:

$$4,17[m^3/s] = \sum_{i=1}^5 \dot{Q}_i$$

$$\Rightarrow \dot{Q}_i = 3000[m^3/hr]$$

Ahora, para calcular la altura manométrica, se usará un balance energético, válido dentro de una línea de flujo cualquiera.

$$h_f + \frac{V_f^2}{2 \cdot g} + \frac{P_f}{\rho \cdot g} + z_f = h + \frac{V_i^2}{2 \cdot g} + \frac{P_i}{\rho \cdot g} + z_i \quad (6.3)$$

Sin embargo, se tiene que $V_f = V_i$ y se supondrá una caída de altura de 10[m]. Reemplazando identidades y supuestos, se obtiene:

$$HMT = \frac{\Delta P}{\rho \cdot g} + \Delta z$$

Recordando que las pérdidas por transporte ya fueron calculadas, se tiene

$$HMT = \frac{551,29[Pa]}{448,11[kg/m^3] \cdot 9,8[m/s^2]} + 10[m]$$

$$\Rightarrow HMT = 135,54[m]$$

Finalmente, suponiendo un rendimiento estándar de bomba del 70 %, se tiene:

$$P = \frac{448,11[kg/m^3] \cdot 9,8[m/s^2] \cdot 3000[m^3/hr] \cdot 135,54[m]}{0,7}$$

$$\Rightarrow P = 879,76[HP]$$

Con esta información se elige la bomba **VPC** de la empresa *Flowserve*. Esta bomba es un modelo especialmente diseñado para aplicaciones criogénicas y es de turbina vertical, con doble capa.¹ Detalles técnicos de la bomba son incluidos en los anexos.

Para elegir el punto óptimo de operación, se usa el gráfico proporcionado por el fabricante. De aquí se deriva que a 50[Hz], es decir a 3000[RPM], la bomba logra cumplir con los requerimientos de factibilidad. Esto se aprecia en la figura 6.3

¹Vertical Turbine, Double Casing Pump.

VTP and VPC (VTP-CAN) Range Chart

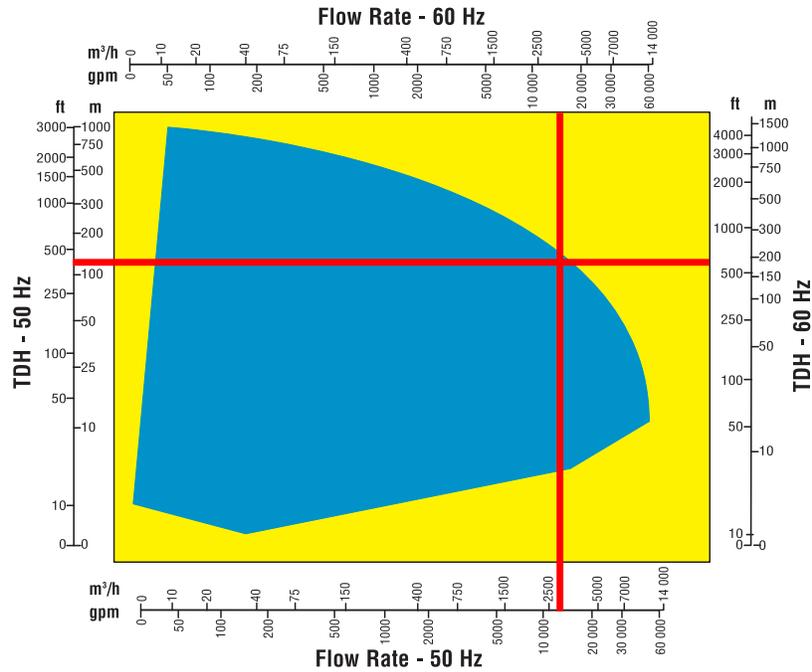


Figura 6.3: Selección del punto de operación óptimo.

Con esta información, se puede buscar el motor de corriente continua que entregue la potencia necesaria a las RPM adecuadas. Tras investigar, se encuentra que los motores adecuados son diseñado por EM (Electric Machinery Company Inc.) y corresponden a su línea de motores síncronos. El motor necesario posee 900 [HP] de potencia y requiere de esta potencia a 3000[RPM]. Si esto no es posible, luego una caja de cambios es necesaria. Luego, el punto de operación de la bomba queda definido por la figura 6.3, donde se tienen 3000[RPM], 135[m] y 3000[m³/hr], siendo este punto factible.

Capítulo 7

Sistema de almacenamiento

El almacenamiento del GNL se hace típicamente en estanques con doble pared a presión atmosférica. La pared interior es la que cumple la función de contener el fluido, mientras que la exterior solo mantiene la aislación (ubicada entre estas dos paredes) en su lugar, por lo que no sirve en caso de falla del contenedor interno.

En este caso, se usarán 3 estanques de 110000 [m³] cada uno, lo que brinda la posibilidad de descargar completamente un buque metanero y dejar un estanque libre para que trabaje sin interrupciones con el vaporizador. Estos estanques tendrán una altura de 28 [m] y un diámetro de 72 [m], medidas que pueden variar y que generalmente se ajustan a minimizar el costo del estanque. En este caso se apuntó a no hacer tan alto el estanque para no sobrecargar tanto el trabajo de las bombas además de reducir la presión hidroestática debido a la columna de fluido, siguiendo también las dimensiones de estanques encontrados en la bibliografía, las cuales bordean una relación (H/D) igual a 0.4.

Cabe también mencionar que todas las conexiones de llenado y vaciado serán por el techo para evitar el sifonamiento del contenido del estanque. La forma del estanque será muy similar al de la figura 7.1.

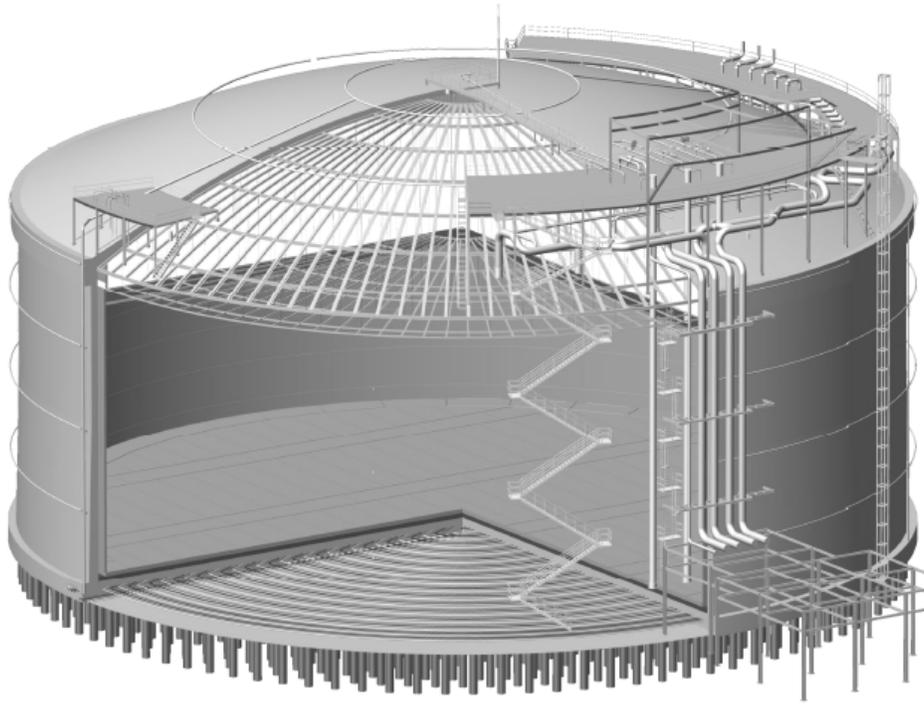


Figura 7.1: Diseño típico de un estanque contenedor de GNL

7.1. Materiales

El contenedor externo es usualmente de acero al carbono, ya que las únicas propiedades que este debe tener son comportarse adecuadamente al contacto con el GNL y tener un punto de fusión mayor a 1093 °C.

Para el estanque interno, además de cumplir con los mismos requerimientos del externo (especialmente el de buen comportamiento al contacto con el GNL), este debe tener propiedades mecánicas adecuadas, las que se mantengan lo mejor posible a temperaturas criogénicas, como también un grosor pertinente para evitar que el metal se deforme plásticamente o que se produzcan fisuras, grosor que tampoco puede ser excesivo, pues en estanques de GNL los grosores varían entre 10 y 50 cm., lo que dificulta el soldado mientras mayor sea el grosor, por lo que el material también debe tener una gran resistencia. Los materiales típicamente usados para el almacenamiento de distintos gases según su temperatura de licuefacción se muestran en la figura 7.2.

Liquefaction temperatures of gases and used types of parent materials		
Gas	Liquefaction temperature (°C)	Type of parent material used
Ammonia	-33.4	Carbon steel
Propane (LPG)	-42.1 - 45.5	Fine grain Al-killed steel
Propylene	-47.7	2.25% Ni steel
Carbon disulphide	-50.2	
Hydrogene sulphide	-59.5	3.5% Ni steel
Carbon dioxide	-78.5	
Acetylene	-84	
Ethane	-88.4	
Ethylene (LEG)	-103.8	5-9% Ni steel
Krypton	-151	
Methane (LNG)	-163	
Oxygen	-182.9	
Argon	-185.9	
Fluorine	-188.1	
Nitrogen	-195.8	Austenitic stainless steel
Neon	-246.1	
Heavy Hydrogen	-249.6	Al alloys
Hydrogen	-252.8	
Helium	-268.9	
Absloute zero	-273.18	

Figura 7.2: Materiales usados para almacenar distintos gases

Por todo esto, el material usado será el mismo que se utilizó para las tuberías, es decir, el acero ASTM-304, del cual podemos ver sus características en la tabla 4.0.4.

El material aislante debe cumplir con propiedades incombustibles, de compatibilidad con el GNL para que mantenga sus propiedades aislantes al contacto con este y claramente con propiedades aislantes pertinentes, para que así la ganancia de calor sea la menor posible. Los estanques de GNL se fabrican generalmente para que la pérdida de gas diaria sea menor al 0.05 % del volumen, esto es porque, al ser un almacenamiento criogénico, se puede autorefrigerar sacando un cierto porcentaje de gas del contener para así mantener la presión dentro constante, esto se llama autorefrigeración. Un material que cumple con todas estas características es la perlita expandida, la cual es vastamente usada en la aislación térmica de estanques de GNL, por lo que será usada en este caso en forma de perlita expandida para paredes laterales y techo y en forma de bloques de concreto de perlita para el suelo.

7.2. Cálculo del grosor de la pared interna

Por norma, el estanque interno debe estar fabricado para soportar la combinación más crítica de presión hidrostática y presión de trabajo. La presión de trabajo está normada en 29 [kPa] con respecto a la presión atmosférica, mientras que la presión hidrostática se calcula mediante la típica ecuación:

$$P = \rho g H \quad (7.1)$$

Donde ρ es la densidad del fluido, g es la aceleración de gravedad y H es la altura máxima del estanque.

Dadas la altura del estanque, la presión hidroestática máxima es de $P = 123[kPa]$, por lo que la presión que deberá soportar la pared interna es de 152 [kPa].

Para calcular el grosor de la pared se tiene que para estanques cilíndricos:

$$t = \frac{P_{diseño} \cdot r_{int}}{0,75 \cdot \sigma_{yield}} \quad (7.2)$$

Donde t es el espesor del estanque interior y σ_{yield} es la resistencia máxima a la deformación plástica del material. el factor 0.75 está dado por norma y actúa como un factor de seguridad.

Con lo cual obtengo un espesor de 32 [mm] para el estanque interno.

7.3. Cálculo de la aislación

La aislación térmica de los estanques se calculará obteniendo el flujo de calor que entra a estos por sus paredes, este flujo de calor debe ser tal que, como se dijo anteriormente, la pérdida diaria de gas por autorefrigeración sea inferior al 0.05 % de la masa total. El flujo de calor se calcula con la ecuación para geometrías cilíndricas:

$$Q_r = \frac{2\pi L(T_1 - T_2)}{\frac{\ln(r_2/r_1)}{k_1} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{k_2} + \frac{\ln(r_4/r_3)}{k_3}} \quad (7.3)$$

Por otro lado, el flujo másico a evacuar está normado por la siguiente ecuación:

$$\dot{m} = \frac{3 \cdot Q_r}{2 \cdot L} \quad (7.4)$$

Donde L es el calor latente de evaporación al 110 % de la máxima presión de trabajo.

Reemplazando por los valores de los materiales y las características del estanque e iterando unas cuantas veces se llega a que, para tener una pérdida diaria del 0.05 % del volumen por autorefrigeración se debe tener una ganancia de calor de 96.88 [kW], para lo cual se necesita una aislación de 0.49 [m] de espesor.

Capítulo 8

Sistema de re-gasificación

8.1. Vaporizadores

Los vaporizadores son básicamente intercambiadores de calor, donde se busca aportar calor al gas natural licuado de manera de facilitar su evaporación.

Existen diferentes tipos de vaporizadores para cumplir este objetivo.

- Submerged Combustion Vaporizers, SCV
- De agua de mar ("Open Rack"), ORV
- De aire ambiente
- Carcasa y tubo
- Fluido intermedio'

Dadas las características de versatilidad en operación, permitiendo afrontar la demanda normal además de peaks de demanda, se eligen vaporizadores de combustión sumergida (SCV) de quemador simple. Por lo demás, esta es una tecnología comprobada, con cerca de 300 equipos en funcionamiento alrededor del mundo.

En el SCV de quemador simple, la combustión se realiza en una cámara interna del equipo. Los gases de combustión son inyectados al agua en la parte inferior del arreglo de tubos por donde circula el GNL, lo que genera un efecto burbujeante que permite mantener una temperatura uniforme y constante en el agua, previniendo además el congelamiento del esta alrededor de los tubos.

Generalmente el baño de agua opera a una temperatura entre 12 y 18°C. Además, el vapor de agua en los gases de combustión se condensa en el baño de agua, recuperando así parte del calor latente, lo que permite obtener altas eficiencias térmicas. En promedio, estos vaporizadores consumen aproximadamente 1,3% del gas natural regasificado para su uso como combustible.

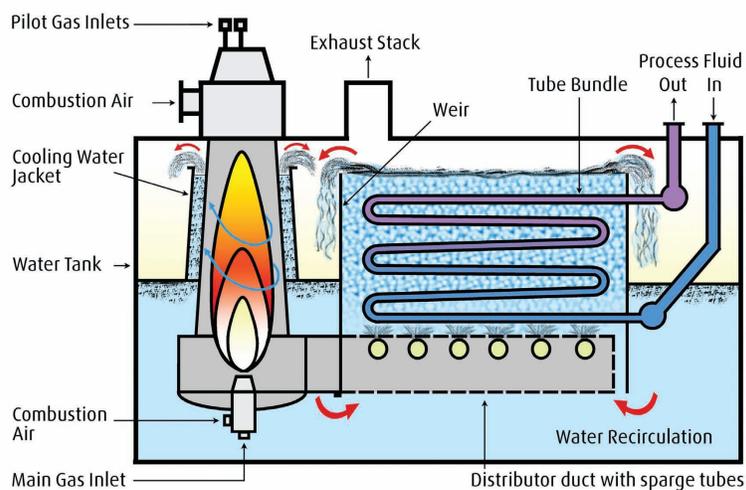


Figura 8.1: Esquema de un SCV de quemador simple

En el anexo F podemos ver un listado de las ventajas en diferentes áreas y algunas características de diseño, en especial enfocadas a minimizar el impacto ambiental debido a la combustión.

8.2. Área de transferencia de calor

Para definir los vaporizadores, es necesario conocer las condiciones de operación de la planta. Esto nos permitirá obtener una aproximación del área necesaria de transferencia de calor.

En primer lugar, la energía o calor necesario para gasificar el GNL, alcanzando una temperatura final de alrededor de $5^{\circ}C$ se obtiene a partir de las siguientes ecuaciones.

$$Q1 = W \cdot h_v \quad (8.1)$$

$$Q2 = W \cdot C \cdot \Delta T \quad (8.2)$$

Donde:

Q: Calor necesario para el proceso en $[W]$

h_v : Calor latente de vaporización $510[kJ/kg]$

W: Flujo másico de gas natural en $[kg/s]$

C: Capacidad térmica del GN a presión constante [11] $2,340[J/kg \cdot K]$

ΔT : Diferencia de temperatura entre la entrada y la salida del gas.

Para el flujo másico consideraremos una demanda diaria máxima de $2,5[MMm^3]$ en estado gaseoso, lo que se traduce en un caudal $W = 32,42[kg/s]$ en base a una operación de 16 horas diarias.

De las ecuaciones 8.1 y 8.2 obtenemos el calor necesario para realizar el cambio de fase del fluido, de manera que tenemos,

$$Q1 = 32,42[kg/s] \cdot 5,1 \times 10^5[J/kg] \approx 16,531[kW] \quad (8.3)$$

$$Q2 = 32,42[kg/s] \cdot 2,340[J/kg \cdot K] \cdot 167[K] \approx 12,667[kW] \quad (8.4)$$

De esta manera obtenemos que la energía térmica que demanda este proceso es $Q = Q1 + Q2 = 16,531 + 12,667 = 29,198[kW]$.

Por otra parte, tenemos la ecuación de diseño de intercambiadores de calor de la cual obtendremos el área de transferencia necesaria.

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T_{log} \quad (8.5)$$

Para ΔT_{log} utilizamos la ecuación para flujo paralelo, tomando como supuesto que la temperatura del agua se mantiene constante en $15^\circ C$. De esta forma, obtenemos $\Delta T_{log} \approx 58[K]$. Suponiendo cañerías de acero inoxidable de diametro nominal 2[in] ($d_{int} = 50[mm]$, $d_{ext} = 63[mm]$), tenemos que $U = 6230,75[W/m^2 \cdot K]$.

Así, con la energía necesaria, podemos obtener una aproximación del área necesaria para la transferencia, resultando $A = 80,8[m^2]$.

Dado que no tenemos las especificaciones técnicas de los vaporizadores, tomaremos en cuenta la instalación de tres vaporizadores. De estos vaporizadores, dos se utilizarán para gasificar la demanda base, y se tendrá un tercero ya sea para suplementar el servicio en demandas peak o como reemplazo en caso de falla de otro vaporizador. Es decir, se tendrán dos vaporizadores en funcionamiento y uno en *stand-by*. De acuerdo a esto, cada vaporizador deberá tener un área de transferencia de $\approx 40,5[m^2]$ para tener la capacidad calculada anteriormente.

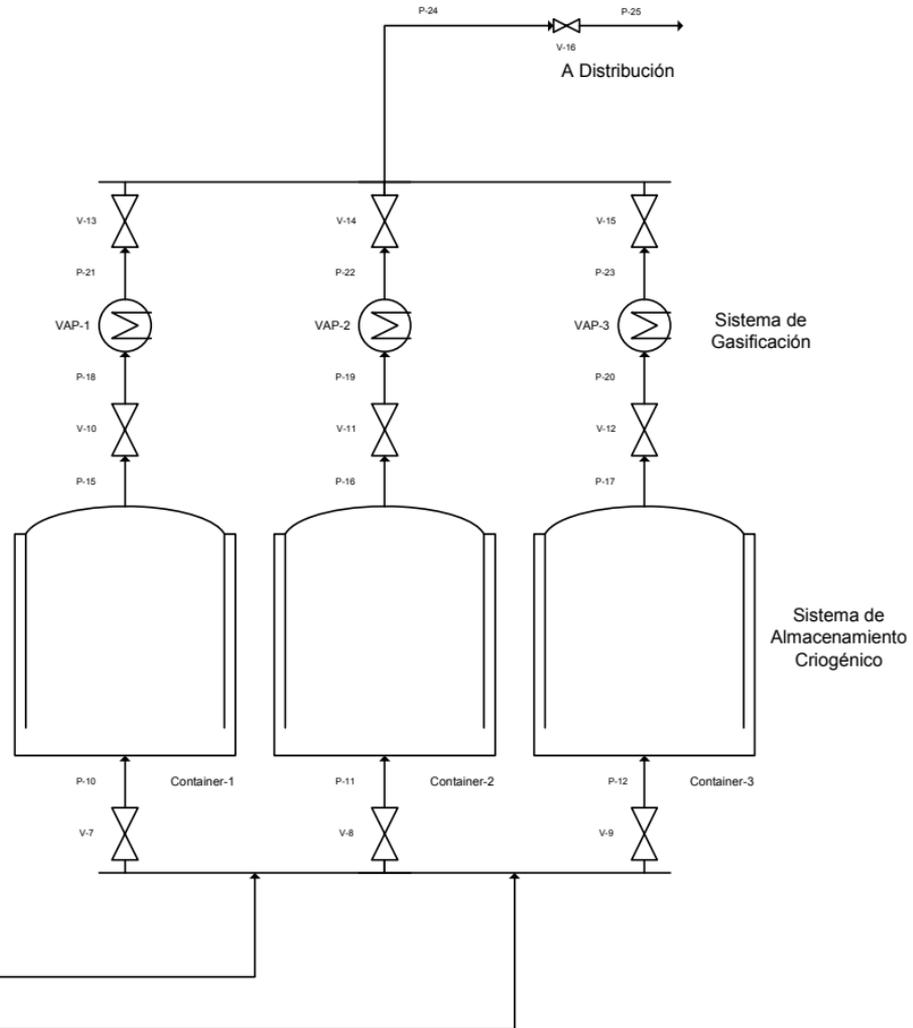
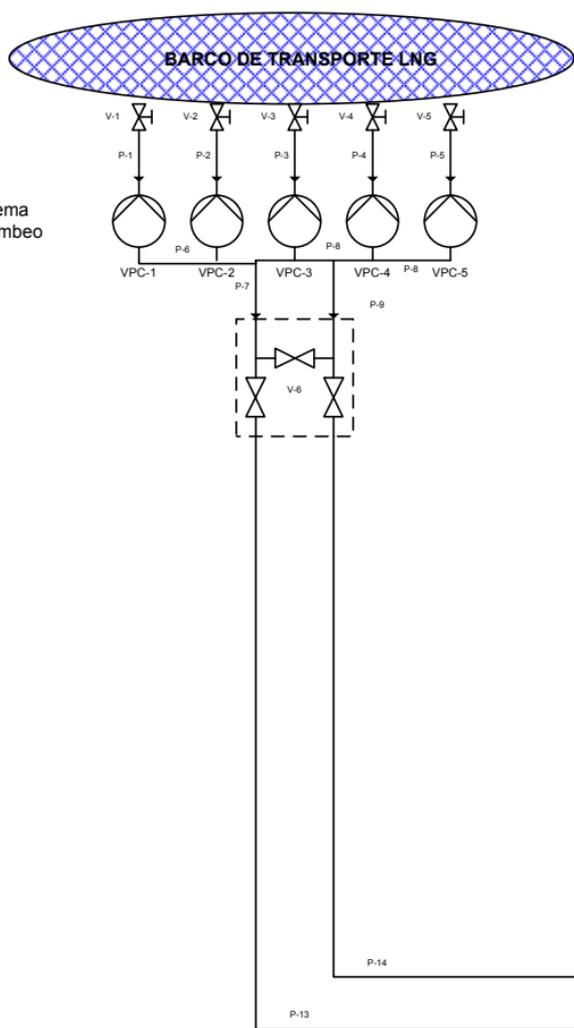
Bibliografía

- [1] Wikipedia: *Gas Natural Licuado* http://es.wikipedia.org/wiki/Gas_natural_licuado, Abril, 2008.
- [2] Metrogas: *Proyecto Quintero* http://metrogas2.altavoz.net/prontus_mas/site/artic/20080306/pags/20080306155523.html, Abril, 2008.
- [3] Selas Fluid Processing: *Vaporizadores* <http://www.selasfluid.com/international/web/le/us/likelesfus.nsf/docbyalias/Vaporizers>, Abril, 2008.
- [4] Universal Industrial Gases Inc.: *Especificaciones de Vaporizadores* <http://www.uigi.com/vaporizers.html>, Abril, 2008.
- [5] FMC Technologies: *Brazos Marinos de Descarga de GNL Chiksan* <http://www.selasfluid.com/international/web/le/us/likelesfus.nsf/docbyalias/Vaporizers>, Abril, 2008.
- [6] AF CryoTank: *Tanques Criogénicos de Almacenaje GNL* <http://www.selasfluid.com/international/web/le/us/likelesfus.nsf/docbyalias/Vaporizers>, Abril, 2008.
- [7] NFPA 59A Liquefied Natural Gas (LNG). 2006
- [8] Liquid Process Piping, US Army Corps of Engineers. 1999
- [9] AF CryoTank: *Tanques Criogénicos de Almacenaje GNL* <http://www.selasfluid.com/international/web/le/us/likelesfus.nsf/docbyalias/Vaporizers>, Abril, 2008.
- [10] KOGAS: *development of the world's largest above-ground full containment lng storage tank* <http://igs.nigc.ir/igs/STANDARD/IGU-2006/localhost/wgc/pdf/paper/add10896.pdf>, Abril, 2008.
- [11] Gases, Specific heat capacities and individual gas constants. http://www.engineeringtoolbox.com/spesific-heat-capacity-gases-d_159.html

Apéndice A

Layout del Puerto de GNL

Sistema de Bombeo



Apéndice B

Data Sheet para Cotizar Brazos de Descarga

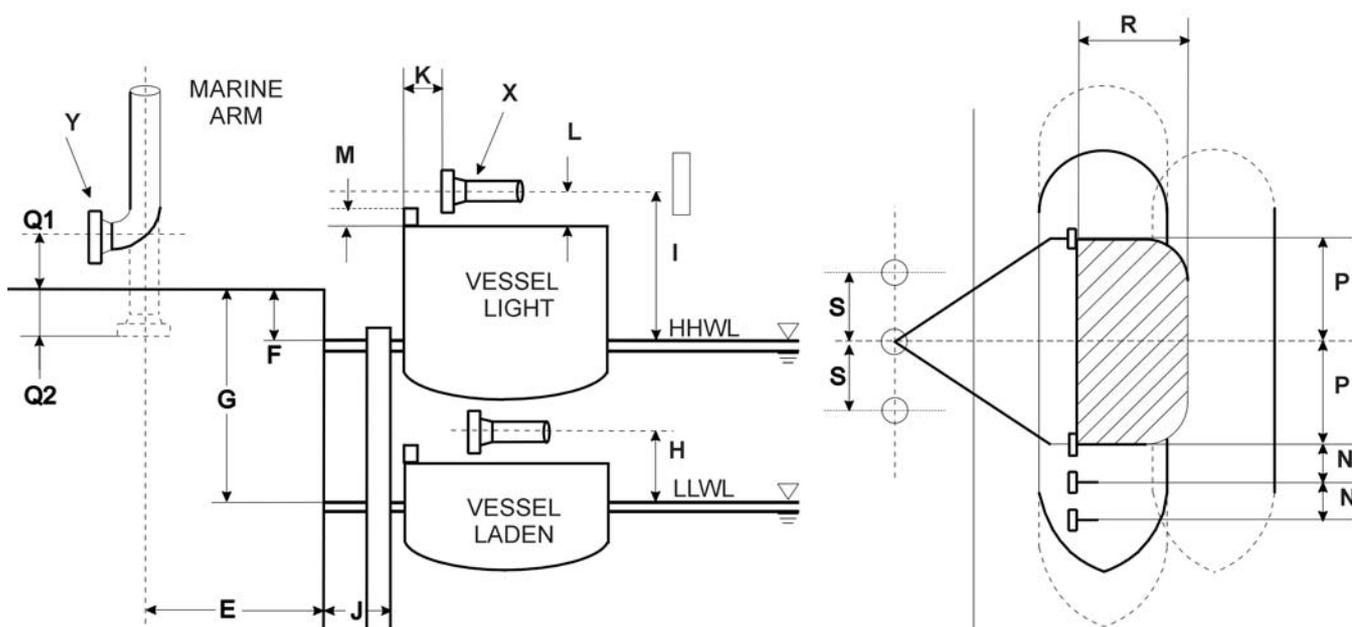
MARINE LOADING – Data Sheet

	Berth data	minimum	maximum
E	Distance jetty face to center line of riser		
J	Distance jetty face to berthing line		

F	Distance top of jetty to highest high water level (HHWL)		
G	Distance top of jetty to lowest low water level (LLWL)		
S	Distance between center lines of risers		
Q1	Height of flange above jetty		
Q2	Depth of flange below jetty		
Y	Inlet flange size and rating		

If there are any berth features which effect the function or installation of the arms please supply drawing.

	Vessel Data	minimum	maximum
	Tanker size - Dead Weight Tonnage (DWT)		
H	Height of flange to water line laden		
I	Height of flange to water line light		
K	Distance of flange to ship's side		
L	Height of flange above ship's deck		
M	Height of ship's rail		
P	Surge fore and aft		
R	Sway		
N	Distance between flanges		
X	Vessel flange size and rating		



EMCO WHEATON
A Gardner Denver Company

Datsheet MLA - 06/01 - hsc

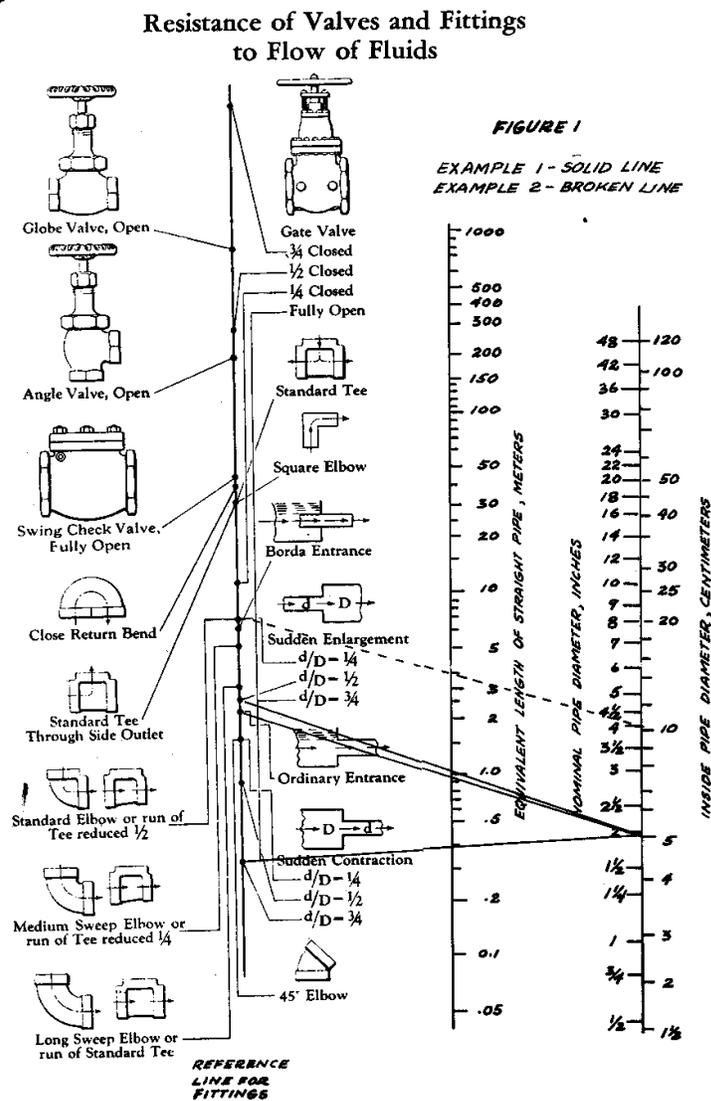
Whilst the content of this leaflet has been edited with the greatest care, we are not liable for any errors or omissions

EMCO WHEATON
GmbH

Emcostr. 2 – 4 D - 35274 Kirchhain, Germany
Tel.: +49 (0) 6422 84- 0 ♦ Fax : +49 (0) 6422 5100
sales@emcowheaton.com ♦ www.emcowheaton.de

Apéndice C

Diagrama de cálculo de pérdidas singulares



Apéndice D

Planilla de Cálculos de pérdidas en tuberías

Distancia	1624	[m]	<i>Distancia a recorrer</i>
P_storage	1.013	[bar]	<i>Presión de Almacenamiento</i>
P_barco	1.103	[bar]	<i>Presión Inicial en el Barco</i>
P_transp	6.62	[bar]	<i>Presión de transporte</i>
T_barco	111	[K]	<i>Temperatura en el Barco</i>
T_storage	111	[K]	<i>Temperatura en el Almacenamiento</i>
T_transp		[K]	

Caudal_i	0.833	[m^3/s]	<i>Caudal Transportado por brazo</i>
Brazos	5	[u]	
Caudal	4.167	[m^3/s]	<i>Caudal Transportado</i>

P_termicas	772,483.241	[W]
P_transporte	5.5129	[bar]
Pérdidas	3,069,521.631	[W]

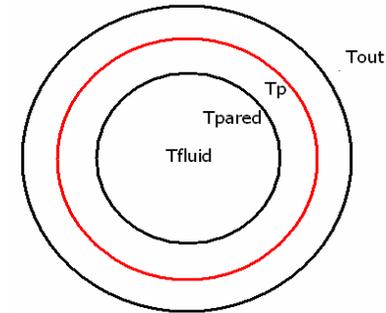
Rendimiento	70%		
Potencia_i	3696	[HP]	Potencia Bomba_i
Potencia Necesaria	3695.203	[HP]	Potencia Bombas

Volumen 473.986 [m^3]

M_dot	1867.117	[kg/s]
Tini	111	[K]
Tf	111.703	[K]

Datos GNL a -162 [C]

Densidad	448.108	[kg/m^3]
Cap Termica	2340	[J/kg*K]
Viscosidad media	0.25	[cst]



Perdidas (por cañería)

Térmicas 772,483.241 [W]

Diámetro	0.610	[m]
Cañería		
k	36	[W/m*K]
Grosor	0.05	[m]
Grosor_eff1	0.046	
h_eff	777.561	
Area_transf	3110.147	[m^2]

Aislante		
k	0.1	[W/m*K]
Grosor	0.1	[m]
Grosor_eff2	0.088	
h_eff	1.135	
Area_transf	3620.341	[m^2]

Transporte 5.513 [bar]

Diámetro	0.610	[m]
Largo equivalente	1764	[m]
e	0.0003	[m]
Velocidad fluido	7.138	[m/s]
Reynolds	17405396	
f	0.0167	

Singularidades	Cantidad	Leq [m]
Codos 90°	7	105
codos 45°	2	20
Válvulas	3	15
Otros		
TOTAL	-	140

Tfluid 111.703 [K]

Tp 112.022 [K]
 Tout 300 [K]

Largo_eff 1624 [m]

h_interno 10.000 [W/(m^2*K)]

Beta **0** 0=Sin conveccion, 1=Con conveccion

Alpha 588.481 Razon entre hA's

Apéndice E

Planilla de Cálculos de estanques de almacenamiento

Datos GNL a -162 [C]

Densidad	448,108	[kg/m ³]
Cap Termica	2340	[J/kg*K]
Viscosidad media	0,25	[cst]
calor de vaporización	8,17	[KJ/mol]
calor de vaporización	0,510625	[KJ/gr]
calor de vaporización	510625	[J/Kg]

Almacenamiento

r1	36	m
r2	36,032	m
r3	36,522	m
r4	36,527	m
altura	28	m
volumen máx estanque	110012,0402	m ³
0,05% del volumen máx	55,00602011	m ³
k1 (estanque int.)	16,2	W/m°C
k2 (perlita expandida)	0,04	W/m°C
k3 (estanque ext.)	16	W/m°C
Peso LNG	483113298,1	N
masa LNG	49297275,32	Kg
presión columna LNG	122960,8352	Pa
P de trabajo	29000	Pa
P diseño	151960,8352	Pa
sigma	156,7096113	MPa
Límite elástico acero estanque int	215	MPa
0,75 x límite elástico	161,25	MPa
Qr	96885,32154	Watts
flujo másico boil-off	0,284608044	Kg/s
masa boil-off/día	24590,13497	Kg
vol boil-off/dia	54,87546523	m ³

Apéndice F

Single Burner Sub-X® Vaporizer

ADVANTAGES

High Thermal Efficiency

- High heat flux with low approach temperature
- Average thermal efficiency over 99%

Temperature Uniformity

- Patented weir provides high turbulence/recirculation, resulting in temperature uniformity
- No ice buildup on tubes

Fast Response

- Rapid startup and shut down without process upset
- Water bath mitigates process fluctuations during transition periods

Safety

- No flame impingement on LNG coils
- Heat exchange medium is water, eliminating the hazards and handling of ethylene glycol or other fluids

Economy

- Single burner units offer lower lifetime maintenance
- Pre-piped and pre-wired stainless steel tank configurations available
- Compact footprint
- Easily integrated with supplemental heat sources

DESIGN FEATURES

Single point water injection dramatically reduces NO_x emissions. By mounting the water spray at the tip of the burner nozzle, the flame temperature can be lowered, retarding the Zeldovich¹ mechanism for thermal NO_x . On average, NO_x levels have been lowered by over 50% using this technology.

Further improvements to water injection systems are underway.

CFD models of the burner have been created to simulate the burner temperature profile and identify new proprietary injection points designed to pinpoint high temperature regions surrounding the burner nozzle.

Employment of a High Excess Air (HEA) design with enhanced controls for primary air supply. HEA rates above 40% combined with the proper combination of primary and secondary air flow distribution lower CO emissions by approximately 60%. Proper mixing and careful control of oxygen concentrations during the initial combustion reaction allows the burner to operate at lower CO levels without increasing NO_x production.

Innovations to Achieve Lower Emissions.

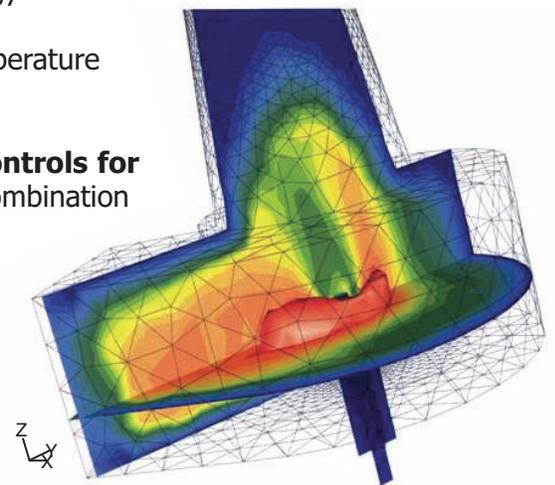
Many new technologies using alternative burner designs are under development at the SFPC technology center.

Flameless and premixed technologies are being explored to achieve ultra low emissions as an alternative to post combustion catalytic treatment.

Ability to incorporate alternative energy sources. As operating costs continue to rise, more resourceful ways of incorporating alternative energy sources are coming to light. SFPC is designing SCV's to operate with supplemental hot water/air streams from a variety of sources:

- condensing coils in the vaporizer tank for low pressure steam cycles
- direct injection of heated flue gas to augment the burner firing rate
- reverse cooling towers for supplemental heating of the bath water
- gas turbine quench tower hot water flows

The use of these supplemental heating sources reduces the already low vaporizer fuel requirements and associated emissions.



Contours of Static Temperature (f)

¹Zeldovich mechanism - thermal process consisting of two steps in a chain reaction where molecular oxygen and molecular nitrogen combine to form nitric oxide at high temperatures.