

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**  
**FACULTAD DE PETRÓLEO, GAS NATURAL Y PETROQUÍMICA**



**DETERMINACIÓN DEL MATERIAL, ESPESORES DE PARED Y  
AISLAMIENTO TÉRMICO PARA EL DISEÑO SEGURO DE UN TANQUE  
DE ALMACENAMIENTO DE GAS NATURAL LICUADO EN EL PERÚ.**

**TESIS**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO  
PETROQUÍMICO**

**ELABORADO POR:  
CRISTOBAL PAREDES TERRAZAS**

**PROMOCIÓN: 1990-1**

**LIMA – PERÚ  
2014**

**AGRADECIMIENTO**

*A mi familia y amigos.*

## SUMARIO

El gas natural licuado (GNL), es gas natural en estado líquido a presión atmosférica y temperatura de  $-162^{\circ}\text{C}$  ( $-260^{\circ}\text{F}$ ), que se almacena en un tanque especial aislado térmicamente. El GNL almacenado es transferido a barcos cargueros de la misma capacidad y transportado de los países con grandes reservas de gas natural a países consumidores de este recurso energético. En estos países se recibe y almacena el GNL en los mismos tanques y se re-gasifica para la distribución y consumo final este es el medio más económico para exportar gas natural.

Existen varios tipos de tanques para almacenar el GNL después de haber sido producido en una planta de licuefacción. Su estructura básica está compuesta por un tanque interno sin techo que contiene el GNL y un tanque externo cilíndrico cerrado con techo esférico fijo de diámetro mayor que rodea el tanque interno. La función principal del tanque externo será contener el aislante térmico que rodea el tanque interno, sostener internamente una plataforma suspendida que cubre el tanque interno y para el caso de una falla del tanque interno, está preparado para retener el GNL derramado. Los diferentes tipos de tanques son similares en sus componentes y varían en el costo debido a varios factores que se usan para el diseño y construcción, como el área disponible para su ubicación, la capacidad del tanque y la seguridad.

En este trabajo se presenta el diseño de un tanque de doble pared de acero, el material utilizado para la construcción del tanque interno y externo es acero de diferente aleación. La presión de operación será menor a 15 psig y el diseño toma como referencia la norma API 620, no se considera el diseño del tanque externo por ser básicamente un cálculo de esfuerzos estructurales y se usa los sistemas de unidades inglés y métrico para las ecuaciones y resultados finales.

## ÍNDICE

SUMARIO.....	ii
ÍNDICE.....	iii
<b>CAPÍTULO 1 - PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....</b>	<b>1</b>
1.1 Formulación del Problema.....	1
1.2 Justificación de la Investigación.....	1
1.3 Objetivo.....	2
1.4 Alcance de la Investigación.....	2
1.5 Hipótesis.....	2
<b>CAPÍTULO 2 - MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>3</b>
2.1 El Gas Natural.....	3
2.1.1 El Gas Natural para la Venta.....	3
2.2 El Gas Natural Licuado.....	4
2.2.1 La Densidad de Energía.....	4
2.2.2 La Calidad del GNL.....	5
2.3 El Proceso de Producción del GNL.....	5
2.3.1 El Procesamiento del Gas Natural.....	5
2.3.2 La Especificación del Gas Natural Procesado.....	6
2.3.3 La Planta de Licuefacción.....	6
2.3.4 Evaluación de la Localización para la Instalación de la Planta.....	6
2.3.5 La Tecnología de Licuefacción.....	7
2.4 Descripción de un Tanque para Almacenamiento de GNL.....	9
2.4.1 Descripción.....	9
2.4.2 Los Tipos de Tanques.....	9
2.4.2.1 Tanque de Doble Pared de Acero o Simple.....	10
2.4.2.2 Tanque Doble.....	11
2.4.2.3 Tanque Completo.....	12
2.4.2.4 Tanque de Membrana.....	13
2.4.2.5 Tanque Enterrado.....	14
2.5 Las Variables para Construir un Tanque para Almacenamiento	

de GNL.....	15
2.5.1 La Zona Geográfica en el Perú para la Instalación de Tanques para Almacenamiento de GNL.....	15
2.5.2 La Disponibilidad de Gas Natural.....	16
2.5.3 El Tamaño de una Planta de Licuefacción de Gas Natural.....	18
2.5.3.1 Determinación de la Capacidad de la Planta.....	18
2.5.4 El Precio de Venta del GNL.....	18
2.5.4.1 Los Riesgos en la Ejecución de un Proyecto de GNL.....	19
2.5.5 Las Variables de Diseño para el Tanque.....	19
2.5.5.1 Especificaciones Técnicas.....	20
2.5.5.2 Localización de la Planta de GNL.....	20
2.5.5.3 Capacidad de los Tanques.....	20
2.5.5.4 La Instrumentación.....	21
2.5.5.4-a El Control del <i>Boiloff</i> .....	21
2.5.5.4-b El Control de la Presión.....	21
2.5.5.5 La Transferencia de Calor.....	22
2.5.5.5-a Transferencia de Calor por Conducción en una Pared Plana.....	23
2.5.5.5-b Transferencia de Calor por Conducción en un Cilindro.....	23
2.5.5.6 El Aislamiento Térmico.....	24
2.5.5.6-a Materiales.....	25
2.5.5.6-b Material para Refrigeración.....	25
2.5.5.7 Transferencia de Calor en el Tanque por su Geometría.....	26
2.6 Aplicación de las Normas para el Diseño.....	26
2.6.1 Alcance de las Norma API 620.....	26
2.6.2 Las Consideraciones Generales para el Diseño.....	27
2.6.2.1 La Densidad del Líquido Almacenado.....	27
2.6.2.2 Diseño de la Temperatura del Metal.....	27
2.6.3 Diseño del Tanque Interior.....	28
2.6.3.1 Temperatura.....	28
2.6.3.2 Material.....	28
2.6.3.2-a Prueba de los Materiales.....	28
2.6.3.2-b Prueba de los Componentes Estructurales.....	28
2.6.3.3 Espesor de la Pared del Tanque.....	28
2.6.3.4 Esfuerzo de Tensión Máximo Permitido.....	30

2.6.3.4-a	Para otras Formas del Tanque.....	30
2.6.4	Carga Sísmica en el Tanque.....	30
2.6.5	Estabilidad del Tanque.....	32
2.6.5.1	El Momento de Volteo.....	32
2.6.5.2	La Resistencia al Volteo.....	33
2.6.5.3	La Estabilidad de la Pared.....	34
2.6.5.4	La Altura de Onda para el Modo Convectivo o <i>Sloshing</i> .....	34
2.6.6	Diseño del Tanque Exterior.....	37
2.6.6.1	Selección del Material.....	37
2.6.6.2	Techo del Tanque.....	37
2.6.6.3	Base del Tanque.....	38
2.6.6.3-a	Carga en la Base.....	38
2.6.6.3-b	Fuerza de Levantamiento y Pesos de Gravedad.....	39
2.6.7	Prueba de Materiales y Estructuras.....	39
2.6.7.1	Prueba para Tuberías Conexiones y Accesorios.....	39
2.6.7.2	Prueba del Tanque Interno.....	39
2.6.7.3	Prueba del Tanque Externo.....	40
2.6.7.4	Prueba Neumática.....	40
2.6.7.5	Pruebas Preliminares.....	40
2.7	Matriz de Consistencia.....	41
<b>CAPÍTULO 3 - CÁLCULO DEL DISEÑO.....</b>		<b>42</b>
3.1	Elección del Material para el Tanque.....	43
3.1.1	El Aislamiento Térmico.....	43
3.1.1.1	Pared del Tanque.....	43
3.1.1.2	Techo del Tanque.....	44
3.1.1.3	Fondo del Tanque.....	44
3.2	Cálculo del Espesor.....	45
3.3	Cálculo del Espesor Considerando el Factor Sísmico.....	46
3.4	La Estabilidad Sísmica del Tanque.....	47
3.4.1	El Momento de Volteo.....	47
3.4.2	La Resistencia al Volteo.....	48
3.4.3	La Estabilidad de la Pared para Tanques Desanclados.....	48
3.4.4	Cálculo de la Altura de la Onda de Modo Convectivo.....	48

3.5	Cálculo del Espesor del Aislante Térmico.....	49
3.6	La Estructura del Tanque.....	52
3.6.1	Detalles de la Estructura.....	52
3.7	Consideraciones para Establecer los Costos en la Construcción de un Tanque para Almacenamiento de GNL.....	53
<b>CAPÍTULO 4 - CONCLUSIONES.....</b>		<b>55</b>
	Conclusiones.....	55
	Recomendaciones.....	56
<b>CAPITULO 5 - BIBLIOGRAFÍA.....</b>		<b>58</b>
<b>ANEXOS.....</b>		<b>61</b>
Anexo N° 1	Propiedades del GNL.....	61
Anexo N° 2	Reservas de Gas Natural en el Lote 88 y 56 en Camisea – Perú.....	65
Anexo N° 3	Comisionado.....	66
Anexo N° 4	Construcción del Tanque.....	68
Anexo N° 5	Cuadros.....	71
Anexo N° 6	Listado de Abreviaturas.....	83

## LISTADO DE CUADROS

Nº 2.1	Propiedades del Metano.....	71
Nº 2.2	Tamaño de Plantas de Producción de GNL en el Mundo.....	72
Nº 2.3	Índices Mundiales de Precios del Gas Natural.....	73
Nº 2.4	Materiales ASTM Para el Tanque Interno.....	74
Nº 2.5	Valores de Impacto de Prueba Charpy v-notch.....	75
Nº 2.6	Máximos Valores de Esfuerzos Admisibles.....	76
Nº 2.7	Función $c_0$ para Efectos Sísmicos Impulsivos en Tanques Rígidos.....	77
Nº 2.8	Función $c_1$ para Efectos Sísmicos Convectivos en Tanques Rígidos.....	78
Nº 2.9	Factor de Zona Sísmica.....	79
Nº 2.10	Coefficientes de Suelo.....	80
Nº 2.11	Materiales para el Tanque Externo.....	81
Nº 2.12	Temperatura de Metal.....	82
Nº 3.1	Calculo del Espesor del Tanque Interno.....	45
Nº 3.2	Calculo del Espesor del Tanque Interno Considerando el Factor Sísmico.....	46



## LISTADO DE FIGURAS

2-1	Diagrama del Proceso de Producción de GNL.....	8
2-2	Tanque Simple.....	10
2-3	Tanque Doble.....	11
2-4	Tanque Completo.....	12
2-5	Tanque de Membrana.....	13
2-6	Tanque Enterrado.....	14
2-7	Gaseoducto Sur Peruano.....	17
2-8	Transferencia de Calor en una Pared Plana.....	23
2-9	Transferencia de Calor en un Cilindro.....	24
2-10	Curva de los Factores $W_1/W_T$ y $W_2/W_T$ vs. $D/H$ .....	35
2-11	Curva de los Factores $X_1/H$ y $X_2/H$ vs. $D/H$ .....	35
2-12	Curva de Factor $k$ vs. $D/H$ .....	36
3-1	Transferencia de Calor vs. Espesor de Aislamiento.....	51

## CAPÍTULO 1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

### 1.1 Formulación del Problema

Los tanques para almacenamiento de GNL tienen que ser diseñados y construidos para almacenar un líquido a la temperatura de  $-162^{\circ}\text{C}$  ( $-260^{\circ}\text{F}$ ) y presión no mayor de 15 psig.

Esto nos conduce a plantear las siguientes preguntas:

¿Qué variables deben definirse para el diseño seguro de un tanque para almacenamiento de GNL?

¿Qué materiales se utilizan para contener gas natural licuado a  $-162^{\circ}\text{C}$  ( $-260^{\circ}\text{F}$ ) y la importancia del tanque externo?

¿Qué espesor y como se utiliza el aislamiento térmico para evitar o controlar la evaporación del producto almacenado?

¿En general que provisiones se tiene que tomar de acuerdo a las normas técnicas para un diseño seguro de un tanque para almacenamiento de GNL?

### 1.2 Justificación de la Investigación

- El GNL se tiene que almacenar en tanques de gran capacidad para ser económicamente rentable y aunque estos tanques tienen una capacidad de almacenamiento entre  $7000\text{ m}^3$  a  $200000\text{ m}^3$  y se utilizan en varias etapas del proceso de comercialización de acuerdo a su tamaño, son los tanques con una capacidad mayor a  $100000\text{ m}^3$  los más utilizados para el almacenamiento de GNL.
- Conocer cómo se almacenará el GNL en tanques de gran capacidad a presión atmosférica, temperatura de  $-162^{\circ}\text{C}$  y un volumen del líquido que es 600 veces menor que el volumen del gas natural antes de ser licuado. Este cambio de estado y de volumen del gas natural asegura la viabilidad de un proyecto de exportación por las grandes cantidades manejadas y donde el almacenamiento es la parte fundamental para transportar y comercializar el gas natural.
- Definir las características principales de los tanques para almacenamiento de GNL su diseño para almacenar de manera segura y confiable y que no será peligroso para el hombre y el medio ambiente.

- Siendo actualmente el Perú un país exportador de gas natural, con contratos firmados para la explotación y comercialización de gas natural por un período mayor a 20 años y de exploración y desarrollo de nuevas reservas de gas natural existe la posibilidad de seguir exportando este recurso. Esto significa incrementar la producción y por lo tanto la construcción de más tanques para almacenamiento de GNL.

### **1.3 Objetivo**

Determinar las variables para un diseño seguro para el almacenamiento de gas natural licuado a  $-162^{\circ}\text{C}$ .

### **1.4 Alcance de la Investigación**

El presente trabajo no abordará los siguientes aspectos:

- El diseño del tanque externo.
- La operación del tanque para almacenamiento de GNL.
- El diseño de estructuras internas del tanque interno, equipos, instrumentación y otras instalaciones.
- El estudio de los aislantes térmicos.
- El estudio de estructuras civiles y de suelo.
- El estudio económico del tanque.

### **1.5 Hipótesis**

Los materiales y espesores adecuados de la pared del tanque interno y del aislamiento térmico respectivamente permitirán el diseño seguro de un tanque para almacenamiento de gas natural licuado en el Perú.

## CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO

### 2.1 El Gas Natural

El gas natural [1] es una de las varias e importantes fuentes de energía no renovables formada por una mezcla de gases ligeros que se encuentra disuelto o asociado en yacimientos de petróleo y en depósitos de carbón. La mayor cantidad de componentes que contiene son los hidrocarburos parafínicos cuya fórmula molecular general es  $C_nH_{2n+2}$  y algunas olefinas e hidrocarburos cíclicos, que pueden estar presentes en pequeñas cantidades. Aunque su composición varía en función del yacimiento del que se extrae, está compuesto principalmente por metano en cantidades que comúnmente pueden superar el 90 o 95% (por ejemplo, el gas no asociado del pozo *West Sole* en el mar del norte) y suele contener otros gases como nitrógeno,  $CO_2$ ,  $H_2S$ , Helio y mercaptanos.

Desde su descubrimiento [2] reportado en Fredonia, Nueva York en 1821, el gas natural ha sido usado comercialmente como combustible por 193 años en el continente americano y por centurias en China, al principio se usaba solo en las áreas colindantes con los campos de gas, luego se construyeron ductos de transporte y distribución y se descubrieron mayores reservas, así su uso se hizo indispensable como combustible.

#### 2.1.1 El Gas Natural para la Venta

El gas natural es procesado para obtener un producto con el mayor porcentaje de metano, un pequeño porcentaje de etano y rastros de propano. Es conducido por ductos de transmisión hasta otras instalaciones que se encuentran cercanas a las ciudades de mayor consumo de energía, allí se reduce la presión y se distribuye para su comercialización. Este es el gas natural con el que vamos a tratar de aquí en adelante.

## 2.2 El Gas Natural Licuado

El GNL, es gas natural [3] que ha sido procesado para ser transportado y almacenado en forma líquida y es la mejor alternativa para monetizar reservas en sitios apartados donde no es económico llevar el gas al mercado directamente ya sea por gasoducto o mediante su uso final que es la generación de electricidad.

El GNL, es gas natural metano ( $\text{CH}_4$ ) en su mayor parte; ver Cuadro N° 2.1, que es convertido temporalmente en líquido para facilitar su almacenamiento y transporte ocupa un volumen 600 veces menor que el volumen de gas natural en estado gaseoso, no tiene olor, color, no es tóxico y no es corrosivo. Los riesgos para la salud son la inflamabilidad, congelamiento y la asfixia. Ver Anexo N° 1.

El proceso de licuefacción comprende la remoción de componentes tales como; la suciedad, los gases ácidos, el helio, el agua e hidrocarburos pesados, los cuales pueden causar problemas en las instalaciones de la planta y los equipos de licuefacción, después el gas natural es condensado a líquido a una presión atmosférica cercana a 25 kpa (3.6 psig) mediante un proceso de enfriamiento que alcanza la temperatura mínima aproximada de  $-162^\circ\text{C}$ . De esta manera el GNL logra reducir su volumen mucho más que el gas natural comprimido. El valor calórico del GNL es 2.4 veces más que el gas natural comprimido y 0.6 veces la del diesel, esto hace que el costo para transportar gas natural largas distancias sea más económico por que los mayores consumidores están ubicados generalmente en países desarrollados de diferentes regiones del planeta y no es posible utilizar ductos para el transporte de gas natural.

### 2.2.1 La Densidad de Energía

El valor calórico depende de la fuente del gas natural y del proceso para licuar este producto. El valor calórico más alto para el GNL es 24 MJ/lt y el valor calórico más bajo es de 21 MJ/lt o 563623 btu/ft<sup>3</sup>. Para el propósito de comparación entre los diferentes combustibles, el valor calórico es también conocido como la densidad de energía expresada en MJ/lt o el equivalente de galón gasolina expresado en btu/ft<sup>3</sup>. La densidad de energía del GNL es 2.4 veces mayor que el de gas natural comprimido, lo cual hace más económico el transporte de gas natural en barcos, pero en forma de GNL. También se puede comparar con el propano y el etano en valor

calórico pero es solo 0.6 veces la del diesel y 0.7 veces de la gasolina.

La densidad de GNL tiene un valor que está entre  $410 \text{ Kg/m}^3$  a  $500 \text{ Kg/m}^3$  dependiendo de la temperatura, presión y composición, comparado con la densidad del agua cuyo valor es  $1000 \text{ Kg/m}^3$ .

### 2.2.2 La Calidad del GNL

La calidad es uno de los factores más importantes en el negocio de la industria del GNL, cualquier gas que no cumpla las especificaciones acordadas en la venta y los contratos de compra, está calificado como fuera de especificación o fuera de calidad de gas o GNL. Estas regulaciones sirven a tres propósitos:

- Asegurar que el gas distribuido no sea corrosivo ni tóxico bajo los máximos niveles permitidos de los componentes contaminantes, para el sulfuro de hidrógeno sulfuros totales, el dióxido de carbono y el contenido de mercurio.
- Proteger de la formación de líquidos o hidratos a la red de distribución de gas natural mediante el máximo valor permitido de agua contenido en el gas natural y de la medición del punto de rocío de los hidrocarburos.
- Permitir el intercambio de gases distribuidos por diferentes vendedores, mediante límites en la variación de un rango de parámetros que afectan la combustión. Estos parámetros son; el contenido de gases inertes, el valor calórico el índice *woobbe*, el índice *soot*, el factor de combustión incompleta y el índice *yellow tip*.

## 2.3 El Proceso de Producción del GNL

### 2.3.1 El Procesamiento del Gas Natural

En su estado natural el gas natural [4] contiene muchas impurezas que tienen que ser eliminadas por varias razones:

- El vapor de agua, para prevenir la formación de hidratos.
- El dióxido de carbono, para prevenir los problemas de corrosión y mantener un alto valor calórico del gas.
- El sulfuro de hidrógeno, por razones de seguridad.
- Finalmente, separar los hidrocarburos más pesados que el metano para evitar la formación de líquidos durante el transporte y venderlos en forma separada.

En todo caso la especificación del gas para la venta será la que determine el grado de proceso requerido.

### 2.3.2 La Especificación del Gas Natural Procesado

- Es importante determinar la especificación del gas natural en términos del valor calórico, para propósitos de transferencia de custodia. Esto es necesario para que el consumidor pueda diseñar y operar sus equipos adecuadamente.
- El punto de rocío de los hidrocarburos es la presión y la temperatura a la cual se pueden formar líquidos de hidrocarburos. Esto afecta el transporte normal del gas natural.

### 2.3.3 La Planta de Licuefacción

La planta [5] tiene las siguientes instalaciones:

- La planta o tren de procesos para producir GNL.
- Instalaciones marítimas de muelle y dique para la exportación o importación.
- Ducto para la conexión con gasoducto desde la zona de producción.
- Tanques para el almacenamiento de GNL.

### 2.3.4 Evaluación de la Localización para la Instalación de la Planta

Se hace una detallada evaluación para la localización de la planta, que incluye lo siguiente:

- Estudios medioambientales de la zona cercana a las instalaciones de la planta.
- Estudios geotécnicos *onshore* y *offshore* para asegurar una construcción segura de la planta, el muelle y el dique.
- Arqueología de la zona, para evitar dañar el patrimonio nacional.
- Evaluación socio-económica de las poblaciones cercanas a las instalaciones de la planta.

### 2.3.5 La Tecnología de Licuefacción

La planta de GNL tiene características de diseño inusuales debido a la carga de gas que maneja, que son los componentes más livianos obtenidos inicialmente de la extracción de líquidos de gas natural en la planta de tratamiento y donde los hidrocarburos más pesados que el etano han sido removidos. Por lo tanto, el gas de alimentación de la planta está compuesto mayormente de metano y etano, trazas de propano y gases inertes. Esta planta tiene un arreglo del proceso para la licuefacción del gas natural muy fácil de comprender:

- Los contaminantes de gas ácido, básicamente el dióxido de carbono es extraído mediante el uso del proceso BASF de metil-dietanolamina activado.
- El gas natural saturado de agua, es enfriado para condensar cerca de la mitad de agua, para luego ser tratado mediante un proceso de transferencia de moléculas a través de capas de sieve molecular, para remover a menos de 1 ppm por volumen la cantidad de agua y prevenir del congelamiento y obstrucción a la unidad de licuefacción criogénica.

Para el tratamiento de los rastros de mercurio en el gas de alimentación si es que se encuentra alguna traza, se agrega como precaución una etapa de carbón activado que está incluido antes del intercambiador de calor principal.

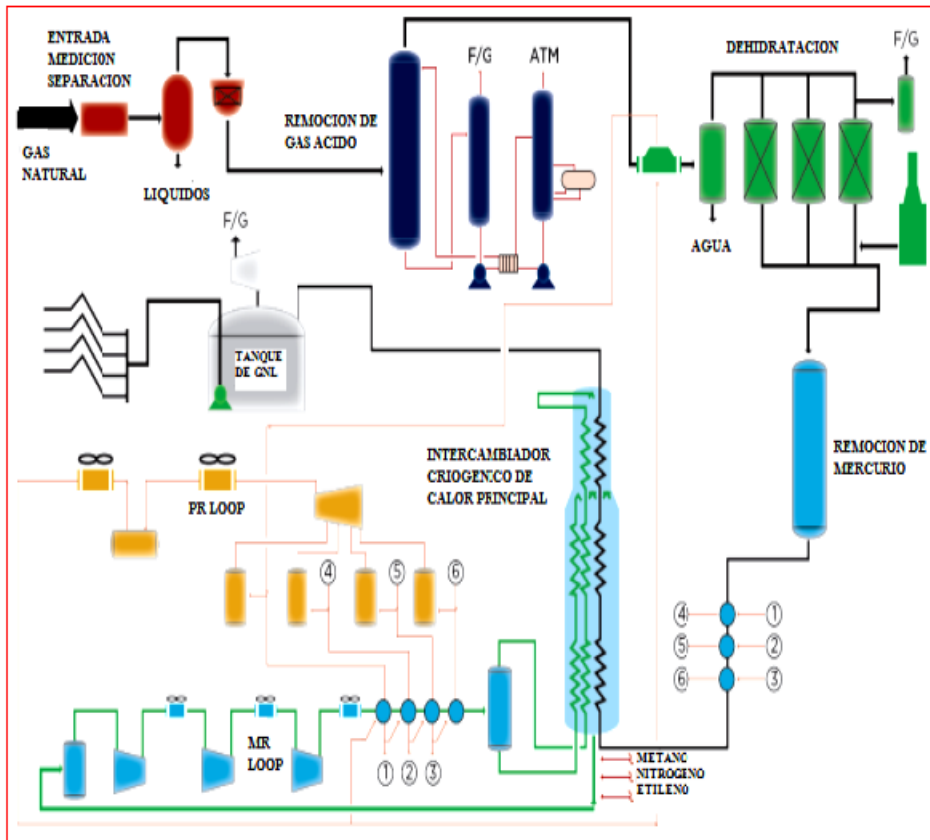
La tecnología de licuefacción está basada en el proceso más utilizado en la actualidad conocido con el nombre de *Air Products Split MR*, proceso de refrigeración de componentes refrigerantes mezclados y pre-enfriados con propano.

El gas natural ya procesado es pre-enfriado usando como refrigerante el propano para cuatro niveles de presión y temperatura en descenso. Una vez enfriado por el propano, el gas natural entra directamente al intercambiador criogénico principal de calor *MCHE* (*Main Cryogenic Heat Exchanger*), sin ninguna columna de agotamiento. Ver figura 2-1.

En el *MCHE*, el gas natural es totalmente enfriado y condensado por una mezcla de refrigerantes *MR* (*Mixed Refrigerants*), la presión del GNL sub-enfriado saliendo del *MCHE* es reducida por una válvula de control y enviada a los tanques de GNL.



FIGURA 2-1  
 DIAGRAMA DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE GNL



Fuente: [5]

## 2.4 Descripción de un Tanque para Almacenamiento de GNL

### 2.4.1 Descripción

- Un tanque para almacenamiento de GNL [3] es un tipo de tanque cilíndrico diseñado fabricado y construido específicamente para resistir temperaturas muy bajas.
- Los tanques para el almacenamiento de GNL pueden ser construidos sobre o bajo el nivel del piso y pueden ser transportables.
- La característica común es la habilidad para almacenar el GNL a la temperatura de  $-162^{\circ}\text{C}$  ( $-260^{\circ}\text{F}$ ).
- Los tanques de almacenamiento de GNL tienen doble pared, la cual está conformada por un tanque interno para el almacenamiento el GNL y un tanque externo de un diámetro un poco mayor que rodea al tanque interno, el espacio anular entre los dos tanques concéntricos sirve para contener el aislante térmico.

### 2.4.2 Los Tipos de Tanques

El tanque interno [6] es el componente primario en el almacenamiento de GNL. Está diseñado y construido de acuerdo con las normas internacionales que garantizan una operación segura y también contra una eventual falla estructural. El tanque externo es el componente secundario, construido para contener el material aislante y soportar las cargas de los accesorios y otras estructuras.

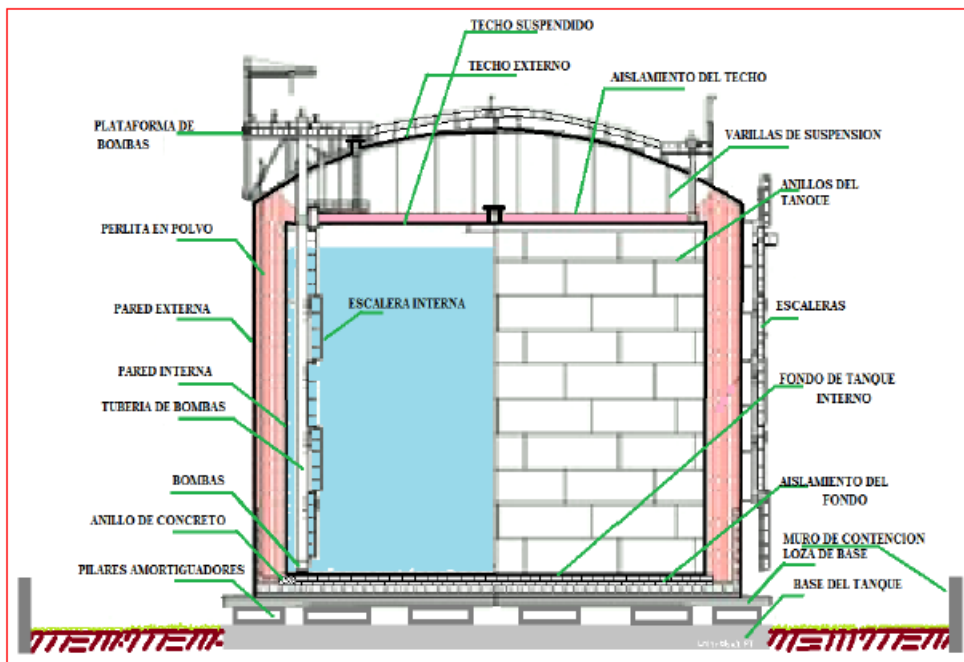
Actualmente hay varios tipos de tanques para almacenamiento de GNL y estos son cinco:

- 2.4.2.1 Tanque de doble pared de acero o simple.
- 2.4.2.2 Tanque doble.
- 2.4.2.3 Tanque completo.
- 2.4.2.4 Tanque de membrana.
- 2.4.2.5 Tanque enterrado.

### 2.4.2.1 Tanque de Doble Pared de Acero o Simple

Compuesto de un tanque interno cilíndrico hecho de acero de aleación al 9% de níquel que almacenará el GNL. Se encuentra rodeado por un tanque externo de acero al carbono de diámetro mayor, el espacio anular entre estos dos tanques sirve para contener el material aislante que generalmente es la perlita, ver figura 2-2. El acero al carbono del tanque externo no está diseñado para contener el material criogénico; por lo tanto, el tanque interno es el único que contendrá el GNL. El tanque está rodeado por un muro de contención en caso de derrame por la falla del tanque interno. Estos tanques tienen una alta confiabilidad y la mayoría de los tanques de este tipo requieren un área relativamente grande para su instalación.

FIGURA 2-2  
TANQUE SIMPLE



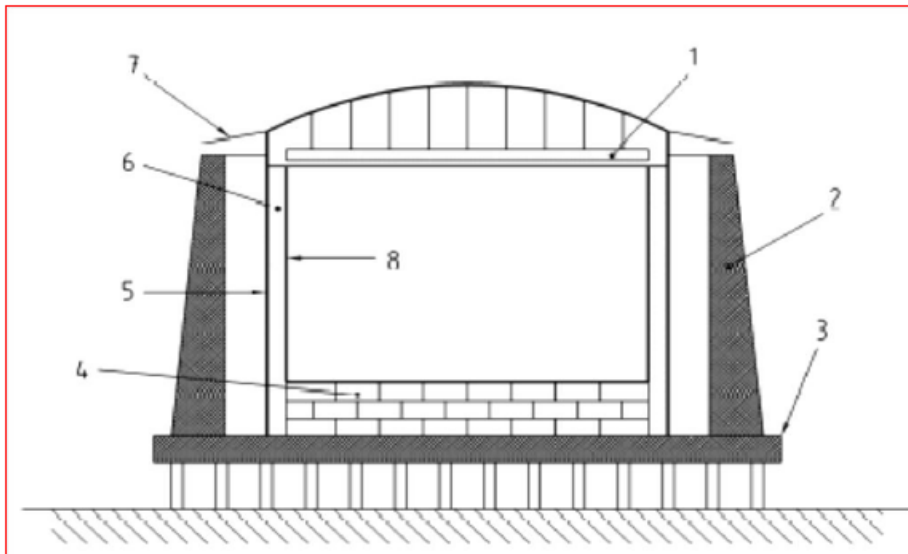
Fuente: Elaboración propia

### 2.4.2.2 Tanque Doble

Este tanque es similar a un tanque simple y no tiene muro de contención, en su lugar se asegura el tanque interno con un tanque externo cuyas paredes son de concreto material capaz de contener el líquido en caso que el tanque interno colapse, ver figura 2-3.

El uso de concreto incrementa el costo del tanque pero el área requerida es menor por que se elimina el espacio que rodea el muro de contención.

FIGURA 2-3  
TANQUE DOBLE



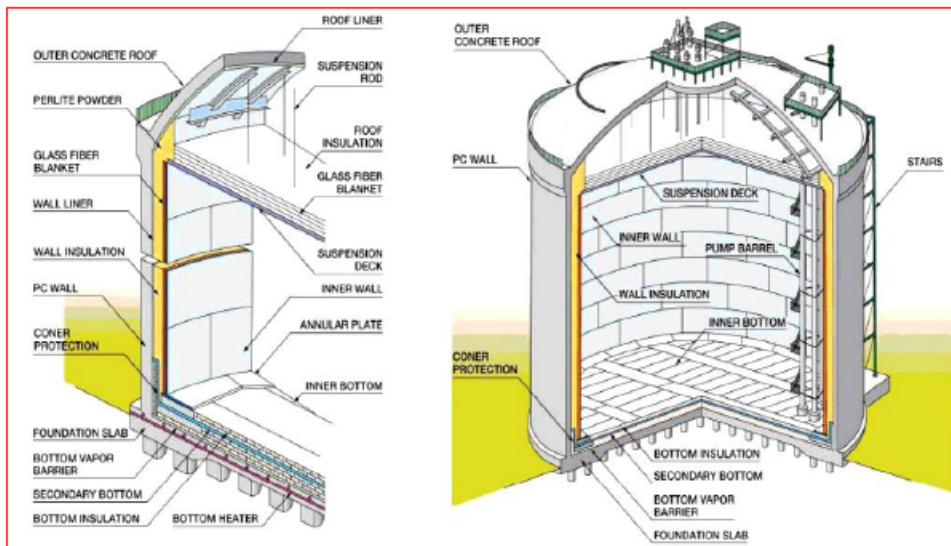
Fuente: [6]

1. Techo suspendido con aislamiento termico
2. Contenedor secundario de concreto pre tensado
3. Base elevada
4. Aislamiento termico de la base
5. Pared exterior no diseñado para contener el líquido en caso de derrame
6. Aislamiento termico del tanque interno
7. Techo
8. Tanque interno

### 2.4.2.3 Tanque Completo

Este tanque es considerado de doble almacenamiento y el espacio anular entre el tanque externo e interno es sellado. El líquido derramado del tanque interno puede ser contenido como GNL en el tanque externo, el cual está construido de concreto reforzado y el techo puede ser también de metal, ver figura 2-4.

FIGURA 2-4  
TANQUE COMPLETO



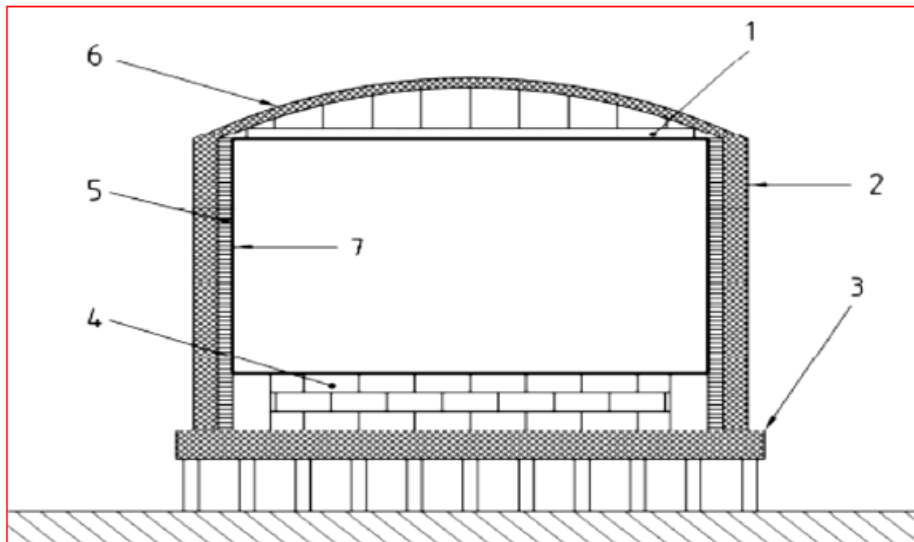
Fuente: [6]

- |  |   |
|--|---|
| 1. <i>Roof insulation</i> .- aislamiento de techo          | 11. <i>Bottom vapor barrier</i> .-barrera de vapor    |
| 2. <i>Perlite powder</i> .- polvo de perlita               | 12. <i>Secondary bottom</i> .- fondo secundario       |
| 3. <i>Outer concrete roof</i> .- techo externo de concreto | 13. <i>Foundation slab</i> .- losa de la base         |
| 4. <i>Roof liner</i> .- forro de techo                     | 14. <i>Bottom heater</i> .- calentador de fondo       |
| 5. <i>Roof insulation</i> .- aislamiento del techo         | 15. <i>Inner bottom</i> .- fondo interno              |
| 6. <i>Fiber glass blanket</i> .- capa de fibra de vidrio   | 16. <i>Bottom insulation</i> .- aislamiento del fondo |
| 7. <i>Suspension rod</i> .- varillas de suspensión         | 17. <i>Stairs</i> .- escaleras                        |
| 8. <i>Suspension deck</i> .- plataforma suspendida         | 18. <i>Annular plate</i> .- plancha anular            |
| 9. <i>Wall liner</i> .- forro de la pared                  | 19. <i>Inner wall</i> .- pared interna                |
| 10. <i>Wall insulation</i> .- aislamiento de la pared      | 20. <i>Pump barrel</i> .- tubería de bombas           |

#### 2.4.2.4 Tanque de Membrana

Este tanque tiene las paredes de concreto, con una capa de aislante interna cubierta por una delgada membrana de acero inoxidable corrugado en contacto con el GNL. En este diseño, el tanque de concreto soporta la carga hidrostática o peso del líquido que es trasferido a través de la membrana y el aislante. Esto significa que la membrana no tiene un soporte estructural propio, esta membrana es capaz de comprimirse y expandirse con la temperatura cambiante, ver figura 2-5.

FIGURA 2-5  
TANQUE DE MEMBRANA



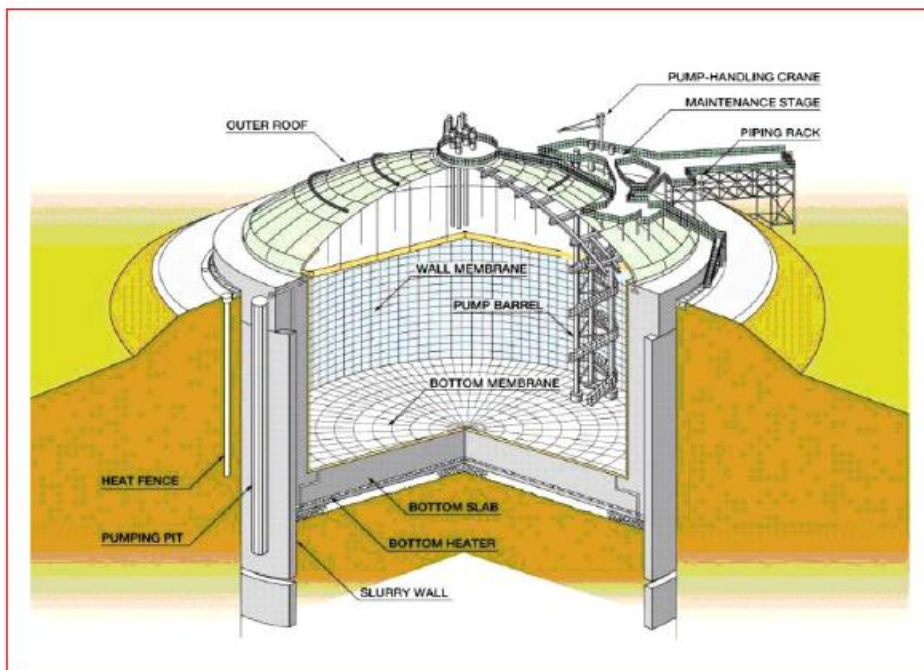
Fuente: [6]

1. Techo suspendido con aislamiento térmico
2. Concreto secundario pre-tensado
3. Base de concreto reforzado
4. Aislamiento térmico de la base
5. Aislamiento térmico del tanque interno
6. Techo de concreto reforzado
7. Membrana del tanque interno

### 2.4.2.5 Tanque Enterrado

Los tanques enterrados no son visibles a simple vista. Son tanques que necesitan de más tiempo para ser construidos y su costo es más elevado que los tanques sobre la superficie, estos tanques son especialmente utilizados en países que no disponen de mucho espacio para la construcción de un tanque de gran volumen en la superficie ver figura 2-6.

FIGURA 2-6  
TANQUE ENTERRADO



Fuente: [6]

- |   |  |
|---|--|
| 1. <i>Outer roof</i> .- techo externo                   | 7. <i>Bottom membrane</i> .- membrana de fondo     |
| 2. <i>Pump handling crane</i> .- grúa para la bomba     | 8. <i>Bottom slab</i> .- losa de fondo             |
| 3. <i>Maintenance stage</i> .- espacio de mantenimiento | 9. <i>Bottom heater</i> .- calentador de fondo     |
| 4. <i>Piping rack</i> .- soporte de tuberías            | 10. <i>Slurry wall</i> .- pared de mezcla de barro |
| 5. <i>Wall membrane</i> .- membrana de pared            | 11. <i>Heat fence</i> .- poste de calor            |
| 6. <i>Pump barrel</i> .- tubería para las bombas        | 12. <i>Pumping pit</i> .- hoyo de bombeo           |

## **2.5 Las Variables para Construir un Tanque para Almacenamiento de GNL**

Las variables a considerar son las siguientes:

- 2.5.1 La zona geográfica en el Perú para la instalación de tanques para almacenamiento de GNL.
- 2.5.2 La disponibilidad de gas natural.
- 2.5.3 El tamaño de una planta de licuefacción de gas natural.
- 2.5.4 El precio de venta del GNL.
- 2.5.5 Las variables de diseño para el tanque.

### **2.5.1 La Zona Geográfica en el Perú para la Instalación de Tanques para Almacenamiento de GNL**

Como parte de un plan para el desarrollo energético en el país, se ha propuesto la descentralización en la distribución de la energía hacia otras regiones del Perú diferentes a la región de Lima, que es donde se concentran las plantas de generación eléctrica que usan el gas natural como combustible, el cual representa el 40% de todo el consumo en el país.

En la actualidad se está explotando y produciendo gas natural en las reservas del Lote 56 y 88 de la región Cuzco para el consumo nacional y exportación de GNL respectivamente.

Con el incremento de las reservas de gas natural encontradas y el hallazgo de mas reservas en los lotes 57 y 58, se presentó el proyecto de ley 1396/2012-PE denominado; Ley que Afianza la Seguridad Energética y Promueve el Desarrollo de un Polo Petroquímico en el Sur del País, con esta ley se pretende descentralizar el consumo del gas natural en todo el Perú mediante un plan de desarrollo integral para fortalecer la seguridad energética del país, creando un complejo energético e industrial petroquímico y para la exportación del GNL.

La zona geográfica a considerar para la instalación de plantas de energía e instalaciones industriales que cumplen los requisitos básicos establecidos en el proyecto de ley, se encuentra ubicado en la región sur del país, en la provincia de Ilo de la región Moquegua.

Esta zona tiene la ventaja de ser una zona industrial y poseer una franja costera adecuada para la infraestructura portuaria; asimismo, como parte de este proyecto se



vienen implementando las bases para la construcción de un gasoducto denominado Gasoducto Sur Peruano que atravesaría toda la región sur del Perú con el tramo final hasta la provincia de Ilo, ver figura 2-7.

Es así que por el impacto socio-económico producido por un proyecto industrial y energético basado en el gas natural y por el desarrollo de infraestructura para la región sur del país, la instalación de tanques de almacenamiento de GNL estaría en la provincia de Ilo.

### 2.5.2 La Disponibilidad de Gas Natural

Los proyectos de GNL representan miles de millones de dólares de inversión, esto requiere la participación de compañías que estén integradas en todo el proceso del proyecto, con unidades de exploración, producción, distribución y comercialización. Además, se debe demostrar tener la solvencia económica y el aval de entidades financieras que contribuyan con el capital de inversión. Todos estos factores han creado una industria donde el riesgo de inversión es bajo, con contratos de compra y venta de gas natural a largo plazo por un período aproximado de 30 años y principalmente tener las reservas probadas con una cantidad mínima de 11 trillones de  $\text{ft}^3$  o 0.3115 trillones de  $\text{m}^3$ . Ver Anexo N° 2.

Haciendo el cálculo para el GNL de exportación:

VGNL : volumen de GNL

VGNLA : volumen de GNL disponible por año

$$\text{VGNL} = 0.3115/600$$

$$\text{VGNL} = 520 \text{ MMm}^3$$

$$\text{VGNLA} = 17.33 \text{ MMm}^3$$

El VGNLA de  $17.33 \text{ MMm}^3$  hace posible la construcción de tanques de gran capacidad.

FIGURA 2-7  
GASEODUCTO SUR PERUANO



Fuente: [25]

### 2.5.3 El Tamaño de una Planta de Licuefacción de Gas Natural

En el Cuadro N° 2.2 se lista la capacidad mínima para una planta de esta clase con aproximadamente 4 MTPA de producción, si la densidad promedio del GNL es igual a  $450 \text{ Kg/m}^3$ ; puede variar por la temperatura, presión y composición, tenemos lo siguiente:

VPA : volumen anual de producción de GNL

$$\text{VPA} = 4 \times 10^9 / 450 = 9 \text{ MMm}^3$$

Entonces la construcción de una planta de procesamiento de GNL con sus tanques de almacenamiento es posible.

#### 2.5.3.1 Determinación de la Capacidad de la Planta

VPD : volumen de producción diaria de la planta

$$\text{VPD} = 24300 \text{ m}^3/\text{día}$$

Este resultado es para una capacidad mínima de operación diaria de la planta, por lo que se necesitará tanques para almacenamiento de GNL con un volumen mayor a  $100000 \text{ m}^3$ .

### 2.5.4 El Precio de Venta del GNL

La compañía propietaria del proyecto de producción, almacenamiento y venta final del GNL tendrá un margen rentable entre el precio de venta del GNL expresado en US\$/MMbtu y el valor pagado en boca de pozo. Determinar el precio en un período de 30 años para que el proyecto sea rentable debido al constante cambio de precios en los mercados internacionales; ver Cuadro N° 2.3, hace que los contratos de venta sean estrictos y estén debidamente estructurados para que el precio de venta del GNL se mantenga fijo en el tiempo y asegure un retorno de la inversión.

Para encontrar el valor de venta final aproximado del GNL, cuya densidad de energía promedio es igual a  $604000 \text{ btu/ft}^3$  tenemos:

CCA : Cantidad de calor equivalente en la venta de 4 MTPA

$$CCA = 4 \times 10^9 (604000) 35.3/450 = 190 \times 10^6 \text{ MMbtu}$$

En el Cuadro N° 2.3 se puede ver una variación significativa entre el valor mínimo y máximo para el precio de 1MMbtu en un período de 3 años. Entonces un cálculo del flujo de caja mínimo y máximo aproximado durante este tiempo es:

VVAmin : valor de venta anual mínimo

VVAmax : valor de venta anual máximo

$$VVAmin = 4 \times 190 \times 10^6 = 760 \text{ MMUS\$}$$

$$VVAmax = 13 \times 190 \times 10^6 = 2470 \text{ MMUS\$}$$

#### 2.5.4.1 Los Riesgos en la Ejecución de un Proyecto de GNL

Debido a que los proyectos de GNL están basados en contratos de compra y venta a largo plazo, la mayor parte de los riesgos se encuentran en tener la disponibilidad del gas natural para el proyecto, en la estabilidad de los países donde se ejecuta el proyecto, en los países donde se vende el GNL y en la habilidad del grupo que está ejecutando el proyecto. Para entender las complejidades de la cadena de producción de GNL y lograr una rentabilidad que asegure la viabilidad del proyecto durante toda su vida útil las características de un buen proyecto de GNL incluye:

- Bajos costos de infraestructura y producción del GNL.
- Bajos costos de transporte del GNL y otros productos líquidos.
- Buena estructura y dirección de la compañía para la ejecución del proyecto.
- Ambiente fiscal atractivo.
- Confianza de los compradores en la ejecución y estabilidad del proyecto.
- Seguridad de un mercado para la venta.
- Índice del precio del gas para cambios de mercado.
- Proyecto que sea fácilmente financiable.

#### 2.5.5 Las Variables de Diseño para el Tanque

Las variables de diseño para el tanque son las siguientes:

2.5.5.1 Especificaciones técnicas.

2.5.5.2 Localización de la planta de GNL.

2.5.5.3 Capacidad de los tanques.

2.5.5.4 Instrumentación.

2.5.5.5 La transferencia de calor.

2.5.5.6 El aislamiento térmico.

#### **2.5.5.1 Especificaciones Técnicas**

Las especificaciones técnicas [7] generales para esta clase de tanque son:

- Tanque interno de acero de aleación al 9% de níquel.
- Tanque externo de acero al carbono de alta resistencia.
- Techo suspendido para el tanque interno.
- Capacidad mínima de almacenamiento de  $100000 \text{ m}^3$  para el presente caso.
- Pérdida por evaporación de 0.05% por día del GNL almacenado.

#### **2.5.5.2 Localización de la Planta de GNL**

La localización y la capacidad de la planta es una selección compleja, se tiene que considerar una zona geográfica ubicada en la costa, con la profundidad suficiente en la orilla para el calado de los buques tanque. También, se requiere de una superficie mayor para la instalación de la planta de producción de GNL cuando se almacena en un tanque de doble pared de acero, debido a la necesidad de una mayor superficie de terreno para la zona de seguridad en caso de derrame y para una posible ampliación de la capacidad en el futuro.

#### **2.5.5.3 Capacidad de los Tanques**

Para calcular el tamaño de los tanques, se tiene que disponer de reservas de gas natural para exportación y usar tanques con una capacidad mínima de  $100000 \text{ m}^3$  o más. En ésta elección se tiene que tomar en cuenta los procedimientos para el control de las operaciones de carga que están muy relacionadas con la capacidad de carga de los buques tanque. La asignación, preparación y/o construcción de estos buques está considerada en la parte inicial de los planes para un proyecto de exportación de GNL.

#### 2.5.5.4 La Instrumentación

El sistema de instrumentación del tanque de GNL, tiene como función principal medir la densidad del líquido almacenado en varios niveles de la altura del tanque y controlar las desviaciones de una evaporación normal causados por el fenómeno del *rollover*, ver Anexo N° 3.

El *rollover* es el cambio repentino de la densidad del GNL producido por la pérdida de calor en distintos niveles de altura en el tanque, esto produce un aumento repentino de la presión por evaporación del GNL; para controlar este cambio, el tanque será equipado con un sistema integrado de control diseñado para manejar la pérdida de GNL que hará funcionar automáticamente mecanismos y operaciones de recirculación para el exceso de vapor producido. Esto controlará un mal funcionamiento del tanque fuera de los rangos para una evaporación normal.

El monitoreo es realizado en cada etapa de almacenamiento del GNL, en un proceso continuo que se inicia con la medida de la densidad del líquido mientras el tanque se va llenando hasta la altura permitida por el diseño, continua con el GNL en reposo y finalmente cuando el GNL es entregado a los buques metaneros.

##### 2.5.5.4-a El Control del *Boiloff*

El principal procedimiento para una operación segura del tanque es el control de *boiloff* o control del GNL evaporado, que se produce cuando el tanque se encuentra en condiciones normales de operación para la carga, almacenamiento y transferencia a los buques tanques de GNL. El GNL evaporado es dirigido a la zona de los equipos de compresión de *boiloff* y enviado al sistema de generación eléctrica de la planta para ser usado como combustible. Ver Anexo N° 3.

##### 2.5.5.4-b El Control de la Presión

La presión de los tanques es controlada por compresores que retiran el GNL evaporado procedente del *boiloff*, la variación de presión puede darse en las operaciones de carga y descarga de GNL y en estado de reposo cuando el tanque está lleno y el rango de la presión baja.

Otros sistemas de control de presión para el GNL evaporado fuera del rango de compresión del fenómeno de *boiloff* serán utilizados de manera similar como en todos los tanques de almacenamiento de productos volátiles. Dentro de estos sistemas de control tenemos:

- Un sistema de válvulas de presión y vacío, en el tanque abierto para controlar el máximo vacío de presión en el tanque.
- Un sistema de control de la presión de succión de los tanques introduciendo gas seco, que puede ser nitrógeno a altas presiones para evitar el vacío de presión del tanque.
- Un sistema de control de exceso de gas en los compresores controladores del *boiloff* que será dirigido hacia el quemador mediante una válvula de control.
- Un sistema de válvulas de alivio utilizado para controlar la sobrepresión.

#### 2.5.5.5 La Transferencia de Calor

Para el caso de un tanque para almacenamiento de GNL; el diseño requiere aislar térmicamente el GNL contenido en el tanque interno y evitar el calor transferido del exterior mediante un aislante térmico y de esta manera evitar la pérdida por evaporación.

Para la diferencia de temperatura entre el medio ambiente y el GNL almacenado, la energía [8] se transfiere de la región de mayor temperatura a la de menor temperatura. Esta transferencia de energía es el calor y está en función de la conductividad térmica (k) del aislante, el espesor del aislante, el área de transferencia, el diferencial de temperatura y el tiempo. La siguiente ecuación general [8] se usa para calcular la cantidad de calor transferido.

$$Q = -k A \frac{dT}{dx}$$

k : conductividad térmica del aislante, btu / hr ft °F

A : área de transferencia, ft<sup>2</sup>

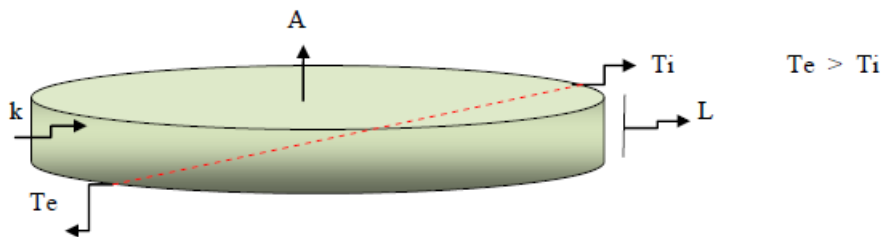
dT : diferencia de temperatura entre las regiones de transferencia de calor, °F

dx : espesor del aislante térmico, ft

### 2.5.5.5-a Transferencia de Calor por Conducción en una Pared Plana

Para el caso de la transferencia de calor a través de una pared plana como en la figura 2-8, donde el espesor  $L$  representa el material aislante, el calor fluirá sólo en la dirección de mayor a menor temperatura y en dirección perpendicular a las superficies.

FIGURA 2-8  
TRANSFERENCIA DE CALOR EN UNA PARED PLANA



Si la conductividad térmica es uniforme, la ecuación siguiente [9] proporciona la transferencia de calor para una superficie plana:

$$Q = \frac{Te - Ti}{L/k A}$$

- A : área de la superficie plana
- L : espesor de la pared o del aislante térmico
- Te : temperatura mayor
- Ti : temperatura menor

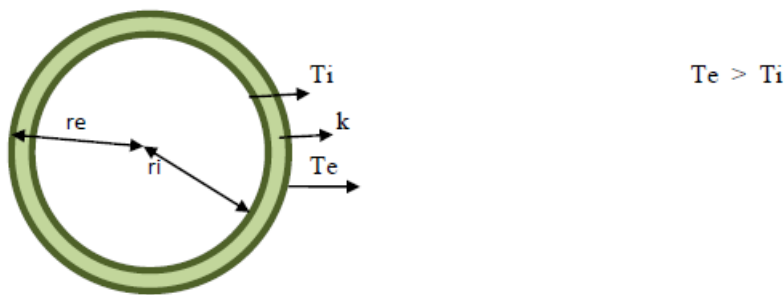
### 2.5.5.5-b Transferencia de Calor por Conducción en un Cilindro

La transferencia de calor en un cilindro será en estado estacionario en ausencia de una fuente de calor y a través de la superficie de la pared del cilindro, ver figura 2-9. Para el presente caso se tiene un cilindro interno de radio interno ( $r_i$ ) y temperatura interior ( $T_i$ ), rodeado por un cilindro externo de radio ( $r_e$ ) a la temperatura ( $T_e$ ) y



entre estos dos cilindros se encuentra el aislante térmico. La transferencia se produce desde las paredes del cilindro externo con la mayor temperatura hacia el cilindro interno [9] y para este caso, la transferencia de calor no depende del espesor y solo se considera la altura  $L$ .

FIGURA 2-9  
TRANSFERENCIA DE CALOR EN UN CILINDRO



El valor de transferencia  $Q$  en un cilindro será independiente de la posición radial y la altura está representada por  $L$ .

$$Q = 2 \pi k L \frac{(T_e - T_i)}{\ln(r_e/r_i)}$$

#### 2.5.5.6 El Aislamiento Térmico

Para el aislamiento térmico [10] se usa materiales de diferente conductividad térmica, densidad y presentación, estos son manufacturados de acuerdo al diseño del espacio donde van a ser instalados y de su resistencia a los esfuerzos por efecto de la diferencia de temperatura y el peso del líquido contenido en el tanque. El fabricante debe tener la capacidad de manufacturar diferentes formas para cada caso de instalación del aislante, por ejemplo tenemos:

Planchas o losas.- estas pueden tener formas rectangulares, con un espesor uniforme para paredes, pisos y techos en varios tamaños. Estos paneles pueden ser rígidos o flexibles dependiendo del material aislante.

Sección de tuberías.- estas pueden ser moldeadas para el aislamiento de tuberías y pequeños equipos, los cilindros son abastecidos como segmentos y los tamaños normales pueden ser presentados para tuberías de hasta 1100 mm de diámetro o a pedido.

#### **2.5.5.6-a Materiales**

El principal requisito de un material para aislamiento es su baja conductividad térmica, esto es generalmente una propiedad intrínseca de los materiales de aislamiento, pero la estructura del material también puede ser una importante contribución a los efectos del aislamiento, si el material es poroso la conducción a través de este es parcialmente a través del contenido del aire en los pequeños poros los cuales son tan pequeños que la convección es mínima y la transmisión de calor por el aire es a través de conducción. Como los gases son los peores conductores de calor entonces el aire contenido en los poros contribuye significativamente a las bajas propiedades de conducción del material.

- Perlita expandida.- la perlita es una roca de sílice natural, cuando es calentada sobre los 1000°C, las partículas del material se expanden entre 4 y 20 veces el volumen original, la principal forma de presentación de este material es en forma granular, esto hace posible llenar fácilmente el espacio donde se van a colocar. También es usado en la producción de concreto ligero.

#### **2.5.5.6-b Material para Refrigeración**

Pocos materiales cumplen los requisitos para ser utilizados como aislantes en la construcción de un tanque refrigerado, la selección adecuada debe cumplir los requerimientos de durabilidad y adaptación de la forma a los espacios que van a contener el aislante y los procedimientos de instalación. Se tiene que elegir el material con la menor conductividad térmica para conseguir un menor espesor entre el tanque interno y externo.

El valor de la conductividad térmica es aproximado y no es una propiedad estática ya que puede variar con la temperatura, densidad, el tipo y la cantidad de gas atrapado dentro de los poros de la matriz.

Los materiales comúnmente usados y probados para estos tanques son: perlita para la

pared, *cellular glass* o *foamglass* para el fondo y *fiber glass* o perlita para el techo.

#### 2.5.5.7 Transferencia de Calor en el Tanque por su Geometría

La transferencia de calor para cada parte del tanque; pared, fondo y techo, será considerada en el procedimiento de cálculo del espesor del aislamiento, primero hay que elegir el material aislante con la menor conductividad térmica y que cumpla los requerimientos estructurales del diseño del tanque; también, se tiene que evaluar la instalación del material en la etapa de construcción.

El aislamiento del tanque será en toda la superficie del tanque y se tiene que considerar un valor conservador de 0.05 % diario de pérdida por evaporación del volumen almacenado.

### 2.6 Aplicación de las Normas para el Diseño

#### 2.6.1 Alcance de la Norma API 620

La norma API 620 [11] ha sido preparada para el diseño y construcción de tanques de gran tamaño a nivel del piso, de forma simétrica y con un solo eje de rotación para trabajar a una temperatura del metal no mayor a 121°C (250°F) y para una presión en sus espacios de gas o vapor del líquido almacenado no mayores a 15 psig. Los productos almacenados en estos tanques son derivados de petróleo y otros que esta industria maneja.

El apéndice Q está preparado para manejar los gases de hidrocarburos licuados almacenados a temperaturas del metal no menores a -168°C (-270°F), en esta norma no se cubre todos los detalles del diseño por la variedad de tamaños y formas de un tanque y puede ser usado por el fabricante como base para un diseño y construcción segura. Esta norma cubre los materiales, la fabricación y las pruebas del tanque completo, se considera el apéndice L para el diseño sísmico.

La norma NFPA 59A es la norma para la producción, almacenamiento y manejo de GNL, solo incluye las instalaciones para licuar el gas natural; el almacenamiento vaporización, transferencia y manejo del GNL, además de aspectos del diseño locación, construcción, mantenimiento y operación de todas las instalaciones de GNL; así como, la preparación del personal involucrado.

## 2.6.2 Las Consideraciones Generales para el Diseño

- Las paredes y el piso de la base del tanque externo [12], van a contener el material aislante alrededor de la pared y debajo del piso del tanque interno donde se almacena el GNL, mientras el techo esférico del tanque externo servirá de soporte para sostener el techo suspendido del tanque interno, el cual también tendrá un aislamiento térmico.
- La presión del tanque tiene que ser baja y positiva y el espacio completamente cerrado para evitar la fuga de vapor.
- La temperatura de diseño del material del tanque externo es la mínima a la presión atmosférica y para la presión interna no mayor de 15 psig.
- La temperatura de diseño del metal del tanque interno es la temperatura del líquido y la del vapor del líquido.

### 2.6.2.1 La Densidad del Líquido Almacenado

Según la norma, el líquido debe tener el máximo peso para la temperatura de operación y para el metano no será menor a  $29.30 \text{ lb/ft}^3$  ( $469.30 \text{ kg/m}^3$ ).

### 2.6.2.2 Diseño de la Temperatura del Metal

La temperatura del metal de cada componente expuesto al líquido o al vapor será la menor temperatura especificada.

- La temperatura de diseño para el tanque interior debe ser la mínima temperatura de refrigeración.
- Para el diseño de los componentes externos, la temperatura debe ser la mínima a condiciones atmosféricas y del GNL vaporizado si los componentes están en contacto con este vapor. La efectividad del aislante para mantener la temperatura del metal encima de la mínima temperatura atmosférica y del líquido vaporizado debe ser considerada.

### 2.6.3 Diseño del Tanque Interior

#### 2.6.3.1 Temperatura

La temperatura de diseño para el metal no debe ser menor a  $-168^{\circ}\text{C}$  ( $-270^{\circ}\text{F}$ ) para el almacenamiento de gases licuados, se tomará como referencia el metano.

#### 2.6.3.2 Material

Los aceros utilizados son de aleación al 9% de níquel, del tipo A353, A553 y A645 como los listados en el Cuadro N° 2.4 y deben pasar la prueba de impacto. Estos materiales estarán sujetos a esfuerzos significativos para un rango de temperatura entre  $-60^{\circ}\text{F}$  y  $-270^{\circ}\text{F}$ .

##### 2.6.3.2-a Prueba de los Materiales

La prueba tiene que cumplir la especificación ASTM A20 / A20 M para cada tipo de acero y todas las muestras tiene que ser transversales a la dirección del roleo final de la plancha, estar a una temperatura de  $-320^{\circ}\text{F}$  y alcanzar los valores mínimos de resistencia a la rotura como los indicados en el Cuadro N° 2.5.

##### 2.6.3.2-b Prueba de los Componentes Estructurales

Para cada forma y tipo de estructura en cada lote utilizado para la construcción del tanque, se tomará una muestra longitudinal de la parte más delgada y se seguirá el mismo procedimiento de prueba de impacto de la plancha de acero. Para la tubería conexiones y cañerías se toma las muestras para los tipos de acero; A522, A333 grado-8 y A334 grado-8 listados en el Cuadro N° 2.4.

#### 2.6.3.3 Espesor de la Pared del Tanque

Las variables [13] relacionadas al cálculo del espesor de pared son:

P : presión total al nivel del tanque para la condición de carga en que se

encuentre,  $P_1 + P_g$

$P_1$  : presión manométrica al nivel del líquido en el tanque.

$P_g$  : presión de gas encima de la superficie del líquido. La máxima presión de gas no mayor a  $15 \text{ lbf/in}^2$  es la razón de la presión nominal del tanque y es positivo excepto cuando es utilizado en cálculos para investigar la capacidad del tanque de resistir un vacío parcial, en ese caso este valor es negativo.

$T_1$  : unidad de fuerza vertical en la pared al nivel del tanque considerado.

$T_2$  : unidad de fuerza horizontal al nivel considerado.

$R$  : radio del cilindro considerado desde la pared al eje de revolución.

$W$  : peso total del tanque y el contenido, el peso del metal se considera cero.

$A$  : área de la sección horizontal del tanque al nivel considerado.

$t$  : espesor de la pared, techo o fondo del tanque incluida la corrosión.

$E$  : eficiencia de la junta de soldadura bajo la cual actúa el esfuerzo.

$S_m$  : máximo esfuerzo permitido de tensión.

$c$  : corrosión cero.

$F$  : Fuerzas verticales de otras estructuras.

Del análisis de cuerpo libre y de carga hidrostática de líquido y gas para cada nivel se obtiene la magnitud de la fuerza vertical y horizontal en la pared del cilindro:

$$T_1 = \frac{R (P + (W+F) / A)}{2}$$

$$T_2 = R P$$

Los valores positivos y negativos indican fuerzas de tensión y compresión respectivamente. El análisis de cuerpo libre se hace a nivel horizontal en cada junta de soldadura, en las paredes, el techo, el piso y donde el centro de curvatura cambia significativamente. Un tanque puede ser operado con normalidad a una altura del líquido ya fijado pero tiene que ser seguro para cualquier condición de operación al momento de llenar o vaciar el tanque.

El espesor de la pared no debe ser menor a lo siguiente

$$t = T_1 / (S_m E) + c \quad \text{o} \quad t = T_2 / (S_m E) + c$$

#### 2.6.3.4 Esfuerzo de Tensión Máximo Permitido

El esfuerzo de tensión máximo permitido de diseño para los materiales en contacto con el líquido deben cumplir con los valores del Cuadro N° 2.6.

##### 2.6.3.4-a Para otras Formas del Tanque

Si  $T_1$  y  $T_2$  son positivos indicando tensión para la combinación de la presión del gas y la altura del líquido a un nivel dado en el tanque, entonces el mayor valor tiene que ser utilizado para el espesor requerido.

Si  $T_1$  es positivo, indicando tensión y  $T_2$  es negativo, indicando compresión o si  $T_2$  es positivo y  $T_1$  es negativo; entonces el espesor asumido en el tanque en estas condiciones debe ser determinada para valores similares de los esfuerzos de tensión calculados. Asimismo, se tiene que tomar las provisiones de seguridad estructural agregando metal adicional donde sea necesario, debido a cargas estructurales diferentes a la presión interna o el vacío parcial.

#### 2.6.4 Carga Sísmica en el Tanque

Cuando la base de un tanque está sometido a un movimiento sísmico [14], las presiones ejercidas por el líquido en el tanque cambian de intensidad y distribución comparado con su estado de equilibrio estático, estas presiones se conocen como hidrodinámicas, los incrementos en la presión del líquido varían con el tiempo y provocan esfuerzos dependientes del tiempo en el tanque, lo que significativamente puede afectar la estabilidad para almacenar con seguridad. Toda esta presión y esfuerzos dependen de la característica del movimiento de tierra, las propiedades del líquido almacenado, la geometría y propiedades físicas del tanque.

Para un tanque que soporta un movimiento sísmico horizontal de tierra y donde la superficie del líquido almacenado está libre, una parte del líquido almacenado se mueve en la misma dirección al movimiento de la estructura del tanque, mientras que otra parte del líquido se mueve independiente experimentando oscilaciones de sacudida o *sloshing* en dirección normal al movimiento horizontal.

A la cantidad de masa líquida que se mueve en sincronía con el tanque se le conoce como el componente de masa impulsivo y al movimiento de sacudida o *sloshing*

como el componente de masa convectivo.

La proporción de masa para cada uno de estos componentes depende de la geometría del tanque, para los tanques con mayor altura con respecto al diámetro, el componente de masa impulsivo es generalmente mayor y para tanques con mayor diámetro el componente de masa convectivo es el mayor. Las presiones hidrodinámicas asociadas con los dos tipos de movimiento son distribuidos de manera diferente a lo largo de la altura del tanque y tienen diferentes variaciones temporales. Las presiones inducidas por el componente de masa impulsivo, son el máximo en la base del tanque y están asociadas con las oscilaciones de alta frecuencia y el componente de masa convectivo máximo está en la superficie del líquido, asociado con las oscilaciones de baja frecuencia.

Para el sistema básico de un tanque cilíndrico, de radio ( $R$ ), altura ( $H_T$ ), con líquido almacenado a nivel de altura ( $H$ ) y donde el tanque se considera fijo a una base rígida para soportar un movimiento sísmico horizontal.

La presión hidrodinámica se encuentra en una fórmula fundamental desarrollada en la publicación [14]; *Guidelines for the Seismic Design of Oil and Gas Pipeline Systems* (Guía para el Diseño Sísmico de Sistemas de Ductos de Petróleo y Gas), y es equivalente a la suma de la presión impulsiva y la presión convectiva.

$p_i$  : presión impulsiva

$p_c$  : presión convectiva

$p_i$  :  $c_o d R a_{max}$

$p_c$  :  $c_1 d R A_1$

$a_{max}$  : aceleración horizontal máxima del Cuadro N° 2.9 para el factor de zona sísmica igual a 0.4

$c_o$  y  $c_1$  : funciones sin dimensión de la distribución de los componentes de la presión, para la relación altura/radio ( $H/R$ ) en tanques cilíndricos, listados en el Cuadro N° 2.7 y Cuadro N° 2.8.

$d$  : densidad del GNL,  $lb/ft^3$

$H$  : altura del nivel del líquido

$R$  : radio del tanque interno.

$A_1$  : pseudo-aceleración para la presión convectiva que se considera mínima en comparación con la presión impulsiva



El espesor del tanque considerando el movimiento sísmico se obtiene al sumar la presión impulsiva a la presión del tanque, no se considera la presión convectiva.

### 2.6.5 Estabilidad del Tanque

La norma API 620 [17] considera dos modos de respuesta sísmica para la estabilidad del tanque y su contenido:

- La respuesta amplificada de alta frecuencia del movimiento de tierra horizontal para la pared, el techo del tanque y una parte del líquido almacenado que se mueve junto con la pared.
- La respuesta amplificada de baja frecuencia en la superficie del líquido almacenado para la porción de líquido en el movimiento vertical o *sloshing*.

El diseño requiere la determinación de la masa hidrodinámica asociada a cada modo y fuerza lateral, con el momento de volteo aplicado a la pared. Ciertas provisiones son incluidas para asegurar la estabilidad de la pared del tanque contra el volteo y evitar el doblado de la pared debido a fuerzas de compresión verticales y así definir la estabilidad del tanque.

#### 2.6.5.1 El Momento de Volteo

El momento de volteo debido a fuerzas sísmicas aplicado al fondo de la pared del tanque es:

$$M = ZI (C_1 W_s X_s + C_1 W_r H_T + C_1 W_1 X_1 + C_2 W_2 X_2)$$

M : momento de volteo aplicado al fondo de la pared del tanque, lbs-ft

Z : factor de zona sísmica; aceleración sísmica, usar el Cuadro N° 2.9

I : factor de importancia de seguridad toxica 1.0 para todos los tanques

C<sub>1</sub> : coeficiente de fuerza sísmica lateral

C<sub>2</sub> : coeficiente de fuerza sísmica lateral

C<sub>1</sub> : 0.6

C<sub>2</sub> : en función del período natural del modo sloshing o convectivo T y de las condiciones de suelo del tanque en la zona de ubicación del tanque, este factor también puede ser determinado por el cliente.

$$T = kD^{0.5} \text{ seg}$$

$$C_2 = \frac{0.750S}{T} \quad \text{cuando } T \leq 4.5$$

$$C_2 = \frac{3.375S}{T^2} \quad \text{cuando } T > 4.5$$

ZIC<sub>1</sub>: factor de fuerza lateral

ZIC<sub>2</sub>: factor de fuerza lateral

el valor se puede determinar del espectro de respuesta sísmica para la zona geográfica donde se ubica el tanque y estará determinado por el cliente, pero no es menor que el valor calculado

S : coeficiente de suelo del Cuadro N° 2.10

k : factor de la figura 2-12

Ws: peso total de la pared del tanque y cualquier aislamiento en lbs

Xs : altura desde el fondo del tanque al centro de gravedad de la pared

Wr: peso total del techo del tanque incluyendo aislamiento, techo suspendido, u otra carga en lbs

H<sub>T</sub>: altura de la pared del tanque

W<sub>1</sub>: peso de la masa efectiva del contenido del tanque que se mueve junto a la pared del tanque en modo impulsivo, de la figura 2-10

X<sub>1</sub>: altura desde el fondo de la pared del tanque al centroide de la fuerza sísmica lateral aplicada a W<sub>1</sub>, de la figura 2-11

W<sub>2</sub>: peso de la masa efectiva del modo *sloshing* contenido en el tanque

X<sub>2</sub>: altura desde el fondo de la pared del tanque al centroide de la fuerza sísmica lateral aplicada a W<sub>2</sub>

W<sub>T</sub>: peso total del contenido del tanque

H : altura máxima de nivel del producto

#### 2.6.5.2 La Resistencia al volteo

La cantidad puede determinarse mediante la siguiente ecuación:

$$W_L = 7.9t_b (F_{by} G H)^{0.5}$$

- $W_L$ : peso máximo del contenido del tanque que puede ser utilizado para resistir el momento de volteo, en lb/ft sobre la circunferencia de la pared,  $W_L$  no debe ser mayor que 1.25GHD.
- $t_b$  : espesor de la plancha de fondo bajo la pared en in.
- $F_{by}$ : mínimo esfuerzo de elasticidad especificado de la plancha del fondo bajo la pared en  $\text{lb/in}^2$ .
- $G$  : gravedad específica del producto almacenado.
- $W_t$ : peso de la pared del tanque, parte del techo fijo y del aislamiento térmico soportado por la pared en lb/ft sobre la circunferencia de la pared.

### 2.6.5.3 La Estabilidad de la Pared

La máxima fuerza longitudinal de compresión en el fondo de la pared para el tanque desanclado puede ser determinada por la relación:

$$\frac{M}{D^2 (W_t + W_L)}$$

si el resultado es mayor que 1.57, el tanque es estructuralmente inestable.

Se debe tomar las siguientes medidas para la estabilidad del tanque:

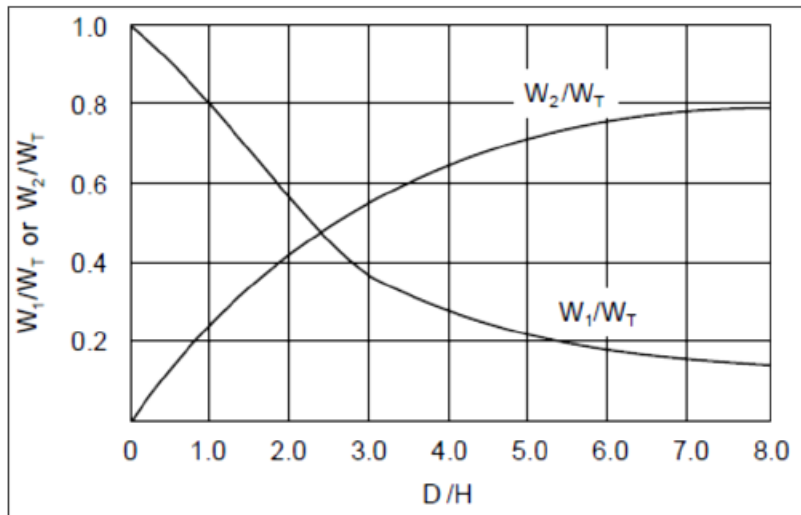
- Incrementar el ancho de la plancha bajo la pared ( $t_b$ ), para incrementar  $W_L$  si los límites de resistencia al volteo no son sobrepasadas.
- Incrementar el espesor de la pared.
- Cambiar la proporción del tanque para aumentar el diámetro y reducir la altura.
- Anclar el tanque, cuando el anclaje es considerado necesario.

### 2.6.5.4 La Altura de Onda para el Modo Convectivo o *Sloshing*

La altura teórica de la onda en el modo convectivo en la superficie del líquido almacenado puede ser determinada usando la siguiente ecuación:

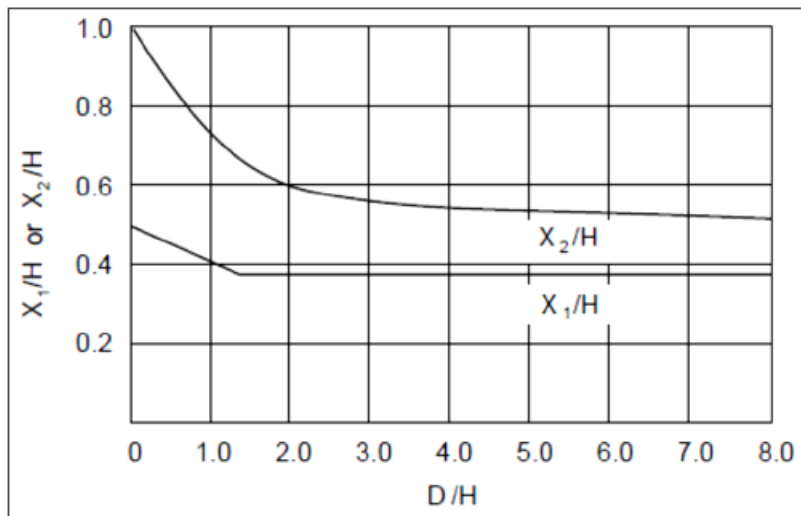
$$d_F = 1.124 Z IC_2 T^2 \tanh(4.77(H/D)^{0.5})$$

FIGURA 2-10  
CURVA DE LOS FACTORES  $W_1/W_T$  y  $W_2/W_T$  vs.  $D/H$



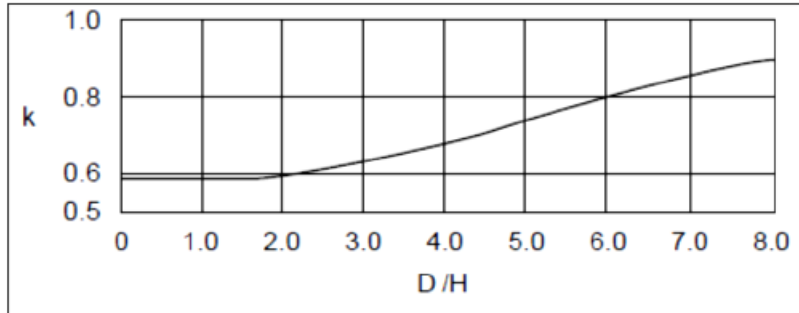
Fuente: [16]

FIGURA 2-11  
CURVA DE LOS FACTORES  $X_1/H$  y  $X_2/H$  vs.  $D/H$



Fuente: [16]

FIGURA 2-12  
CURVA DE FACTOR  $k$  vs.  $D/H$



Fuente: [16]

## 2.6.6 Diseño del Tanque Exterior

En un estudio preliminar el tanque exterior será dividido en componentes estructurales y cada componente será investigado por un estudio de placas apropiado. Estos cálculos darán una idea del tamaño del tanque para luego hacer un diseño más detallado de la estructura completa cuando se requiera un aumento de la capacidad.

### 2.6.6.1 Selección del Material

El material del tanque externo [12] soporta temperaturas atmosféricas y se encuentra expuesto al vapor del GNL en la parte interna, los materiales pueden ser seleccionados del Cuadro N° 2.11.

- Para temperaturas que disminuyen hasta  $-35^{\circ}\text{F}$  y sin la prueba de impacto o requerido por el Cuadro N° 2.11 o por el cliente.
- Para temperaturas que disminuyen hasta  $-60^{\circ}\text{F}$  y sin la prueba de impacto o requerido por el Cuadro N° 2.12 o por el cliente.
- Para otros materiales distintos al acero niquelado sin prueba de impacto o requerido por el cliente.

### 2.6.6.2 Techo del Tanque

El techo del tanque externo es de forma esférica y tiene un radio de curvatura aproximadamente igual al diámetro exterior del tanque, que corresponde a un levantamiento del techo mayor a  $1/8$  del diámetro del tanque, esta forma del techo representa un techo del tipo domo, donde la distribución de cargas externas son las dominantes.

Asimismo, un mayor levantamiento es ventajoso en el aspecto estructural cuando está sujeto a presiones internas, ya que la mayor curvatura puede soportar estas presiones con menores esfuerzos de tensión, se puede decir que cuando las presiones internas son consideradas; que es una de las principales cargas de diseño en el tanque de GNL y aunque la magnitud es de hecho mucho más pequeña que en las estructuras de recipientes nucleares, el levantamiento convencional del domo en el tanque de GNL no es el óptimo en la eficiencia estructural, por lo que una preparación de estructuras circunferenciales y radiales son adicionadas de manera tal

que resistan y aseguren la carga que tiene que soportar el techo incluyendo estructuras, equipos, accesorios y tuberías del proceso adicionales necesarios en el diseño del tanque exterior. El techo con este diseño estructural especial es conocido con el nombre de techo tipo *umbrella*.

Para el diseño de un tanque de GNL con una capacidad mayor a  $100000 \text{ m}^3$  se debe considerar cuidadosamente el levantamiento de la curvatura considerada de hasta  $0.8D$ , donde  $D$  es el diámetro del tanque externo. Por el lado de la seguridad estructural, ninguna restricción especial del código o norma es impuesta con relación a la forma del techo; como sea, la curvatura de los techos esféricos domos o *umbrella* de estos tipos de tanques de acero al carbono debe estar en el rango de  $0.8D$  a  $1.2D$ . Como referencia, los tanques enterrados tienen el domo con radio de curvatura cercano a  $0.8D$ .

#### 2.6.6.3 Base del Tanque

El aislamiento de la base debajo del fondo del tanque interno también evitará la acumulación de hielo el cual produciría el levantamiento del fondo del tanque. La solución será anclar el tanque externo a una base capaz de resistir las fuerzas de volteo y colocar calentadores debidamente distribuidos en toda la superficie de la base y un sistema de drenaje para el agua.

Para este componente de la estructura se requerirá un calificado estudio de ingeniería estructural para la base de un tanque grande y una detallada investigación del suelo para el diseño de cada tipo de tanque.

##### 2.6.6.3-a Carga en la Base

La base debe ser diseñada para resistir la carga del tanque y su contenido cuando está llena de agua para el nivel de líquido diseñado. La máxima carga en condiciones de operación incluye la carga del viento. Durante la prueba con agua, la carga total en la base no debe pasar el 125 % de la carga permitida, si fuera necesario el nivel del agua durante la prueba debe ser reducida debajo del nivel de líquido diseñado tal que no exceda el 25% de la carga.

### **2.6.6.3-b Fuerza de Levantamiento y Pesos de Gravedad**

La fuerza de levantamiento considerada en el diseño del anillo o base de concreto puede ser balanceado por la coexistencia de fuerzas y pesos verticales hacia abajo incluidos el peso del metal y del aislamiento de la pared, techo y el peso de concreto y tierra transmitido por el anclaje a la pared. Se tiene que asumir el tanque vacío.

### **2.6.7 Prueba de Materiales y Estructuras**

Los requerimientos químicos y físicos de las formas estructurales de acero de aleación al 9% y 5% de níquel, A353, A553, A645 y otros, se encuentra en las normas para especificaciones de materiales ASTM para cada tipo de material

#### **2.6.7.1 Prueba para Tuberías Conexiones y Accesorios**

El material utilizado para tuberías debe ser compatible en soldadura y esfuerzo con el material de la pared del tanque; asimismo, toda la tubería debe cumplir los requisitos de la norma ASME B31.3, pero no se aplicará a las caras de las conexiones de brida en las primeras bridas, las primeras juntas roscadas de la tubería fuera de la pared del tanque y la primera junta circunferencial en conexiones soldadas finales que no tenga una brida localizada cerca del tanque.

#### **2.6.7.2 Prueba del Tanque Interno**

La prueba hidrostática es realizada antes de instalar el aislamiento en el tanque, éste es llenado con agua hasta el nivel de diseño y se inyecta aire hasta una presión de 1.25 veces la presión de diseño del espacio vacío del tanque diseñado. La carga sobre la base no excederá el valor de carga para el área donde se encuentra el tanque, se permitirá un incremento temporal de 25% para la evaluación de la base si fuese permitido.

El llenado a nivel máximo para la prueba, no debe producir una tensión en alguna parte del tanque que sea mayor al 85% del mínimo esfuerzo de elasticidad del material o 55% del mínimo esfuerzo de tensión del material.



### **2.6.7.3 Prueba del Tanque Externo**

La prueba de hermeticidad debe ser realizada antes que el aislamiento sea instalado y como la presión de prueba del tanque interno actúa en el tanque externo entonces se descarta una prueba separada.

### **2.6.7.4 Prueba Neumática**

Se aplica una presión de aire igual a 1.25 veces la presión de diseño para el espacio vacío. En el caso de un tanque de doble pared el tanque interno puede estar vacío durante la prueba neumática, esta presión debe ser mantenida por una hora y después disminuir hasta la presión de diseño de 15 psig para que las juntas soldadas sean inspeccionadas.

### **2.6.7.5 Pruebas Preliminares**

Todas las juntas de soldadura del fondo y de las uniones con las paredes deben ser inspeccionadas y aplicar una prueba de vacío de  $3.1 \text{ lb/in}^2$ , ver Anexo N° 4.

## 2.7 Matriz de Consistencia

	Descripción
Titulo	Determinación del material, espesores de pared y aislamiento térmico para el diseño seguro de un tanque de almacenamiento de gas natural licuado en el Perú.
Problema General	¿Qué variables definen realizar un diseño seguro de un tanque de gran capacidad para el almacenamiento de gas natural licuado, que se encuentra en estado líquido a $-162^{\circ}\text{C}$ y a la presión atmosférica?
Objetivo General	Determinar las variables para un diseño seguro para el almacenamiento de gas natural licuado a $-162^{\circ}\text{C}$ .
Objetivo Específico	Identificar el material adecuado para la construcción del tanque de almacenamiento que resista condiciones de temperatura de $-162^{\circ}\text{C}$ y presión atmosférica. Determinar por cálculo el espesor de la pared y del aislamiento térmico del tanque de almacenamiento de gas natural licuado aplicando las normas técnicas pertinentes a condiciones de temperatura a $-162^{\circ}\text{C}$ y presión atmosférica. Determinar la estabilidad del tanque respecto al movimiento sísmico y resistencia al volteo.
Hipótesis General	Los materiales y espesores adecuados de la pared del tanque interno y del aislamiento térmico respectivamente permitirán el diseño seguro de un tanque para almacenamiento de gas natural licuado en el Perú.
Variables Dependientes e Independientes de la Hipótesis	Las variables independientes son el material para la construcción del tanque y los espesores del material y del aislamiento térmico. La variable dependiente es el diseño seguro del tanque, bajo condiciones de temperatura y presión de almacenamiento del gas natural licuado.

### CAPÍTULO 3 CÁLCULO DEL DISEÑO

En base al desarrollo del marco teórico, el cálculo para el dimensionamiento del tanque tiene los siguientes pasos:

- 3.1 Elección del material para el tanque
- 3.2 Cálculo del espesor
- 3.3 Cálculo del espesor considerando el factor sísmico
- 3.4 Estabilidad sísmica del tanque
- 3.5 Cálculo del espesor del aislante
- 3.6 Estructura del tanque

datos a considerar para el tanque interno:

Tipo de tanque = tanque de doble pared de acero

Líquido almacenado = GNL

$V = 100000 \text{ m}^3$

$D = 63.38 \text{ m (207.95 ft)}$

$H_T = 31.69 \text{ m (103.97 ft)}$

$T = -162^\circ\text{C (-260}^\circ\text{F)}$

$P = 15 \text{ psig}$

Materiales utilizados = acero de aleación al 9 % de níquel, ASTM 553, ASTM A353 ASTM A333 y ASTM B444 para paredes y soportes estructurales.

Tanque externo

$T = 33^\circ\text{C}$  máxima de la zona

materiales: acero al carbono ASTM A36 o CSA G40.21 M

La carga sísmica que soporta el tanque limitará su altura de diseño, por lo que se usa una relación altura/radio (H/R) menor a la unidad. Para el cálculo de la altura y radio se incluye como variables; el estudio de suelo del lugar, acondicionamiento del terreno donde va a ser instalado el tanque y los cálculos de ingeniería civil que cada fabricante debe realizar para un diseño seguro.

El tanque interno está instalado sobre una base de anillo de concreto y dentro del área

interna del anillo se encuentra una base conformada por bloques de aislante térmico de alta densidad para soportar el peso del contenido, ver figura 2-2. Asimismo, en las regiones de alta sismicidad, los diseños económicos requieren el uso de tanques anclados con baja razón H/R para que resistan las fuerzas de volteo.

El anclaje del tanque interno y externo en la base se usa para resistir las presiones de operación, las fuerzas de volteo, la fuerza ejercida sobre las paredes de los tanques por el peso del aislante.

Una capa de arena en la base del tanque interno será colocada para prevenir el desplazamiento y deformación del fondo del tanque por la formación de producto sólido y hielo en la base del tanque.

### **3.1 Elección del Material para el Tanque**

El acero de aleación al 9% de níquel, fue desarrollado específicamente para temperaturas de hasta  $-195.5^{\circ}\text{C}$  ( $-320^{\circ}\text{F}$ ), a esta temperatura es altamente dúctil y resistente a la fractura del material.

Aunque el acero inoxidable A304 tiene mayor ductilidad que el acero de aleación al 9% de níquel, tiene mucho menor esfuerzo permitido y esto puede significar casi el doble de material necesario para la construcción. Así, el uso de acero de aleación al 9% de níquel, cumple los requisitos técnico y económico.

#### **3.1.1 El Aislamiento Térmico**

Instalar el aislamiento térmico adecuado para el tanque es un proceso de investigación y prueba experimental para encontrar el mejor material en condiciones criogénicas. Se busca aislantes con la menor conductividad térmica y resistencia variable para cada parte del tanque y que cumplan con el valor de pérdida por evaporación de GNL almacenado menor a 0.05% diario.

La forma cilíndrica de los tanques donde se almacena el GNL, también nos permite instalar fácilmente y con seguridad el aislante seleccionado en el diseño.

##### **3.1.1.1 Pared del Tanque**

Es la mayor superficie del tanque en contacto con el líquido por lo tanto, habrá una

mayor transferencia de calor y carga hidrodinámica. En las paredes se instalará un aislante de fácil colocación, baja conductividad térmica, baja densidad y que sea indeformable.

Para la pared se usa una combinación de dos aislantes diferentes instalados alrededor del tanque interno, el primero compuesto por una delgada capa de *fiberglass* pegado al tanque interno y el segundo perlita de alta densidad instalado alrededor del primer aislante, el *fiberglass* amortiguará los movimientos laterales del tanque interno por ser un material flexible e indeformable.

#### **3.1.1.2 Techo del Tanque**

Para el techo donde la presión de operación es ocasionada por la evaporación del GNL, el material aislante será de baja densidad y similar al utilizado en la pared del tanque.

En el techo se puede instalar *fiberglass*, perlita u otro material de muy baja conductividad.

#### **3.1.1.3 Fondo del Tanque**

Para el fondo del tanque se usa un aislante de alta densidad, adecuado para soportar la presión del contenido y a la vez permitir tener una base con la solidez necesaria para mantener condiciones operativas estables, confiables y seguras en el tiempo. Un diseño estructural correcto de las bases del tanque y del anillo de concreto es fundamental para mantener en buenas condiciones el aislante para la base, como el *cellular glass* o *foamglass* de alta densidad.

### 3.2 Cálculo del Espesor

Para:

$$D = 63.38 \text{ m}$$

R = radio del tanque.

$$H_T = 31.69 \text{ m}$$

$$H = 31.69 (0.98) = 31.05 \text{ m altura del líquido en el tanque.}$$

$$d = 469.3 \text{ kg/m}^3$$

$$E = 1.0$$

$S_m$  = máximo esfuerzo permitido de tensión de Cuadro N° 2.6

reemplazando en:

$$t = \frac{PD}{2S_mE} \quad \text{espesor de la pared del tanque interno}$$

Para el cálculo se divide la altura del tanque en doce partes iguales o anillos, con una altura equivalente a la medida del ancho de una plancha de acero de 2740x6000 mm (9.00x19.70 ft), las que van a ser utilizadas para construir la pared del tanque. Se calcula el espesor para cada anillo desde el fondo del tanque.

CUADRO N° 3.1  
CÁLCULO DE ESPESOR DEL TANQUE INTERNO

ANILLO	ANCHO DEL ANILLO mm	H mm	t mm
1	2740	31050	19.70
2	2740	28250	17.90
3	2740	25510	16.20
4	2740	22770	14.40
5	2740	20020	12.70
6	2740	17280	10.90
7	2740	14540	9.20
8	2740	11790	7.40
9	2740	9050	5.70
10	2740	6310	4.00
11	2740	3560	2.20
12	1500	820	0.50

### 3.3 Cálculo del Espesor Considerando el Factor Sísmico

$p_i$  = presión impulsiva por la carga sísmica horizontal

$c_o$  = para cada altura de anillo considerado del Cuadro N° 2.7

$a_{max} = 0.4$

$p_i = c_o d R a_{max}$

La presión impulsiva calculada para cada nivel de anillo se suma a la presión (P) respectiva y se calcula el nuevo espesor (t) del tanque.

CUADRO N° 3.2  
CÁLCULO DE ESPESOR DEL TANQUE INTERNO CONSIDERANDO EL  
FACTOR SÍSMICO

ANILLO	ANCHO DEL ANILLO mm	H/R	$c_o$	NUEVO ESPESOR t mm
1	2740	0.95	0.740	25.70
2	2740	0.86	0.670	23.30
3	2740	0.79	0.623	21.20
4	2740	0.70	0.568	19.00
5	2740	0.61	0.506	16.80
6	2740	0.53	0.439	14.50
7	2740	0.44	0.369	12.20
8	2740	0.36	0.297	9.90
9	2740	0.28	0.225	7.50
10	2740	0.19	0.155	5.20
11	2740	0.10	0.076	2.80
12	1500	0.02	0.019	0.60

Con estos datos se obtiene:

$W_s$  = peso de la pared del tanque

$W_s = 776147 \text{ kg (1711109 lb)}$

### 3.4 La Estabilidad Sísmica del Tanque

Para determinar la estabilidad sísmica del tanque, se usa las consideraciones para el diseño seguro del Cuadro N° 2.9 y Cuadro N° 2.10

$$D/H = 2.04$$

$$\text{Zona sísmica} = 4$$

$$Z = 0.4$$

$$t_b = 0.25 \text{ in}$$

$$D = 207.95 \text{ ft}$$

$$H = 101.89 \text{ ft}$$

$$W_T = 103839685 \text{ lb} \quad \text{peso del contenido del tanque}$$

$$X_s = 51.98 \text{ ft}$$

$$W_s = 1711109 \text{ lb}$$

de la figura 2-10 y 2-11

$$W_1 = 59035760 \text{ lb}$$

$$W_2 = 44803925 \text{ lb}$$

$$X_1 = 38.11 \text{ ft}$$

$$X_2 = 61.13 \text{ ft}$$

de la figura 2-12

$$k = 0.59$$

$$T = k D^{0.5} = 8.53$$

Si:

$$T = 8.53 > \text{que } 4.5 \text{ entonces del Cuadro N° 2.10}$$

$$S = 2$$

$$C_2 = 3.37 (S/T^2) = 0.0917$$

$$C_1 = 0.6$$

$$ZIC_1 = 0.24$$

$$ZIC_2 = 0.036$$

#### 3.4.1 El Momento de Volteo

Con los datos anteriores

$$M = ZI (C_1 W_s X_s + C_1 W_r H_T + C_1 W_1 X_1 + C_2 W_2 X_2)$$



$$M = 661842616 \text{ lb-ft}$$

### 3.4.2 La Resistencia al Volteo

La cantidad de líquido calculado para resistir el volteo será  $W_L <$  que  $1.25GHD$ , si:

$$W_L = 7.9t_b (F_{by} G H)^{0.5}$$

$$t_b = 0.25 \text{ in}$$

$$F_{by} = 75000 \text{ lb/in}^2 \text{ del Cuadro N}^\circ 2.6$$

$$G = 29.34$$

$$H = 101.89 \text{ ft}$$

$$W_L = 29574 \text{ lb/ft} < 777124 \text{ lb/ft}$$

### 3.4.3 La Estabilidad de la Pared para Tanques Desanclados

Si  $M/D^2 (W_L + W_t)$  menor a 1.57 el tanque es estable y no necesita anclarse

$$W_L = 29574 \text{ lb/ft}$$

$$W_t = 2619 \text{ lb/ft}$$

$$D = 207.952 \text{ ft}$$

$$M/D^2 (W_L + W_t) = 0.4754$$

Este resultado es menor a 1.57 por lo tanto el tanque es estable.

### 3.4.4 Cálculo de la Altura de la Onda de Modo Convectivo

$$d_F = 1.124 Z I C_2 T^2 \tanh(4.77 (H/D)^{0.5})$$

$$d_F = 3.03 \text{ ft}$$

$$d_F = 3.03 \text{ mas } 1 \text{ ft (provisión) = valor de onda final}$$

$$d_F = 4.03 \text{ ft (1.22m)}$$

Este valor servirá para recalcular la altura que tendrá el producto en el tanque en caso de un movimiento sísmico. Disminuir el valor de la altura de onda de masa convectiva es importante para un diseño económico y seguro, asimismo se tendrá en cuenta el uso de pilares con amortiguadores en la base del tanque, que disminuyan el efecto vertical del movimiento sísmico.

### 3.5 Cálculo del Espesor del Aislante Térmico

Calor perdido por evaporación del GNL en un día

$$H_T = 31.69 \text{ m}$$

$$D = 63.38 \text{ m}$$

$$M = 103839685 \text{ lb peso del contenido}$$

$$A_t = 33967 \text{ ft}^2 \text{ área del techo}$$

$$A_f = 33967 \text{ ft}^2 \text{ área del fondo}$$

$$A_p = 67928 \text{ ft}^2 \text{ área de la pared}$$

$$T = -260^\circ\text{F} (-162^\circ\text{C}) \text{ temperatura del GNL}$$

$$T_a = 86^\circ\text{F} (30^\circ\text{C}) \text{ temperatura ambiente}$$

$$T_p = 99^\circ\text{F} (37^\circ\text{C}) \text{ temperatura de la pared}$$

$$T_T = 99^\circ\text{F} (37^\circ\text{C}) \text{ temperatura del techo}$$

$$T_f = 86^\circ\text{F} (30^\circ\text{C}) \text{ temperatura del fondo}$$

$$H_V = 220 \text{ btu/lb calor latente de vaporización}$$

$$Q_t = H_V M \text{ calor total de evaporación}$$

$$Q_p = 483179 \text{ btu/hr (0.05\% de pérdida por evaporación en un día)}$$

Considerando un rango variable en las propiedades de los aislantes térmicos escogidos tenemos:

	k (btu/ft hr°F)	densidad lb/ft <sup>3</sup> (kg/m <sup>3</sup> )
<i>Cellular glass</i>	0.0248-0.0318	9.6763 (155)
Perlita expandida	0.0202-0.0347	3.12 (50) - 7.8 (125)

Fuente: [10]

Para el cálculo inicial se asume la pérdida de calor en las paredes, techo y fondo proporcionales al área total del cilindro. Se determina el espesor de los aislantes con el menor valor de conductividad térmica de la perlita y el *cellular glass*:

$$Q_{pf} = 120794 \text{ btu/hr, calor perdido en el fondo del tanque}$$

$$Q_{pt} = 120794 \text{ btu/hr, calor perdido en techo del tanque}$$

$$Q_{pp} = 241590 \text{ btu/hr, calor perdido en la pared del tanque}$$

$L_f$  = espesor del aislante para el fondo del tanque

$L_t$  = espesor del aislante para el techo del tanque

$L_p$  = del aislante para la pared del tanque

$$Q = k A \frac{(T_e - T_i)}{L}$$

$$Q = 2 \pi k L \frac{T_e - T_i}{\ln (r_e/r_i)}$$

despejando tenemos:

$$L_f = 28.8 \text{ in (0.732m) techo}$$

$$L_t = 28.8 \text{ in (0.732m) fondo}$$

$$L_p = 31.0 \text{ in (0.787m) pared}$$

De la figura 3-1 para la pérdida de calor en la pared y el fondo del tanque interno vs. el espesor del aislamiento, se tiene lo siguiente:

- Las dos curvas para la pared y el fondo se hacen lineales conforme aumenta el espesor del aislamiento térmico en un rango de 25 a 30 pulgadas para adelante y en consecuencia la pérdida de calor comienza a disminuir de manera constante.
- En este punto se hace una evaluación temprana de prueba para encontrar el valor del espesor del aislante que se va usar y determinar el diámetro del tanque externo.
- El espesor puede variar usando materiales de menor conductividad térmica. La evaluación de la pérdida de calor versus el espesor del aislamiento nos permite ver en que rango de espesor la pérdida de calor se hace constante y similar a los valores calculados de pérdida de calor diario en las paredes del tanque interno.

FIGURA 3-1.A  
 TRANSFERENCIA DE CALOR VS. ESPESOR DE AISLAMIENTO

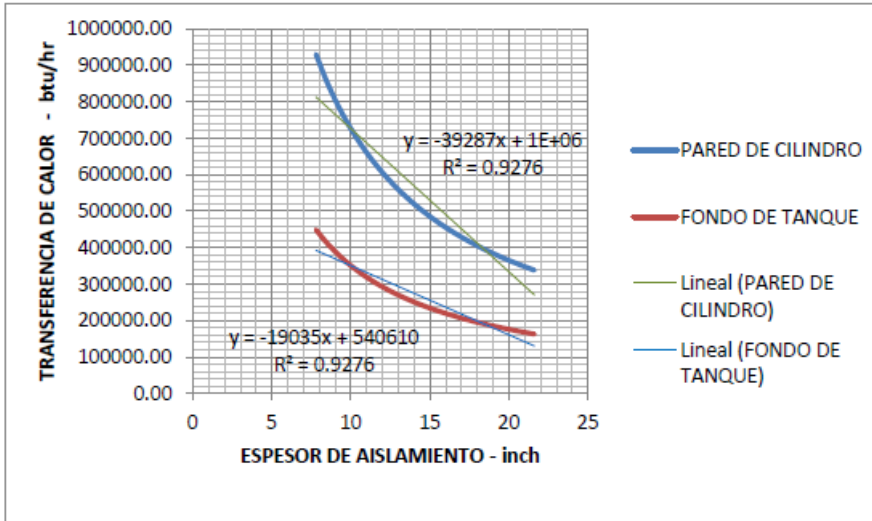
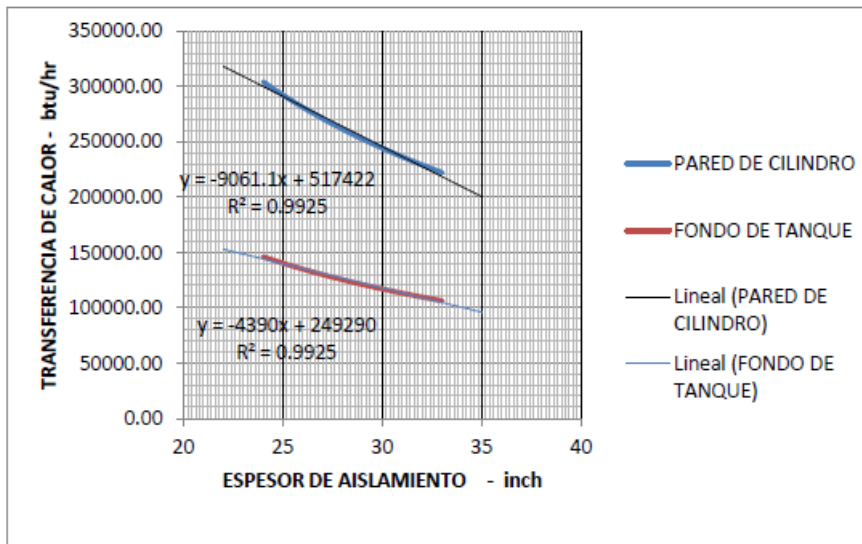


FIGURA 3-1.B  
 TRANSFERENCIA DE CALOR VS. ESPESOR DE AISLAMIENTO



Fuente: Elaboración propia

### 3.6 La Estructura del Tanque

Cuando un tanque es soportado por anillos estructurales o de otra clase, se tendrá cargas concentradas impuestas en las paredes donde los soportes están conectados. Esfuerzos secundarios pueden existir en las paredes adyacentes a las conexiones de tales soportes, que son mucho menores que cuando el tanque es llenado con líquido y antes que alguna presión sea ejercida por la carga estática. Los métodos para calcular estas fuerzas no son parte de este trabajo, ya que estas comprenden muchas variables que dependen del tamaño, forma, peso del tanque, temperatura de servicio presión interna, el arreglo del soporte estructural y de tuberías de conexión instalada en el tanque.

#### 3.6.1 Detalles de la Estructura

Los detalles de los soportes deben seguir la buena práctica estructural, se tendrá en cuenta las consideraciones descritas en los Manuales de Construcción de Acero, que es la literatura especializada en estructuras.

- Todos los soportes deben ser diseñados para prevenir un exceso de esfuerzo localizado por cambios de temperatura en el tanque o las deformaciones producidas por las variaciones en la presión y las condiciones del nivel del líquido del tanque. Cualquier arreglo de la estructura que no permita una razonable libre expansión y conexión de las paredes del tanque ocasionará la debilidad del tanque.
- Suspensiones externas y correas de anillos o ciertos marcos internos pueden provocar un efecto de rigidez en las paredes del tanque donde los miembros de soporte exterior del tanque tiene que ser adherido.  
Este efecto de rigidez puede ser beneficioso o dañino, dependiendo de la temperatura de operación y de la localización de los miembros de rigidez.
- En muchos casos es preferible usar detalles que permitan soldaduras continuas que se extenderán completamente alrededor de la periferia de los miembros conectados y evitarán soldaduras intermitentes o discontinuas en el cual habría concentración de esfuerzos. Un espesor más ancho de las planchas de la pared en el soporte puede servir para reducir esfuerzos secundarios y un anillo completo o planchas de pared más gruesas pueden ser instalados.
- Las fuerzas que están actuando en la pared del tanque en las áreas de conexión para

los soportes de cualquier clase, pueden producir esfuerzos de curvado, las planchas más gruesas no parecen ser apropiadas, una plancha de refuerzo oval o circular puede ser usada. Las conexiones de las planchas de refuerzo deben ser diseñadas para minimizar la flexibilidad de la plancha bajo fuerzas normales en la superficie de la pared del tanque.

- El material para el tanque externo que no contiene el vapor del gas licuado puede estar en la lista del Cuadro N° 2.11. La consideración de la temperatura de metal de diseño no es requerido si el valor real del esfuerzo no excede la mitad del esfuerzo de tensión permitido por el material.

### **3.7 Consideraciones para Establecer los Costos en la Construcción de un Tanque para Almacenamiento de GNL**

El costo del tanque es una parte del capital total en un proyecto para producir GNL el cual está compuesto además, por la planta de proceso, el muelle de carga y el gasoducto que transporta el gas natural desde el lugar de producción. Consideraciones para establecer los costos del tanque son:

#### **Gastos de capital (CAPEX)**

- Ingeniería del proyecto y pago de licencias.
- Costo del metal del tanque interno, pedido de fabricación de las planchas especiales para el tanque interno y externo.
- Costo del aislante.
- Costo del material de soldadura especial para la instalación de planchas y prueba completa de todas las juntas de soldadura.
- Costo de accesorios y estructuras metálicas para el tanque.
- Costo de equipos e instrumentos de control para el funcionamiento y control del tanque.
- Costo de la mano de obra especializada.
- Costo de la ingeniería civil.
- Costo del alquiler de los equipos y maquinas para la construcción del tanque.
- Otras instalaciones consideradas para completar el tanque son el costo de las bases y de pilares antisísmicos de acuerdo al diseño del fabricante.

**Gastos de operación (OPEX)**

- Costo del financiamiento para la construcción del tanque.
- Costo del mantenimiento y de operación.

**Ingresos**

- Venta del GNL a precio pactado.
- Reducción del GNL evaporado por operación efectiva del tanque.

La puesta en funcionamiento del tanque es un punto crítico en un proyecto de producción del GNL y el planeamiento de la construcción tiene fecha de inicio antes del diseño de la planta de proceso.

## CAPÍTULO 4 CONCLUSIONES

1. El tanque para almacenamiento de gas natural licuado (GNL) tiene la resistencia para soportar bajas temperaturas de hasta  $-162^{\circ}\text{C}$  ( $-260^{\circ}\text{F}$ ) por el tipo de acero utilizado en la construcción del cilindro que es acero de aleación al 9% de níquel. Los aceros de esta clase se encuentran listados en la norma API 620 [12] y se listan en el Cuadro N° 2.4 y han sido probados en un rango de temperaturas de hasta  $-168^{\circ}\text{C}$  ( $-270^{\circ}\text{F}$ ) para la resistencia a la rotura y la ductilidad. Otras clases de aceros como los presentados en el Cuadro N° 2.6, pueden soportar las mismas temperaturas pero el esfuerzo permitido es menor y pueden ser usados en partes internas del tanque donde no se acumulen los esfuerzos de carga del GNL almacenado.
  
2. La cantidad de calor que produce la pérdida diaria por evaporación del 0.05% de GNL almacenado es usado para encontrar el espesor del aislante térmico y así se demuestra en la figura 3-1 del gráfico; transferencia de calor en la pared y el fondo del tanque vs. el espesor del aislante. Este porcentaje de pérdida se alcanza con el aumento del espesor y cuando la curva tiende a ser lineal, en este rango se elige el espesor del material aislante para la pared y el fondo del tanque. La elección de un material aislante de baja conductividad térmica permite la disminución del espesor del aislamiento, como resultado disminuirá el diámetro del tanque externo y se tendrá un mejor control en la parte operativa, el mantenimiento y la seguridad.
  
3. La máxima cantidad de pérdida de gas natural licuado por evaporación es controlado mediante un sistema de medición de densidad y temperatura a diferentes niveles de la altura del tanque para las operaciones de carga, descarga y cuando el GNL se mantiene almacenado en espera para ser transportado, en este manejo de las operaciones se puede pasar el límite de 0.05% de evaporación diario permitido, esto produciría una sobrepresión al interior del tanque fuera del sistema de control de sobrepresión del tanque que será controlado mediante la combustión del exceso de vapor.



4. Un movimiento sísmico produce un desplazamiento del gas natural licuado almacenado hacia las paredes del tanque que produce un incremento de la columna de presión ejercida en la estructura del tanque; por lo tanto, se tiene que considerar un aumento del espesor de las paredes del cilindro. Según los cálculos realizados el espesor de las planchas de acero para las paredes aumentó en aproximadamente un 30 %. Este porcentaje de aumento de espesor se mantuvo constante hasta un 60% de la altura del tanque desde la base de la pared.
5. El desplazamiento horizontal del gas natural licuado almacenado por efecto de un movimiento sísmico genera ondas que aumentan la altura del nivel de líquido almacenado y son mayores que las producidas en el momento que termina de llenarse el tanque. Debido a este cambio se tiene que determinar una disminución de nivel del GNL almacenado que de acuerdo a los resultados obtenidos es aproximadamente el 4 % de la altura del tanque interno. La norma API 620 [12] provisiona este mayor espacio vacío de tanque y evita que el GNL rebalse fuera del tanque interno en el caso de un movimiento sísmico.

## RECOMENDACIONES

1. Elegir un material del Cuadro N° 2.6 con el menor esfuerzo admisible para partes del tanque que no van a soportar la carga del GNL almacenado.
2. Evaluar aislantes térmicos para el almacenamiento de productos refrigerados a temperaturas en estado criogénico, menor de  $-73^{\circ}\text{C}$ . La elección estará basada en la conductividad térmica, lo que nos permitirá obtener un espesor menor para el aislante que rodea al tanque interno, esto dará como resultado un mejor control del GNL evaporado; por consiguiente se podrá detectar y corregir más rápidamente una pérdida de calor en las paredes; asimismo se podrá reducir el espesor del tanque externo debido a los menores esfuerzos del peso del aislante.
3. Utilizar los valores máximos de la escala sísmica listados en el Cuadro N° 2.9 de la norma API 620 [17] para la zona geográfica escogida que para el presente caso estará ubicado en la ciudad de Ilo, con el valor seleccionado se calculará el

espesor del cilindro interno y la máxima altura para el gas natural licuado almacenado.

## CAPÍTULO 5

### BIBLIOGRAFÍA

1. Wikipedia la Enciclopedia Libre. *Gas Natural*, es.wikipedia.org/wiki/gas natural (visitado el 21-02-2012).
2. Petroleum Extension Service (2001). *Field Handling of Natural Gas*, 3rd-Ed, The University of Texas at Austin, pag. 1, Austin, Texas, USA.
3. Wikipedia the Free Encyclopedia. *Liquefied Natural Gas*, en.wikipedia.org/wiki/natural gas, (visitado el 01-12-2012).
4. Chakma A. (2001). *Natural Gas Processing*, Biblioteca de la Facultad de Ingeniería de Petróleo, Universidad Nacional de Ingeniería, Perú.
5. Sharma S., Hill D., Rano P., Humphrey G., Mayer M. (2009). Executing Peru's Largest Industrial Project Safely and on Schedule, *World Gas 2009*, The Petroleum Economist Ltd, 2009, USA.
6. The International Group of Liquefied Natural Gas Importers (2009). *LNG Information Paper N°5*, www.giignl.org, (visitado el 18-04-2012).
7. Kim J.H., Seo H.S., Lee K., Yoon I.S. (2006). *Development of the World's Largest above Ground Full Containment LNG Storage Tank*, 23rd World Gas Conference, Amsterdam 2006.
8. Fernández Díez P. (2003). *Ingeniería Térmica y de Fluidos*, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética, Universidad de Cantabria, pag. I-2\_I-9 España.
9. Fernández Díez P. (2003). *Ingeniería Térmica y de Fluidos*, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética, Universidad de Cantabria, pag. I-19\_I-22 España.
10. The Engineering Toolbox. *Thermal Conductivity of Some Common Material and Gases*, www.EngineeringToolBox.com, (visitado el 26-12-2011).
11. American Petroleum Institute (2002). *Design and Construction of Large, Welded Low-Pressure Storage Tanks, API Standard 620*. Tenth Edition, USA
12. American Petroleum Institute (2002). *Design and Construction of Large, Welded Low-Pressure Storage Tanks, API Standard 620. Appendix Q - Low Pressure Storage tanks for Liquefied Hydrocarbon Gases*, pag. Q-1\_Q-5, Tenth Edition USA.
13. American Petroleum Institute (2002). *Design and Construction of Large, Welded*

- Low-Pressure Storage Tanks, API Standard 620. Section 5-Design, pag. 5-1 \_5-14, Tenth Edition, USA.*
14. American Society of Civil Engineers (1984). *Guidelines for the Seismic Design of Oil and Gas Pipeline Systems – Committee on Gas and Liquid Fuel Lifelines of the ASCE Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering, ASCE. Chapter 7-Seismic Response and Design of Liquid Storage Tank, pag. 255-273 USA.*
  15. American Society of Civil Engineers (1984). *Guidelines for the Seismic Design of Oil and Gas Pipeline Systems – Committee on Gas and Liquid Fuel Lifelines of the ASCE Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering, ASCE. Chapter 7-Seismic Response and Design of Liquefied Storage Tank, pag. 266 USA.*
  16. American Society of Civil Engineers (1984). *Guidelines for the Seismic Design of Oil and Gas Pipeline Systems – Committee on Gas and Liquid Fuel Lifelines of the ASCE Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering, ASCE. Chapter 7-Seismic Response and Design of Liquefied Storage Tank, pag. 273 USA.*
  17. American Petroleum Institute (2002). *Design and Construction of Large, Welded Low-Pressure Storage Tanks, API Standard 620. Appendix L–Seismic Design of Storage Tanks, pag. L-1\_L-7, Tenth Edition, USA.*
  18. National Oceanic and Atmospheric Administration (1999). *Liquefied Natural Gas*, <http://cameochemicals.noaa.gov/chris/LNG.pdf>, (visitado el 29-05-2012).
  19. Netherland Sewell & Associates, Inc (2010). *Welcome to the 13th Annual NSAI Oil & Gas Property Evaluation Seminar*, [http://www.minem.gob.pe/download idTitular=2244](http://www.minem.gob.pe/download/idTitular=2244), (visitado el 06-01-2012).
  20. Mc Guire, White (2000). *Liquefied-Gas-Handling-Principles-On Ships and Terminals*, 3rd-Ed, Witherby & Co Ltd., Inglaterra.
  21. Wikipedia la enciclopedia libre. *Metano*, [es.wikipedia.org/wiki/Gas natural](http://es.wikipedia.org/wiki/Gas_natural) (visitado el 29-02-2012).
  22. Perupetro (2014). *Precios Internacionales*, <http://www.perupetro.com.pe/precios-internacionales/bin-debug/>, (visitado el 10-03-2014).
  23. American Petroleum Institute (2002). *Design and Construction of Large, Welded Low-Pressure Storage Tanks, API Standard 620. Section 4-Design, pag. 4-3 Tenth Edition, USA.*

24. American Petroleum Institute (2002). *Design and Construction of Large, Welded Low-Pressure Storage Tanks, API Standard 620. Appendix R—Low Pressure Storage tanks for Refrigerated Products*, pag. R-4, Tenth Edition, USA.
25. La Republica, <http://www.larepublica.pe/09-05-2008/e1-sur-reclama-gasoducto-andino>, (visitado 30-03-2012)

**Anexo N°1**  
**Propiedades del GNL**

Las propiedades relevantes [18] para el gas natural son:

**1.1 Acciones de respuesta correctiva**

- Parar descarga
- Tratamiento físico y químico. Quemado

**1.2 Designaciones químicas**

- Grupo de compatibilidad: 31; parafina
- Formula:  $\text{CH}_4 + \text{C}_2\text{H}_6$
- Designación IMO/UN: 20/1058
- DOT ID No.: 1972
- Registro CAS No.: 115
- Guía NAERG No.: 115
- Clasificación estándar de comercio industrial: 34000

**1.3 Riesgos para la salud**

- Equipo de protección personal: aparato de respiración portátil, ropa de protección para exposición con el líquido
- Síntomas por exposición: si la concentración del gas es alta, puede causar asfixia. No son detectables efectos en la salud, aun a concentraciones de 5% en el aire.
- Tratamiento a la exposición: mover a la víctima hacia el aire libre, si esta desmayado aplicar resucitación artificial.
- TLV-TWA: actualmente no disponible
- TLV-STEL: no listado
- TLV-Techo: no listado
- Toxicidad por ingesta: no relevante
- Toxicidad por ingesta: actualmente no disponible
- Toxicidad crónica: ninguna
- Características irritantes del vapor (gas): no irrita los ojos ni la garganta
- Características del sólido o líquido: no hay riesgos importantes a la salud prácticamente ningún daño en la piel por la muy rápida evaporación.
- Trazas de olor: no disponible
- Valor IDHL: no listado
- OSHA PEL-TWA: no listado

- OSHA PEL- STEL: no listado
- OSHA PEL- ceiling: no listado
- EPA AEGL: no listado

#### **1.4 Riesgos de incendio**

- Punto flash: gas inflamable
- Límites de inflamabilidad en el aire: 5.3%-14.0%
- Agentes de extinción de fuego: no extinguir fuegos de grandes derrames. Permitir que se consuma mientras se enfría con espray los equipos adyacentes
- Agentes de extinción que no se usa: agua
- Riesgos especiales de los productos de combustión: no relevante
- Comportamiento del fuego: no relevante
- Temperatura de auto ignición: 999°F
- Riesgos eléctricos: Clase I, Grupo D
- Razón de calentamiento: 12mm/min
- Temperatura de flama adiabática: 2339 (est.)
- Razón estequiometria aire/combustible: no relevante
- Temperatura de inflamación: actualmente no disponible
- Razón molar de combustión (reactante producto): no relevante
- Concentración mínimo de oxígeno para la combustión (MOCC): no listado

#### **1.5 Reactividad química**

- Reactividad con agua: sin reacción
- Reactividad con materiales comunes: sin reacción
- Estabilidad durante el transporte: estable
- Agentes neutralizantes para ácidos y cáusticos: no relevante
- Polimerización: no relevante
- Inhibidor para polimerización: no relevante

#### **1.6 Polución de agua**

- Toxicidad acuática: ninguna
- Toxicidad silvestre: ninguna
- Demanda biológica de oxígeno (BOD): ninguna
- Concentración potencial en la concentración alimenticia: ninguna
- Perfil de riesgo GESAMP: no listado

#### **1.7 Información de embarque**

- Grados de pureza: varía con el punto de origen. Usualmente contiene al menos 90%

- de metano, con pequeñas cantidades de etano, propano, butano y pentano, dióxido de carbono y nitrógeno.
- Temperatura de almacenamiento: -260°F (-162°)
- Atmosfera inerte: no requerido
- Venteo: alivio de seguridad
- Categoría de polución IMO: actualmente no disponible
- Tipo de embarque: 2
- Tipo de casco del barco: actualmente no disponible

### 1.8 Clasificación de riesgo

- Categoría 49 CFR: gas inflamable
- Clase 49 CFR: 2.1
- Grupo de paquete 49 CFR: no relevante
- Polución marítima: no
- Clasificación de riesgo NFPA
- Categoría
- Riesgo de salud (azul) 1
- Inflamabilidad (rojo) 4
- Inestabilidad (amarillo) 0
- Cantidad reportable EPA: no listado
- Categoría de polución EPA: no listado
- Numero RCRA desechable: no listado
- Lista EPA FWPCA: no listado

### 1.9 Propiedades físicas y químicas

- estado físico a 15°C y 1 atm: gas
- Peso molecular: mayor a 16
- Punto de ebullición a 1 atm: -258°F = -161°C = 112°K
- Punto de congelamiento: -296°F = -182.2°C = 91.0°K
- Temperatura crítica: -116°F = -82.2°C = 191.0°K
- Presión crítica: 673 psia = 45.78 atm= 4.64 MN/m
- Gravedad específica: (líquido) 0.415-0.450 a -162°C
- Tensión superficial del líquido: 14 dinas/cm = 0.014 N/m a -161°C
- Gravedad específica del vapor (gas): 0.55 – 1.0
- Razón de calor específico del vapor (gas): 1.306
- Calor latente de vaporización: (est.) 220 btu/lb = 120 cal/gr = 5.1x10<sup>5</sup> J/kg



- Calor de Combustión: -21600 a -23400 btu/lb = -12000 a -13000 cal/gr y - 502.4 a -544.3x10<sup>5</sup> J/kg
- Calor de descomposición: no relevante
- Calor de solución: no relevante
- Calor de polimerización: no relevante
- Calor de fusión: actualmente no disponible
- Presión de vapor Reid: Altas propiedades físicas aplicadas al metano

## Anexo N° 2

### Reservas de gas natural en el lote 88 y 56 en Camisea - Perú

El informe fue presentado por *NSA- Netherland, Sewell & Associates, Inc.* El 17 de mayo de 2010 para el consorcio Ministerio de Energía y Minas/Perupetro, dos instituciones públicas del Perú [19].

Los lotes 56 y 88 forman parte del complejo geológico de Camisea y tienen acumulaciones de gas y condensado de clase mundial, allí se encuentran varios campos y reservorios de hidrocarburos que poseen un considerable potencial de exploración dentro y fuera del lote.

#### Hidrocarburos originalmente in-situ y recuperación final estimada

CATEGORÍA	HIDROCARBUROS ORIGINALMENTE IN SITU			TOTAL(100 POR CIENTO)		
	GAS SECO (BCF)	NGL (MMBBL)	CONDENSADO (MMBBL)	GAS SECO (BCF)	NGL (MMBBL)	CONDENSADO (MMBBL)
ESTIMACIÓN BAJA	15317.4	621.2	465.1	11643.6	396.8	301.1
MEJOR ESTIMACION	20991.6	851.9	638.9	16440.8	573.5	434.2
ESTIMACION ALTA	24080.4	977.4	728.9	19120.6	664.3	511.7

#### Reservas de San Martín, Cashirari y Pagoreni

CATEGORÍA	RESERVAS TOTALES (100 POR CIENTO)		
	GAS SECO (BCF)	NGL (MMBBL)	CONDENSADO (MMBBL)
TOTAL PROBADAS (1P)	11177.0	346.2	265.5
PROBADAS+PROBABLES (2P, O MEJOR ESTIMACION)	15929.3	520.9	397.0
PROBADAS+PROBABLES+POSIBLES (3P)	18599.7	611.3	474.1

#### Recursos contingentes para Mipaya (Noi//Ene intervalos-descubierto)

CATEGORÍA	RECURSOS CONTINGENTES TOTALES (100 POR CIENTO)		
	GAS SECO (BCF)	NGL (MMBBL)	CONDENSADO (MMBBL)
ESTIMACIÓN BAJA (1C)	67.4	2.7	2.1
MEJOR ESTIMACION (2C)	112.3	4.6	3.7
ESTIMACION ALTA (3C)	121.7	5.2	4.2

#### Recursos prospectivos para Kimaro, San Martín Este, Mipaya (Nia Intervalos) Pagoreni Oeste y Saniri (No-descubiertos)

CATEGORÍA	RECURSOS PROSPECTIVOS TOTALES (100 POR CIENTO)					
	SIN RIESGO			CON RIESGO		
	GAS SECO (BCF)	NGL (MMBBL)	CONDENSADO (MMBBL)	GAS SECO (BCF)	NGL (MMBBL)	CONDENSADO (MMBBL)
ESTIMACIÓN BAJA	1222.4	44.4	36.7	472.5	17.0	14.1
MEJOR ESTIMACION	2013.4	75.8	62.8	740.3	27.7	23.0
ESTIMACION ALTA	3357.5	130.6	108.3	1157.7	45.0	37.3

### Anexo N° 3 Comisionado

El comisionado para el funcionamiento del tanque consiste en:

Una purga de gases del tanque con nitrógeno, a continuación se procede a evacuar todos los gases inertes de los tanques de almacenamiento mediante un compresor.

El GNL que sale del enfriador principal es traspasado a los tanques que tienen instalado un sistema de instrumentación que mide la densidad a diferentes niveles para ser monitoreados y prevenir el *rollover* en el tanque, que ocurre para el caso de almacenamiento con largos períodos de espera y donde el calor filtrado en las capas más bajas puede causar la evaporación del producto que rápidamente sube a la superficie creando una gran cantidad de vapor. En el caso de exportación de GNL esto es más difícil que ocurra, por los cortos períodos de almacenamiento, pero si fuera detectado una estratificación del producto, los tanques están diseñados para permitir una mezcla del contenido del tanque, en este tanque la composición del contenido de GNL es constante.

#### 1. *Rollover*

El fenómeno del *rollover* [20] está asociado al llenado de los tanques, las condiciones para que ocurra esto es porque el contenido líquido del tanque se estratifica y una capa más densa se forma encima de una capa menos densa generando una mezcla espontánea. Para solucionar esta inestabilidad que puede causar incrementos diez veces más de lo normal en la evaporación del líquido almacenado y por lo tanto causa una sobre presión, se procede a la apertura de las válvulas de alivio para la salida del vapor a la atmósfera.

Conforme el tanque es llenado, el contenido inicial forma una capa en el tope que va a estar por encima del punto de llenado y en esta capa se va a producir una evaporación del metano, dejando a los componentes más pesados del GNL formando un líquido de mayor densidad comparado con las nuevas capas del nivel más bajo, de esta manera se forma un volumen del líquido llenado con capas estratificadas.

Para mantener estable la operación de carga es necesario tener un control de la densidad, temperatura y presión en distintos niveles de llenado del tanque. Una de las operaciones para prevenir el *rollover* es seguir un procedimiento de *cooldown*.

## 2. *Cooldown*

Es el procedimiento necesario para evitar las presiones excesivas del tanque debido a la evaporación flash durante el llenado del tanque, este consistirá en rociar el tanque a bajo nivel antes de cargar el tanque con el GNL, estos tanques deben ser enfriados lentamente para minimizar los esfuerzos térmicos. El enfriamiento debe ser realizado siguiendo un manual de operación de cada operador y que determina la razón de *cooldown* permitido. Este enfriamiento va muy relacionado con la compresión de los vapores de *boiloff*, donde la máxima temperatura de succión del vapor no debe pasar un límite máximo, ya que es un proceso de enfriamiento controlado donde los vapores calientes tienen que ser evacuados mientras estos se producen.

## 3. *Boiloff*

El *boiloff* es generado cuando el GNL se va almacenando y empieza a evaporarse por efecto del calor de las bombas de carga y por la pérdida de calor en las líneas y el tanque de almacenamiento. La mayoría de *boiloff* es producido en el barco mientras es cargado y el vapor puede retornar por un sistema de reciclado al tanque de GNL.

## 4. Modo de operación

Los modos de operación para el tanque son dos; el primero es el modo de espera, en este procedimiento se recircula el GNL en una operación continua para mantener las líneas de descarga y auxiliares a baja temperatura, se mantiene un flujo constante de GNL desde el tanque de almacenamiento hacia el despachador situado en el muelle y es recirculado en un *loop* entre el tanque y la zona de descarga. El segundo modo es el despacho de GNL desde el tanque al buque tanquero, este procedimiento usa una línea principal para la descarga hacia los tanques y otra de recirculación. Todo el *boiloff* producido en los tanques y líneas es enviado al sistema de compresión para su distribución según el diseño de la planta.

## Anexo N° 4

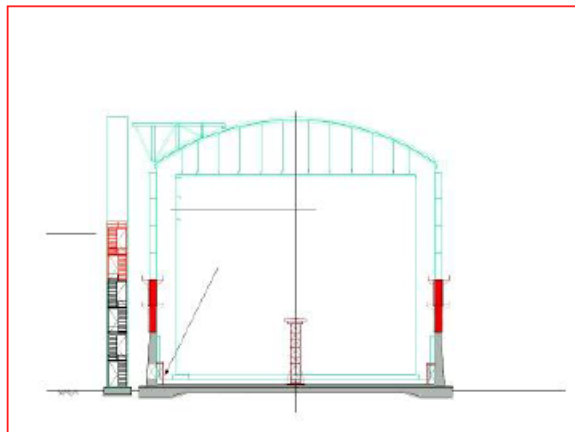
### Construcción del Tanque

La parte crítica del proyecto es la planificación para el avance de las obras civiles que incluye la preparación del terreno y el pedido de materiales para la construcción de las bases y de los tanques.

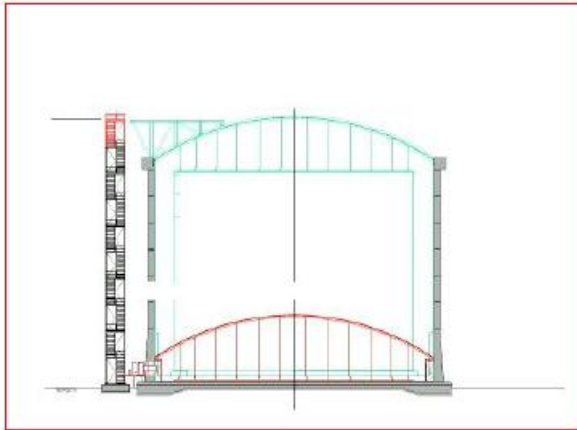
El inicio del proyecto consiste en la ubicación y preparación del terreno en el área seleccionada, se continúa con la construcción simultánea de la planta de procesos, los tanques y los servicios marítimos, cada uno como proyecto independiente.

#### 1. Etapas de Construcción

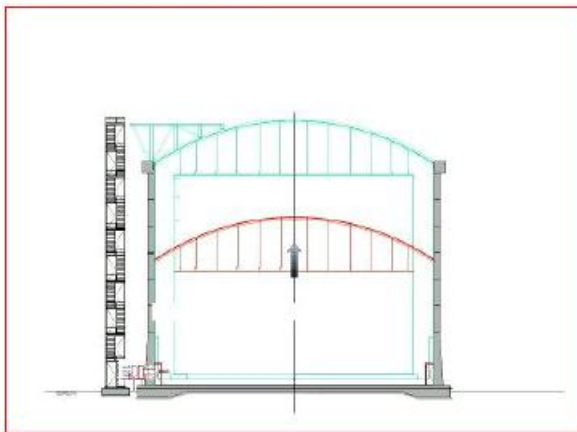
- Se construye la base de concreto con los pilares o soportes amortiguadores anti-sísmicos para el tanque externo e interno.



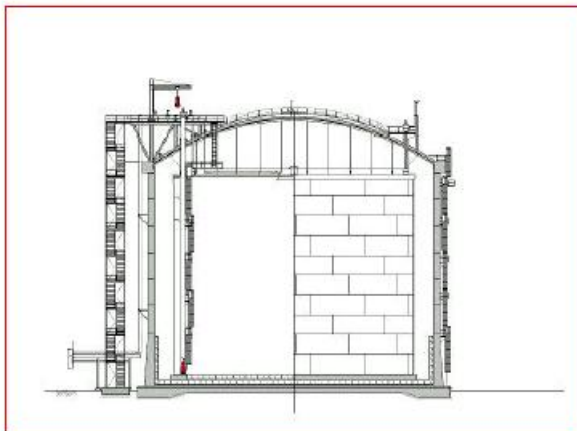
- Se construye la base del fondo del tanque externo e interno y el anillo de concreto se colocan los bloques de aislante térmico de alta densidad en la base, se construye las paredes del tanque externo y el techo esférico con la plataforma suspendida, que es ensamblado en el fondo del tanque. Éste techo se levantará con la ayuda de aire comprimido, siguiendo un procedimiento desarrollado por compañías especializadas.



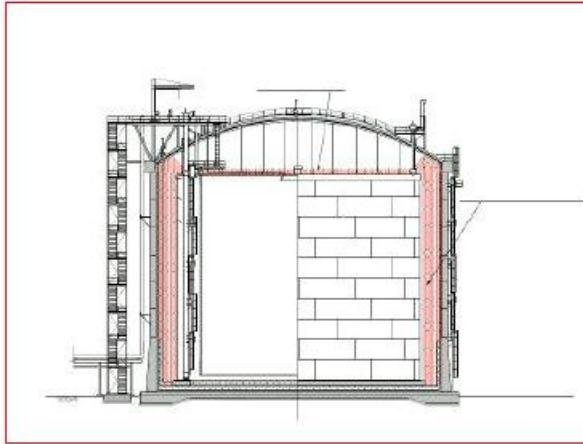
- El techo empieza a ser levantado



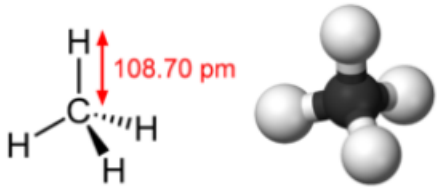
- Se termina de construir el tanque interno y se hacen las pruebas de presión antes de instalar el aislamiento.



- Se instala el aislante en las paredes del tanque interno y se procede a las tareas de comisionado.



**Anexo N° 5**  
**CUADROS**  
**CUADRO N° 2.1**  
**PROPIEDADES DEL METANO**

Propiedades	
	
Generales	
Nombre	Metano
Formula química	CH <sub>4</sub>
Peso atómico	16.043 uma
Densidad	0.717 kg/m <sup>3</sup> (gas)
Otras denominaciones	gas del pantano; hidruro de metilo; tetra hidruro de carbono
Cambios de fase	
Punto de fusión	-296.5°F (-182.5°C)
Punto de ebullición	-260°F(-161,6 °C)
Punto triple	-296.5°F (-182.48 °C)
Punto crítico	116.7°F(-82.6 °C)
$\Delta_{\text{fus}}H$	1.1 kJ/mol
$\Delta_{\text{vap}}H$	8.17 kJ/mol
Propiedades del gas	
$\Delta_f H_{\text{gas}}^{\circ}$	-74.87 kJ/mol
$\Delta_f G_{\text{gas}}^{\circ}$	-50.828 kJ/mol
$S_{\text{gas}}^{\circ}$	188 J/(mol·K)
$C_m$	35.69 J/(mol·K)
Seguridad	
Efectos agudos	Asfixia, en algunos casos inconsciencia, ataque cardíaco o lesiones cerebrales. El compuesto se transporta como líquido criogénico, su exposición causará obviamente la congelación.
Punto de inflamación	-306.4°F (-188 °C)
Temperatura de auto ignición	998.6°F (537 °C)
Limite explosivo	5-15%
Valores en el SI y en condiciones normales (0 °C y 1 atm), salvo que se indique lo contrario.	

Fuente: [21]



CUADRO N° 2.2  
TAMAÑO DE PLANTAS DE PRODUCCION DE GNL EN EL MUNDO

PLANTA	PAIS	FECHA DE INICIO	CAPACIDAD (MMTPA)
Qatargas II	Qatar	2009	7.8
Arzew GL4Z	Algeria	1964	0.9
Arzew GL1Z	Algeria	1978	
Arzew GL1Z	Algeria	1997	7.9
Skikda GL1K	Algeria	1972	
Skikda GL1K	Algeria	1981	
Skikda GL1K	Algeria	1999	6.0
Lumut 1	Brunei	1972	7.2
Bontang A-B	Indonesia	1977	
Bontang A-D	Indonesia	1986	
Bontang A-E	Indonesia	1989	
Bontang A-F	Indonesia	1993	
Bontang A-G	Indonesia	1998	
Bontang A-H	Indonesia	1999	22.6
Point Fortin	Trinidad y Tobago	1999	
Point Fortin	Trinidad y Tobago	2003	9.9
	Egipto	2004	5.5
	Egipto	2005	7.2
Bintulu MLNG 1	Malasia	1983	7.6
Bintulu MLNG 2	Malasia	1994	7.8
Bintulu MLNG 3	Malasia	2003	3.4
Bonny Island	Nigeria	1999	
Bonny Island	Nigeria	2003	9.5
Northwest Shelf Venture	Australia	2009	16.3
Withnell Bay	Australia	1989	
Withnell Bay	Australia	1995	7.7
Sakhalin II	Rusia	2009	9.6
Yemen LNG	Yemen	2008	6.7
Tangguh LNG Project	Indonesia	2009	6.7
Qatargas I	Qatar	1996	4.0
Qatargas I	Qatar	2005	10.0
Qatargas III	Qatar	2010	7.8
Rasgas I and II	Qatar	1999	6.6
Qalhat	Oman	2000	7.3
Das Island I	Emiratos Arabes Unidos	1977	
Das Island I and II	Emiratos Arabes Unidos	1994	5.7
Total	Mundial	1990	50
Total	Mundial	2002	130
Total	Mundial	2007	160

Fuente: [3]

CUADRO N° 2.3  
 ÍNDICES MUNDIALES DE PRECIOS DEL GAS NATURAL (\$/MMbtu)

	año 2010	ENE 11	FEB 11	MAR 11	ABR 11	MAY 11	JUN 11	JUL 11
ALGONQUIN	5.28	8.42	6.78	5.22	4.72	4.66	4.96	5.33
HENRY HUB	4.37	4.5	4.1	3.97	4.24	4.31	4.54	4.43
NBP	6.58	8.82	8.66	9.81	9.29	9.31	9.47	8.9
ZEEBRUGGE	6.66	8.69	8.65	9.78	9.47	9.44	9.56	9.01
JKM	7.72	10.1	10.1	10.8	12.2	13.1	13.9	14.2

	AGO 11	SEP 11	OCT 11	NOV 11	DIC 11	ENE 12	FEB 12	MAR 12
ALGONQUIN	4.38	4.17	3.97	3.99	4.41	4.68	3.55	2.78
HENRY HUB	4.06	3.9	3.57	3.26	3.17	2.67	2.51	2.17
NBP	8.86	8.5	8.84	9.2	8.72	8.45	10.3	9.25
ZEEBRUGGE	9.09	9.42	9.13	9.33	8.66	8.34	10.3	9.24
JKM	15.2	16.9	17.3	17.4	16.7	15.2	14.8	15.6

	ABR 12	ENE 13	FEB 13	MAR 13	ABR 13	MAY 13	JUN 13	JUL 13
ALGONQUIN	2.48	11.2	16.2	7.22	5.12	4.63	4.19	4.68
HENRY HUB	1.92	3.33	3.33	3.81	4.17	4.04	3.83	3.63
NBP	9.58	10.68	10.68	13.05	10.7	10.1	9.36	9.91
ZEEBRUGGE	9.6	10.5	10.4	12.4	10.7	10.2	9.98	9.97
JKM	16.3	18.3	18.9	16.5	15.0	14.4	14.9	16.0

	AGO 13	SEP 13	OCT 13	NOV 13	DIC 13	ENE 14	FEB 14	MAR 14
ALGONQUIN	3.56	3.85	3.90	5.85	14.2	25.7	22.5	25.5
HENRY HUB	3.43	3.62	3.68	3.62	4.24	4.70	5.9	6.5
NBP	10.0	10.4	10.5	11.0	11.4	10.7	9.75	9.83
ZEEBRUGGE	9.96	10.4	10.4	10.8	11.1	10.5	9.54	9.66
JKM	15.5	15.5	16.7	18.5	18.9	19.0	19.4	17.9

Fuente: [22]

CUADRO N° 2.4  
MATERIALES ASTM PARA EL TANQUE INTERNO

PLACAS Y MIEMBROS ESTRUCTURALES	TUBERIA Y DUCTOS	ELEMENTOS DE UNION Y CONEXIONES	PERNOS
A 353	A 333, Grado 8 B 444 (UNS-N06625), Gr. 1	A522 — — —	— — —
A 553, Tipo 1	A 334, Grado 8 B 444 (UNS-N06625), Gr. 2	— —	— —
A 645	B 619 (UNS-N10276) B 622 (UNS-N10276)		
A 240, Tipo 304 A 240, Tipo 304L — — —	A 213, Grado TP 304 A 213, Grado TP 304 L A 312, Grado TP 304 A 313, Grado TP 304L  A 358, Grado 304, Class 1	A 182, Grado F 304 A 182, Grado F 304L — —	A 320, Grados B8, B8C, B8M y B8T — —
B 209, Alloy 3003-0 B 209, Alloy 5052-0 B 209, Alloy 5083-0 B 209, Alloy 5086-0 B 209, Alloy 5154-0	B 210, Alloy 3003-0 B 210, Alloy 3003-H112 B 210, Alloy 5052-0 B 210, Alloy 5086-0 B 210, Alloy 5154-0	B 247, Alloy 3003- H112 B 247, Alloy 5083- H112Mod — —	B211, Alloy 6061- T6 — — —
B 209, Alloy 5456-0 B 221, Alloy 6061-T4 y T6 B 308, Alloy 6061-T2 y T6	B 241, Alloy 5052-0 B 241, Alloy 5083-0 B 241, Alloy 5086-0 B 241, Alloy 5454-0 B 241, Alloy 5456-0	— — — — — —	— — — — —

Fuente: [12]

CUADRO N° 2.5  
VALORES DE IMPACTO DE PRUEBA CHARPY V-NOTCH  
ASTM A20 / A20 M

VALORES DE IMPACTO DE LA PRUEBA CHARPY V-NOTCH				
	TRANSVERSO		LONGITUDINAL	
TAMAÑO DE MUESTRA mm	VALOR REQUERIDO PARA SER ACEPTADO ft-lb	VALOR MÍNIMO SIN REPRUEBA REQUERIDA ft-lb	VALOR REQUERIDO PARA SER ACEPTADO ft-lb	VALOR MÍNIMO SIN REPRUEBA REQUERIDA ft-lb
10x10	20	16	25	20
10x7.50	15	12	19	16
10x6.67	13	10	17	13
10x5.00	10	8	13	10
10x3.33	7	5	8	7
10x2.50	5	4	6	5

Fuente: [12]

CUADRO N° 2.6  
MÁXIMOS VALORES DE ESFUERZOS ADMISIBLES

MÁXIMOS VALORES DE ESFUERZOS ADMISIBLES (lbf/in <sup>2</sup> )				
			ESFUERZO ADMISIBLE	
ASTM	ESFUERZO DE TENSION	ESFUERZO DE ELASTICIDAD	DISEÑO	PRUEBA
<b>PLANCHAS Y MIEMBROS ESTRUCTURALES</b>				
A 353	100,000	75,000	33,333	-
A 553, Tipo 1	100,000	85,000	33,333	-
A 645	95,000	65,000	31,700	42,000
A 240, Tipo 304	75,000	30,000	22,500	27,000
A 240, Tipo 304L	70,000	25,000	18,750	22,500
B 209, Alloy 3003-0	14,000	5,000	3,750	4,500
B 209, Alloy 5052-0	25,000	9,500	7,100	8,550
B 209, Alloy 5083-0	40,000	18,000	13,300	16,200
B 209, Alloy 5086-0	35,000	14,000	10,500	12,600
B 209, Alloy 5154-0	30,000	11,000	8,250	9,900
B 209, Alloy 5456-0	42,000	19,000	14,000	17,100
B 221, Alloy 3003-0	14,000	5,000	3,750	4,500
B 221, Alloy 5052-0	25,000	10,000	7,500	9,000
B 221, Alloy 5083-0	39,000	16,000	12,000	14,400
B 221, Alloy 5086-0	35,000	14,000	10,500	12,600
B 221, Alloy 5154-0	30,000	11,000	8,250	9,900
B 221, Alloy 5456-0	41,000	19,000	13,600	17,100
B 221, Alloys 6061-T4 y T6	24,000		8,000	10,000
B 308, Alloys 6061-T4 y T6	24,000		8,000	10,000
A333, Grado 8	100,000	75,000	-	-
A 334, Grado 8	100,000	75,000	-	-
A 213, Grado TP, Tipo 304	75,000	30,000	22,500	27,000
A 213, Grado TP, Tipo 304L	70,000	25,000	18,750	22,500
A 312, Grado TP, Tipo 304	75,000	30,000	22,500	27,000
A 312, Grado TP, Tipo 304L	70,000	25,000	18,750	22,500
A 358, Grado 304, Clase I	75,000	30,000	22,500	27,000
B 210, Alloy 3303-0	14,000	5,000	3,750	4,500
B 210, Alloy 3003-H112	14,000	5,000	3,750	4,500
B 210, Alloy 5052-0	25,000	10,000	7,500	9,000
B 210, Alloy 5086-0	35,000	14,000	10,500	12,600
B 210, Alloy 5154-0	30,000	11,000	8,250	9,900
B 241, Alloy 5052-0	25,000	10,000	7,500	9,000
B 241, Alloy 5083-0	39,000	16,000	12,000	14,400
B 241, Alloy 5086-0	35,000	14,000	10,500	12,600
B 241, Alloy 5454-0	31,000	12,000	9,000	10,800
B 241, Alloy 5456-0	41,000	19,000	13,650	17,100
B 444 (UNS-N06625), Grado 1	120,000	60,000	40,000	54,000
B 444 (UNS-N06625), Grado 2	100,000	40,000	30,000	36,000
B 619 (UNS-N10276), Clase I	100,000	41,000	30,750	36,900
B 622 (UNS-N10276)	100,000	41,000	30,750	36,900

Fuente: [12]

CUADRO N° 2.7  
 FUNCION  $c_0$  PARA EFECTOS SÍSMICOS IMPULSIVOS EN TANQUES  
 RIGIDOS

PRESION BASE Y COEFICIENTES DE MOMENTO, MASA EFECTIVA DEL LIQUIDO Y ALTURAS ASOCIADAS POR EFECTOS IMPULSIVOS EN TANQUES RIGIDOS							
$\frac{H}{R}$	$c_0 (0)$	$\frac{m_0}{m_L}$	$\frac{h_0}{H}$	$\frac{\Delta h_0}{H}$	$\frac{h'_0}{H}$	$C_0^M$	$\Delta C_0^M$
0.0	.742(H/R)	.542(H/R)	0.40	--	--	.217(H/R)	0.500
0.1	0.076	0.056	0.40	8.33	8.73	0.0223	0.465
0.2	0.158	0.115	0.40	3.76	4.16	0.0459	0.431
0.3	0.243	0.176	0.40	2.24	2.64	0.0703	0.394
0.4	0.329	0.239	0.40	1.49	1.89	0.0952	0.357
0.5	0.414	0.300	0.40	1.06	1.46	0.120	0.320
0.6	0.494	0.359	0.40	0.792	1.192	0.144	0.284
0.7	0.568	0.414	0.40	0.609	1.009	0.166	0.252
0.8	0.633	0.464	0.401	0.480	0.881	0.186	0.222
0.9	0.691	0.508	0.403	0.387	0.789	0.205	0.196
1.0	0.740	0.548	0.404	0.317	0.721	0.221	0.174
1.1	0.782	0.583	0.406	0.264	0.669	0.236	0.154
1.2	0.818	0.614	0.407	0.222	0.630	0.250	0.136
1.3	0.848	0.641	0.409	0.190	0.599	0.262	0.121
1.4	0.873	0.665	0.411	0.163	0.574	0.273	0.108
1.5	0.894	0.686	0.413	0.142	0.555	0.283	0.097
1.6	0.912	0.705	0.415	0.124	0.539	0.292	0.0875
1.7	0.927	0.722	0.417	0.109	0.526	0.301	0.0790
1.8	0.939	0.737	0.419	0.097	0.516	0.309	0.0716
1.9	0.949	0.750	0.421	0.087	0.507	0.316	0.0651
2.0	0.957	0.763	0.422	0.078	0.500	0.322	0.0594
2.1	0.965	0.774	0.424	0.070	0.494	0.328	0.0543
2.2	0.970	0.784	0.426	0.064	0.490	0.334	0.0499
2.3	0.975	0.793	0.428	0.059	0.486	0.339	0.0459
2.4	0.979	0.802	0.430	0.053	0.483	0.345	0.0424
2.5	0.982	0.810	0.431	0.048	0.480	0.349	0.0392
3.0	0.992	0.842	0.439	0.033	0.472	0.369	0.0276
3.5	0.996	0.864	0.445	0.023	0.469	0.385	0.0203
4.0	0.998	0.881	0.450	0.018	0.468	0.397	0.0156
4.5	0.998	0.894	0.454	0.014	0.468	0.406	0.0123
5.0	0.999	0.905	0.458	0.011	0.469	0.414	0.0100

Fuente: [15]

CUADRO N° 2.8  
 FUNCION  $c_1$  PARA EFECTOS SISMICOS CONVECTIVOS EN TANQUES  
 RIGIDOS

PRESION BASE Y COEFICIENTES DE MOMENTO, MASA EFECTIVA DEL LIQUIDO Y ALTURAS ASOCIADAS POR EFECTOS CONVECTIVOS EN TANQUES RIGIDOS							
$\frac{H}{R}$	$c_1(\sigma)$	$\frac{m_1}{m_g}$	$\frac{m_2}{m_g}$	$\frac{h_1}{H}$	$\frac{\Delta h_1}{H}$	$\frac{h_2}{H}$	$\frac{\Delta h_2}{H}$
0.0	0.837	0.837	0.073	0.500	$0.295(R/H)^2$	0.500	$0.35(R/H)^2$
0.1	0.823	0.827	0.067	0.501	29.33	0.500	3.356
0.2	0.783	0.801	0.054	0.506	7.211	0.543	0.732
0.3	0.724	0.761	0.042	0.512	3.007	0.585	0.263
0.4	0.652	0.712	0.033	0.521	0.687	0.630	0.113
0.5	0.575	0.660	0.027	0.533	1.028	0.674	0.524
0.6	0.500	0.608	0.023	0.545	0.674	0.712	0.0256
0.7	0.429	0.558	0.020	0.559	0.463	0.745	0.0128
0.8	0.365	0.511	0.017	0.574	0.328	0.772	0.0066
0.9	0.308	0.470	0.015	0.590	0.239	0.795	0.0034
1.0	0.259	0.432	0.014	0.606	0.177	0.814	0.0018
1.1	0.217	0.399	0.012	0.621	0.133	0.830	0.0010
1.2	0.182	0.370	0.011	0.637	0.101	0.844	0.0005
1.3	0.152	0.344	0.011	0.652	0.077	0.856	0.0003
1.4	0.126	0.321	0.010	0.667	0.059	0.866	0.0002
1.5	0.105	0.306	0.009	0.681	0.046	0.875	0.0001
1.6	0.088	0.282	0.009	0.694	0.036	0.883	
1.7	0.073	0.266	0.008	0.707	0.028	0.890	
1.8	0.061	0.252	0.008	0.719	0.022	0.896	
1.9	0.051	0.239	0.007	0.731	0.017	0.901	
2.0	0.042	0.227	0.007	0.742	0.014	0.906	
2.1	0.035	0.216	0.007	0.752	0.011	0.911	
2.2	0.029	0.206	0.006	0.762	0.009	0.915	
2.3	0.024	0.198	0.006	0.771	0.007	0.918	
2.4	0.020	0.189	0.006	0.779	0.005	0.922	
2.5	0.017	0.182	0.005	0.787	0.004	0.925	
3.0	0.0067	0.151	0.005	0.820	0.001	0.937	
3.5	0.0027	0.130	0.004	0.845		0.946	
4.0	0.0011	0.114	0.003	0.864		0.953	
4.5	0.0004	0.101	0.003	0.879		0.958	
5.0	0.0002	0.091	0.003	0.891		0.962	

Fuente: [16]

CUADRO N° 2.9  
FACTOR DE ZONA SÍSMICA

FACTOR DE ZONA SÍSMICA (aceleración horizontal)	
ZONA SÍSMICA	Z (aceleración horizontal)
1	0.075
2A	0.15
2B	0.20
3	0.30
4	0.40
ZONAS SÍSMICAS PARA ALGUNAS ÁREAS DEL PLANETA	
LOCALIDAD	ZONA SÍSMICA
<u>ASÍA</u>	
Turquía	
Ankara	2B
Karamursel	3
<u>ÁREA DEL OCÉANO ATLANTICO</u>	
Azores	2B
Bermuda	1
<u>MAR DEL CARIBE</u>	
Islas Bahamas	1
Zona del canal de Panamá	2B
Islas Leeward	3
Puerto Rico	3
Isla Trinidad	2B
<u>AMÉRICA DEL NORTE</u>	
Groenlandia	1
Islandia	
Keflavik	3
<u>ÁREA DEL OCÉANO PACÍFICO</u>	
Islas Carolina	
Koror, Paulau	2B
Ponape	0
Islas Johnston	1
Kwajalein	
Islas Marianas	
Guam	3
Saipán	3
Tinian	3
Isla Marcus	1
Okinawa	3
Islas de Filipinas	3
Islas de Samoa	3
Islas Wake	0

Fuente: [17]



CUADRO N° 2.10  
COEFICIENTES DE SUELO

COEFICIENTES DE SUELO		
TIPO	DESCRIPCION	FACTOR S
S <sub>1</sub>	UN PERFIL DE SUELO CON LAS SIGUIENTES CARACTERISTICAS: - MATERIAL ROCOSO CARACTERIZADO POR UNA VELOCIDAD DE ONDA DE CORTE MAYOR A 2500 ft/seg O POR OTROS MEDIOS DE CLASIFICACIÓN. - CONDICIONES DE SUELO DENSO Y DURO DONDE LA PROFUNDIDAD ES MENOR DE 200ft.	1.0
S <sub>2</sub>	UN PERFIL DE SUELO, COMPACTO Y DENSO DE PROFUNDIDAD NO MAYOR DE 200 ft.	1.2
S <sub>3</sub>	UN PERFIL DE SUELO, DE 70 ft O MAS DE PROFUNDIDAD PERO CON UN CONTENIDO DE 20 ft DE ARCILLA SUAVE Y MEDIA COMPACTA PERO DE NO MÁS DE 40 ft DE ARCILLA SUAVE.	1.5
S <sub>4</sub>	UN PERFIL DE SUELO, QUE NO TIENE MAS DE 40 ft DE ARCILLA SUAVE CARACTERIZADO POR UNA VELOCIDAD DE ONDA DE CORTE MENOR DE 500 ft/seg.	2.0

Fuente: [17]

CUADRO N° 2.11  
MATERIALES PARA EL TANQUE EXTERNO

TEMPERATURA DE DISEÑO DE METAL	ESPESOR DE LA PLANCHA CON CORROSION INCLUIDA	ESPECIFICACIONES PERMITIDAS	
		ESPECIFICACION	GRADO
65°F y superior	≤ 3/4	-----	-----
	≤ 1 > 1	ASTM A 36 CSA G40.21-M	260W,300W,350W
25°F y superior	≤ 1/2	-----	
	≤ 1	ASTM A 36 Mod 2 ASTM A 131 CSA G40.21-M	B 260W, 300W, 350W
	> 1 ≤ 1/2	ASTM A 131 CSA G40.21-M	B 260W, 300W, 350W
- 5°F y superior	> 1/2	ASTM A 131 ASTM A 516 ASTM A 573 ASTM A 662 ASTM A 737 ASTM A 841 CSA G40.21-M ISO 630	CS 55, 60, 65, 70 58, 65, 70 B y C B Clase 1 260W, 300W, 350W E 275, E355 Calidad D
	≤ 1/2	ASTM A 131 ASTM A 516 ASTM A 537 ASTM A 573 ASTM A 633 ASTM A 662 ASTM A 678 ASTM A 737 ASTM A 841 CSA G40.21-M ISO 630	CS 55, 60, 65, 70 Clases 1 y 2 58, 65, 70 C y D B y C A y B B Clase 1 260W, 300W, 350W E 275, E355 Calidad D
- 35°F y superior	≤ 1	ASTM A 131 ASTM A 516 ASTM A 537 ASTM A 573 ASTM A 633 ASTM A 662 ASTM A 678 ASTM A 737 ASTM A 841 CSA G40.21-M ISO 630	CS 55, 60, 65, 70 Clases 1 y 2 58 C y D B y C A y B B Clase 1 260W, 300W, 350W E275, E355 y Calidad D
	> 1	ASTM A 131 ASTM A 516 ASTM A 537 ASTM A 573 ASTM A 633 ASTM A 662 ASTM A 678 ASTM A 737 ASTM A 841 CSA G40.21-M ISO 630	CS 55, 60, 65, 70 Clases 1 y 2 58 C y D B y C A y B Clase 1 B 260WT, 300WT, 350 WT E275, E355 Calidad D

Fuente: [23]

CUADRO N° 2.12  
TEMPERATURA DE METAL

GRUPO	NUMERO DE ESPECIFICACION	GRADO	TEMPERATURA DE METAL DE DISEÑO MÍNIMA ESPESOR DE LAS PLANCHAS INCLUIDA LA CORROSIÓN PERMITIDA ( in)			
			3/16-3/8	> 3/8-1/2	> 1/2-1	> 1-1/2
I(de-oxigenado)	A 36	Mod 2	- 20	- 10	+ 5	—
	A 131	B	- 20	- 10	+ 5	—
	CSA 40.21-M	260W	0	+ 10	+ 25	—
	ISO 630	E 275Calidad C	- 20	- 10	+ 5	+ 5
II(de-oxigenado completo)	A 573	58b	- 30	- 20	- 10	0
	A 131	CS	- 60	- 50	- 35	- 20
	A 516	55 y 60	- 30	- 20	- 10	0
	A 516	55 y 60c	- 40	- 30	—	—
	ISO 630	E 275 Calidad D	- 30	- 20	- 10	0
	CSA G40.21-M	260W	- 40	- 30	- 15	0
III (de-oxigenado completo y alta resistencia)	A 573	65 y 70	- 30	- 20	- 10	+ 5
	A 516	65 y 70	- 30	- 20	- 10	+ 5
	A 516	65 y 70 Mod 1	- 40	- 30	- 15	0
	A 537	1 y 2	- 60	- 50	- 35	- 20
	A 662	B y C	- 40	- 30	- 15	0
	A 633	C y D	- 60	- 50	- 35	- 20
	A 678	A y B	- 60	- 50	- 35	- 20
	A 737	B	- 60	- 50	- 35	- 20
	ISO 630	E 355 Calidad D	- 30	- 20	- 10	+ 5
	CSA G40.21-M	300W	- 40	- 30	- 15	0
	CSA G40.21-M	240W	- 30	- 10	+ 5	+ 20

Fuente: [24]

**Anexo N° 6**  
**LISTADO DE ABREVIATURAS**

AEGL.- Acute Exposure Guideline Levels  
ASCE.- American Society of Civil Engineers  
ASME.- American Society of Mechanical Engineers  
ASTM.- American Society of Testing Materials  
ASTM A20/A20M.- Standard Specification for General Requirements for Steel Plates for Pressure Vessels  
ASME B 31.3.- American Society of Mechanical Engineers-Process Piping  
API.- American Petroleum Institute  
API 620.- Design and Construction of Large, Welded, Low-Pressure Storage Tanks  
BASF.- Baden Aniline and Soda Factory  
BOD.- Biochemical Oxygen Demand  
CAPEX.- Capital Expenditures  
CAS.- Chemical Abstracts Service  
CSA.- Canadian Standards Association  
CFR.- Code of Federal Regulations  
DOT.- Department of Transportation  
EPA.- Environmental Protection Agency  
FWPCA.- Federal Water Pollution Control Act  
GESAMP.- Group of Experts on The Scientific Aspects of Marine Environmental Protection  
GNL.- Gas Natural Líquido  
IDHL.- International Digest of Health Legislation  
IMO.- International Maritime Organization  
LNG.- Liquefied Natural Gas  
MCHE.- Main Cryogenic Heat Exchanger  
MMTPA.- Millones de Toneladas por Año  
MR.- Mixed Refrigerants  
NAERG.- North American Emergency Response Guidebook  
NFPA.- National Fire Protection Association  
NFPA 59A.- Standard for the Production, Storage, and Handling of Liquefied Natural Gas (LNG)

NGL.- Natural Gas Liquid

OPEX.- Operation Expenditures

OSHA.- Occupational Safety And Health Administration

PEL.- Permissible Exposure Limits

RCRA.- Resource Conservation and Recovery Act

STEL.- Short Time Exposure Limit

TLV.- Threshold Limit Value

TWA.- Total Weighted Average

UN.- United Nations

US\$.- Dólar Norteamericano