

13
25



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLAN

“ESTUDIO TECNICO DE LOS DIFERENTES TIPOS
DE ALMACENAMIENTO DE GAS LICUADO
DEL PETROLEO (LPG)”

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERA QUIMICA
P R E S E N T A :
ALMA IRENE / HERNANDEZ RAMIREZ

ASESOR DE TESIS: ING. GILBERTO A. AMAYA VENTURA.

CUAUTITLAN IZCALLI, EDO. DE MEX.

1999

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

270101



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVANZA DE
MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS

U. N. A. M.
FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES CUAUTITLAN



DR. JUAN ANTONIO MONTARAZ CRESPO
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLAN
PRESENTE

ATN: Q. Ma. del Carmen García Mijares
Jefe del Departamento de Exámenes
Profesionales de la FES Cuautitlán

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la TESIS:

Estudio técnico de los diferentes tipos de almacenamiento de gas
licuado del petróleo (L.P.G.).

que presenta la pasante: Alma Irene Hernández Ramírez
con número de cuenta: 9056898-5 para obtener el TITULO de:
Ingeniera Química

Considerando que dicha tesis reúne los requisitos necesarios para ser discutida en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO

ATENTAMENTE.
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"

Cuautitlán Izcalli, Edo. de Méx., a 30 de Septiembre de 199 8

PRESIDENTE	<u>L.Q. Fernando Orozco Ferreyra</u>	<u>[Firma]</u>
VOCAL	<u>M. en C. Eligio Pastor Rivero Martínez</u>	<u>[Firma]</u>
SECRETARIO	<u>L.Q. Gilberto A. Amaya Ventura</u>	<u>[Firma]</u>
PRIMER SUPLENTE	<u>M. en C. Ricardo P. Hernández García</u>	<u>[Firma]</u>
SEGUNDO SUPLENTE	<u>L.Q. Ma. Elena Quiroz Macías</u>	<u>[Firma]</u>

DEDICO ESTE TRABAJO:

A DIOS.

A MIS PADRES J. JESUS HERNANDEZ E IRENE RAMIREZ.

POR HABERME DADO LA VIDA, POR SU CARÍÑO Y TODOS LOS ESFUERZOS QUE PARA MIS HERMANOS Y YO HAN TENIDO, POR TODO LO QUE ME HAN INCULCADO Y ME HAN PERMITIDO SER.

EN ESPECIAL A TI PAPA QUE ME APOYASTE DURANTE TODA MI CARRERA Y POR CONFIAR EN MI. Y A TI MAMA PORQUE HAS ESTADO CONMIGO CUANDO MAS LO HE NECESITADO.....

LOS QUIERO.

A MI HIJO JESUS EMMANUEL.

QUE DESDE EL MOMENTO EN QUE ME ENTERÉ DE SU EXISTENCIA, SE CONVIRTIO EN LA FUERZA QUE ME IMPULSA PARA LOGRAR LO QUE ME PROPONGA Y PORQUE CON TAN SOLO UNA SONRISA ALIVIA EN MI TODO DOLOR Y TRISTEZA.....

TE AMO MI PEQUEÑO.

A MI ESPOSO GUSTAVO.

EL HOMBRE CON QUIEN HE DECIDIDO COMPARTIR MI VIDA, POR SU CARÍÑO Y POR APOYARME EN ESPECIAL EL ESFUERZO PARA ESTE TRABAJO.

TE QUIERO.

A MIS HERMANAS PATY, GEORGINA, YURI, Y MI HERMANO JORGE.

PORQUE JUNTOS HEMOS COMPARTIDO MUCHOS MOMENTOS DE ALEGRIA Y DE TRISTEZA EN NUESTRAS VIDAS Y PORQUE SE QUE SIEMPRE ESTAN CONMIGO.

A MIS SOBRINAS BRISIA Y LESLIE.

POR DARME MUCHOS MOMENTOS DE TERNURA Y ALEGRIA.

A MIS GRANDES AMIGOS.

HELEN VELEZ, VERONICA HERNANDEZ, PATY GARCIA, MARIO, BETO,
CARLOS, EDUARDO, RODRIGO Y LA 17AVA. GENERACION DE ING. QUIM.
POR EL TIEMPO QUE JUNTOS COMPARTIMOS Y QUE NUNCA PODREMOS
OLVIDAR.

AL ING. PEDRO LEMUS ARAGON Y AL ING. JESUS MARIN CRUZ.
POR SU AMISTAD, SUS ENSEÑANZAS Y GRANDES CONSEJOS, EN ESPECIAL AL
ING. LEMUS ARAGON POR APOYARME EN LA REALIZACION DE ESTE
TRABAJO..... MIL GRACIAS.

AL ING. GILBERTO A. AMAYA.
POR HABER ACEPTADO AMABLEMENTE SER MI ASESOR INTERNO, POR SUS
CONSEJOS Y SU AMISTAD QUE INCONDICIONALMENTE ME HA BRINDADO.

AGRADEZCO A LA UNAM Y A LA FES-CUAUTITLAN.

POR DARME LA OPORTUNIDAD DE ADQUIRIR UNA FORMACION PROFESIONAL.

**Y A TODOS LOS QUE DE ALGUNA MANERA COLABORARON EN LA
REALIZACIÓN DE ESTE TRABAJO.**

GRACIAS

ALMA IRENE HERNANDEZ RAMIREZ



	Página
INDICE	1
Objetivos.	3
Introducción	4
CAPITULO 1.0 GENERALIDADES.	6
1.1 Antecedentes	7
1.2 Obtención del LPG.	8
1.2.1 Propiedades.	11
1.2.2 Productos y composiciones.	16
1.3 Técnicas de transporte y distribución del LPG.	16
1.4 Tipos de almacenamiento de LPG.	21
CAPITULO 2.0 ALMACENAMIENTO SUPERFICIAL EN RECIPIENTES A PRESION.	23
2.1 Generalidades	23
2.2 Diagrama de flujo de proceso.	24
2.3 Descripción del proceso.	24
2.4 Lista de equipo	26
2.5 Requerimientos mínimos de equipo.	27
CAPITULO 3.0 ALMACENAMIENTO SUPERFICIAL EN RECIPIENTES REFRIGERADOS.	35
3.1 Generalidades	35
3.2 Diagrama de flujo de proceso.	37
3.3 Descripción del proceso.	39
3.4 Lista de equipo.	40
3.5 Requerimientos mínimos de equipo.	41
CAPITULO 4.0 ALMACENAMIENTO SUBTERRANEO EN CAVIDADES SALINAS	43
4.1 Antecedentes.	43
4.2 Generalidades	44



4.3 Diagrama de flujo de proceso	47
4.4 Descripción del proceso.	47
4.5 Principios de construcción de un depósito.	49
4.5.1 Técnicas de creación.	50
4.5.2 Esquema de funcionamiento de operación.	51
4.6 Requerimientos mínimos de infraestructura.	52
CAPITULO 5.0 ALMACENAMIENTO SUBTERRANEO EN CAVIDADES ROCOSAS.	56
5.1 Antecedentes.	56
5.2 Generalidades.	57
5.3 Diagrama de flujo de proceso.	58
5.4 Descripción del proceso.	60
5.5 Principios de construcción de un depósito.	60
5.5.1 Técnicas de creación	62
5.5.2 Esquema de funcionamiento de operación.	64
5.6 Requerimientos mínimos de infraestructura.	65
CAPITULO 6.0 RESUMEN GENERAL Y ASPECTOS ECONOMICOS	69
6.1 Ventajas y desventajas de los diferentes tipos de almacenamiento.	70
6.2 Enfoque técnico económico.	74
6.3 Métodos de caracterización del comportamiento mecánico del almacenamiento y predicción de su vida útil.	76
6.4 Gráficas comparativas de costo.	78
6.4.1 Producción y demanda	78
6.4.2 Costos de almacenamiento.	79
6.5 Consideraciones.	79
Conclusiones.	87
Bibliografía.	89
Anexos.	94



OBJETIVOS

Presentar en forma general los aspectos básicos de tecnología de los diferentes tipos de almacenamiento del LPG empleados a nivel internacional.

Revisar el proceso típico requerido por cada uno de los tipos de almacenamiento presentado.

Determinar los requerimientos mínimos de equipo e infraestructura, en cuanto a la factibilidad de un proceso seguro.

Mostrar los diseños eficientes los cuales aseguran una buena operación facilitando el abastecimiento nacional y evitando daños ecológicos al medio ambiente y trastornos en los sectores de gran consumo.

Comparar en forma genérica, técnica y económica los tipos de almacenamiento.



INTRODUCCION

La industria requiere contar con grandes capacidades de almacenamiento para productos combustibles, en especial los "Gases Licuables del Petróleo" (LPG, por sus siglas en inglés "LIQUEFIED PETROLEUM GAS"); que por ser un combustible de alto consumo para su distribución en el sector industrial y doméstico, requiere de sistemas de almacenamiento en grandes volúmenes a un bajo costo. Adicionalmente se ha incrementado el uso del LPG ya que se le emplea como materia prima importantísima en la Industria Petroquímica.

Las áreas donde se produce el LPG en el país de encuentran alejadas de los principales centros de consumo, este consumo no es el mismo a través del tiempo, tiende a incrementarse a finales y principios de año.

Para cubrir estos problemas de demanda y/o desabasto es necesario contar con sistemas de almacenamiento eficientes, por lo que en este trabajo se presenta técnicamente los tipos de almacenamiento de LPG y su aplicación en el entorno nacional.

Para cumplir con los objetivos se exponen los siguientes capítulos:

Capítulo 1.0 Generalidades: Se explican los antecedentes del LPG en forma general abarcando desde los orígenes del petróleo, su procesamiento, la obtención del LPG, sus propiedades, usos en el sector industrial y doméstico. Así mismo se explican las técnicas de distribución y transporte reuniendo los aspectos globales de los diferentes tipos de almacenamiento de LPG.

En los siguientes capítulos, se analizan los diferentes tipos de almacenamiento existentes a nivel mundial, se agrupan en dos tipos, el primero consiste de el almacenamiento superficial al que pertenecen los recipientes a presión y los recipientes refrigerados y que se describen en los capítulos que a continuación se ordenan.



Capítulo 2.0 Almacenamiento superficial en recipientes a presión. Se presenta este sistema, mostrando el proceso típico que es utilizado en el ambiente industrial y definiendo los requerimientos mínimos del equipo utilizado de estos sistemas.

Capítulo 3.0 Almacenamiento superficial en recipientes refrigerados. Al igual que en el capítulo anterior, se presenta este sistema exponiendo el proceso empleado industrialmente y describiendo los requerimientos mínimos de equipo utilizado.

El segundo tipo de almacenamiento y que es de aplicación en otros países se le reconoce como almacenamiento subterráneo; y este puede ser, en cavidades salinas y en cavidades rocosas. En los capítulos siguientes se hace mención de estos.

Capítulo 4.0 Almacenamiento subterráneo en cavidades salinas: En este capítulo se sintetizan los antecedentes y generalidades de las cavidades salinas, se exhibe e interpreta el proceso típico correspondiente, así como los requerimientos mínimos básicos para su diseño, construcción y funcionamiento.

Capítulo 5.0 Almacenamiento subterráneo en cavidades rocosas. En este capítulo se tratarán los mismos puntos del capítulo anterior, pero considerando cavidades rocosas.

Capítulo 6.0 Resumen general y aspectos económicos. En éste último capítulo se realiza una comparación técnica y económica de los sistemas de almacenamiento de LPG y se revisa su demanda en el mercado.

Simplificando lo que se abarca en el contenido de este trabajo, es mostrar un panorama general de los diferentes tipos de almacenamiento de LPG existentes a nivel mundial. Y se establecen criterios técnico - económicos para seleccionar el sistema más conveniente y provechoso en el entorno nacional.



CAPITULO UNO

GENERALIDADES

El petróleo es extremadamente importante en la civilización moderna, tiene varios usos principales; combustible, lubricación y materia prima de muchos procesos. Suministra más de la mitad de la energía consumida por la civilización actual. Los principales productos de la refinación por orden de volumen son: gasolina, fuel-oil residual y destilado, gas, asfalto, gases licuados; sus productos menores son: lubricantes, grasas, queroseno, cera y coque del petróleo.

La industria petroquímica consiste en la realización de procesos químicos o físicos para la elaboración de compuestos a partir, total o parcialmente, de hidrocarburos naturales del petróleo o de hidrocarburos que sean producto o subproductos de las operaciones de refinación. Esta industria ha sido considerada una rama estratégica de la economía, ya que ofrece amplias posibilidades de sustitución de importaciones. Proporciona la materia prima principal a un conjunto de procesos, incrementando el valor agregado a los hidrocarburos.

La utilización de hidrocarburos como materia prima para la elaboración de productos químicos se inició a principios de este siglo, a raíz de la necesidad imperativa de encontrar sustitutos de varios productos naturales y materias primas nuevas.

Por ser un combustible de alto consumo y debido a su gran demanda nacional en el sector industrial y doméstico, cada vez se requiere de capacidades grandes de almacenamiento de LPG, estando en función de la capacidad requerida, costo y tipo de almacenamiento que es involucrado en ello, así como las condiciones que se presenten.

El manejo del producto "LPG" requiere de mucho cuidado ya que es uno de los combustibles más nobles, pero que necesita manejarse a presiones mayores a la atmosférica durante su transporte y/o almacenamiento y que en caso de descuido una fuga puede llegar a tener muy serias consecuencias. Por tal motivo se necesita adquirir un conocimiento más amplio acerca del manejo de este gas.



En México se empezó a requerir del conocimiento de la tecnología de almacenamiento de grandes capacidades o volúmenes de combustibles a partir del año de 1985, siendo construidos y operados por PEMEX en ese año cavidades en domos salinos para el almacenamiento de crudo.

Para el análisis del presente trabajo se tomaron en consideración los aspectos económicos y operativos de los tipos de almacenamiento referidos en la literatura o de proyectos desarrollados recientemente.

1.1 ANTECEDENTES.

La palabra petróleo, castellanizada del latín petroleum, (petra-piedra y oleum-aceite), significa aceite de piedra.

El vocablo chapopote o chapapote es castellanización de la palabra náhuatl chapopoctli, de cháhuatl-grasa y poctli-humo.

Procedencia.- El petróleo y el gas que fluyen de los pozos, debidamente tratados, permiten la obtención de una gran diversidad de productos, en su mayoría combustibles, indispensables para la operación industrial en general. Entre todos estos productos es objeto de particular atención el llamado "gas licuado del petróleo", que por sus cualidades específicas se ha convertido en uno de los combustibles más ventajosos, en una materia prima muy importante y con mayores perspectivas en su uso.

ORIGEN DEL PETROLEO

¿Cuál es su origen? No se sabe exactamente cómo se formó el petróleo en el subsuelo. Las teorías de su origen se siguen discutiendo hasta la fecha. Varios químicos famosos, entre ellos el ruso, Mijail Basilevich Lomonosov (1711-1765), en 1745, el francés, Marcellin Pierre Eugene Berthelot (1827-1907), en 1866, el ruso Dimitri Ivanovich Mendeleiev (1834-1907), en 1877 y el



francés Paul Sabatier (1854-1941), en 1902 defendieron el origen mineral. Otros investigadores se inclinan por el origen orgánico, sosteniendo que proviene de la descomposición de residuos animales y vegetales que se han transformado en aceite.

Los estudios recientes hechos en laboratorio, con análisis de rocas petrolíferas de campos productores, parecen confirmar un origen orgánico, ya que se han encontrado en ellas, ciertas propiedades ópticas, que sólo se localizan en las sustancias orgánicas, por otro lado, el contenido de nitrógeno y otras sustancias en el petróleo, sólo puede proceder de materiales orgánicos.

También se puede confirmar el origen orgánico por el hecho de que la mayor parte de los yacimientos en el mundo se localizan en lugares que fueron ocupados por lagos y mares hace millones de años.

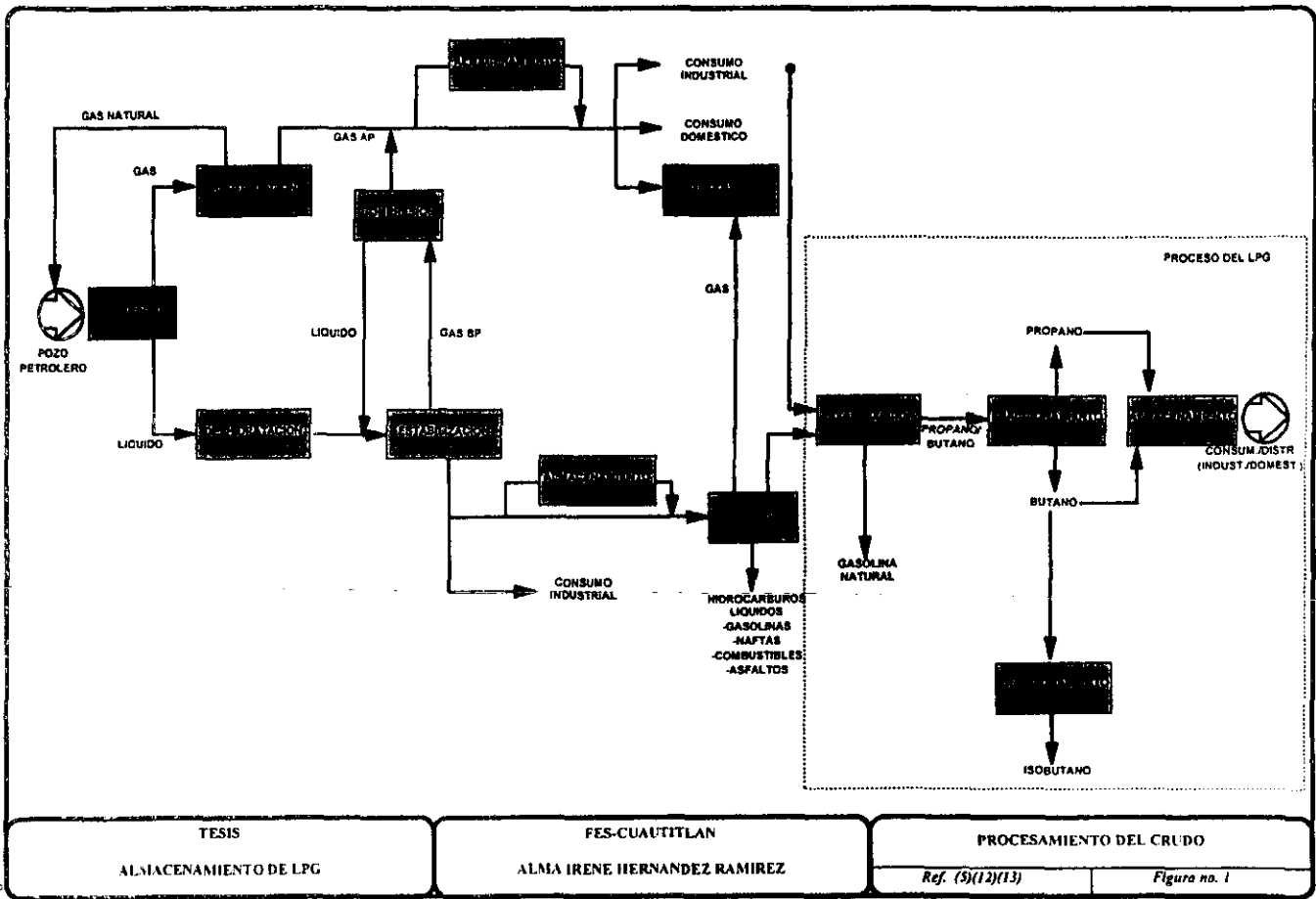
CARACTERISTICAS DEL PETROLEO:

Se encuentra en el subsuelo, impregnado en formaciones de tipo arenoso o calcáreo; asume los tres estados físicos de la materia; sólido, líquido y gaseoso, según su composición y la temperatura y presión a que se encuentra. Su color varía entre el ámbar y el negro; su densidad es menor que la del agua. En el subsuelo, se encuentra generalmente encima de una *capa de agua*, hallándose en la parte superior una de gas.

La *figura no. 1* muestra un diagrama del procesamiento general del petróleo, hasta la obtención del LPG.

1.2 OBTENCION DEL LPG.

Los diferentes campos de hidrocarburos son las fuentes primarias para la obtención del LPG, tales como: campos de gas natural (vía procesamiento del gas natural) de petróleo y gas (vía refinación).





El gas natural que acompaña al petróleo puede provenir en forma libre (gas) o asociada (disuelto) separadamente, cuando el yacimiento se ha agotado o que solo contenga gas. Algunos gases proceden de pantanos (gas de los pantanos) y capas carboníferas.

La mayor parte del gas asociado o libre en los campos petrolíferos es gas natural (metano), incoloro, inodoro y muy flamable (CH_4) también en menor cantidad puede haber etano (C_2H_6), propano (C_3H_8), butano (C_4H_{10}), pentano (C_5H_{12}), y vapores de gasolina.

Si el gas producido tiene un contenido alto de etano, propano, más pesados (butano, isobutano, pentanos, etc.), se le denomina gas natural rico, si a la vez se elimina el ácido sulfhídrico se le denomina gas dulce, y si se reduce el contenido de agua se le denomina gas seco.

La recuperación de licuables del gas natural se lleva a cabo mediante plantas de absorción (de baja eficiencia) o plantas criogénicas. En estas plantas se obtiene gas natural procesado (prácticamente metano), el etano y compuestos de mayor peso molecular, se envían a plantas fraccionadoras, en donde se separan las fracciones de etano que se mandan a las plantas de etileno, propano y butano, que en forma individual o mezclados conforman el "Gas Licuado del Petróleo (LPG)" y los pentanos que constituyen la nafta ligera.

Durante la producción primaria de petróleo crudo, se obtienen grandes volúmenes de gas natural "NG" que se encuentra disuelto, éste se acondiciona y se envía a las plantas de absorción o criogénicas.

Dentro de la refinación convencional del petróleo, éste se despunta (estabilizadora), con la *consecuente obtención del gas*; así mismo, durante el *cracking (reformadoras) del petróleo* se obtienen fracciones ligeras de hidrocarburos; tales corrientes son carga para plantas fraccionadoras, en donde se obtiene nuevamente gas licuado.

Originalmente todo el LPG, se obtenía en plantas de absorción de gasolina natural; sin embargo aunque todavía se obtienen grandes cantidades en de esta forma, las refineries de petróleo vienen produciendo cada vez mayores cantidades de LPG, mediante la instalación de nuevos equipos especiales.



El LPG obtenido de plantas de absorción de gasolina natural, consiste en forma predominante de propano, isobutano y butano normal, y el obtenido en plantas de separación en refinerías contiene propileno, butadieno y podrán estar presentes, en proporciones reducidas el etileno, el propileno y el etano.

La *figura no. 2* muestra las fuentes de obtención de LPG por varios procesos químicos.

1.2.1 PROPIEDADES.

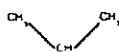
El término de LPG se aplica a diferentes mezclas de propano y butano licuados bajo condiciones moderadas de presión, a temperaturas normales, pero que a condiciones atmosféricas son gaseosos, en estado gaseoso el LPG es inodoro, incoloro e insípido, por lo que, como medida de seguridad, se le mezcla un odorizante, generalmente un mercaptano (compuesto sulfurado), para descubrir su presencia y evitar intoxicaciones.

El butano, propano y sus correlativos pueden licuarse por enfriamiento o por presión y venderse en tanques, para usarse como gas embotellado. La condensación de sustancias gaseosas se llama licuefacción, en la cual un gas debe enfriarse bajo cierta temperatura hasta licuarse.

Los principales productos que se consideran como componentes del LPG son el propano y el butano, así como mezclas comerciales propano-butano de las cuales predominan los propilenos y butadienos.

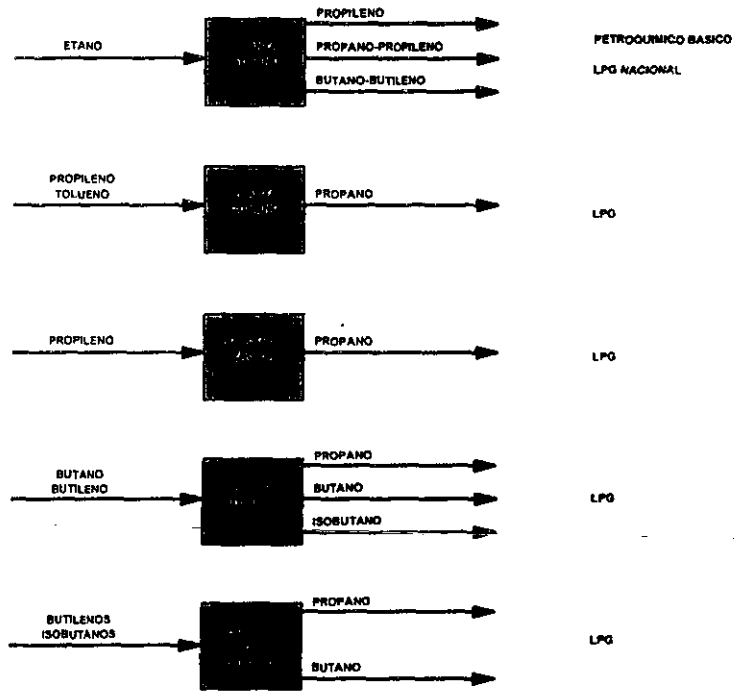
El propano es el principal componente del LPG que se emplea para los sistemas de calefacción caseros y para cocinar primordialmente en aquellas áreas donde el gas natural no se encuentra disponible.

Su fórmula molecular desarrollada es:



Propano

PROCESOS PETROQUIMICOS



TESIS

ALMACENAMIENTO DE LPG

FES-CUAUTITLAN

ALMA IRENE HERNANDEZ RAMIREZ

FUENTES DE OBTENCION DEL LPG

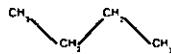
Ref. (12)(15)

Figura no. 2

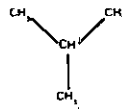


El Butano se utiliza en los encendedores desechables que se venden al público y en el combustible enlatado de las estufas de gas para empacar, así como en las lámparas de gas, sus isómeros son gaseosos, pero fáciles de licuar.

Sus fórmulas moleculares desarrolladas son



Butano



Isobutano

La mezcla propano-butano se vende en el comercio en estado líquido bajo presión en tanques de acero.

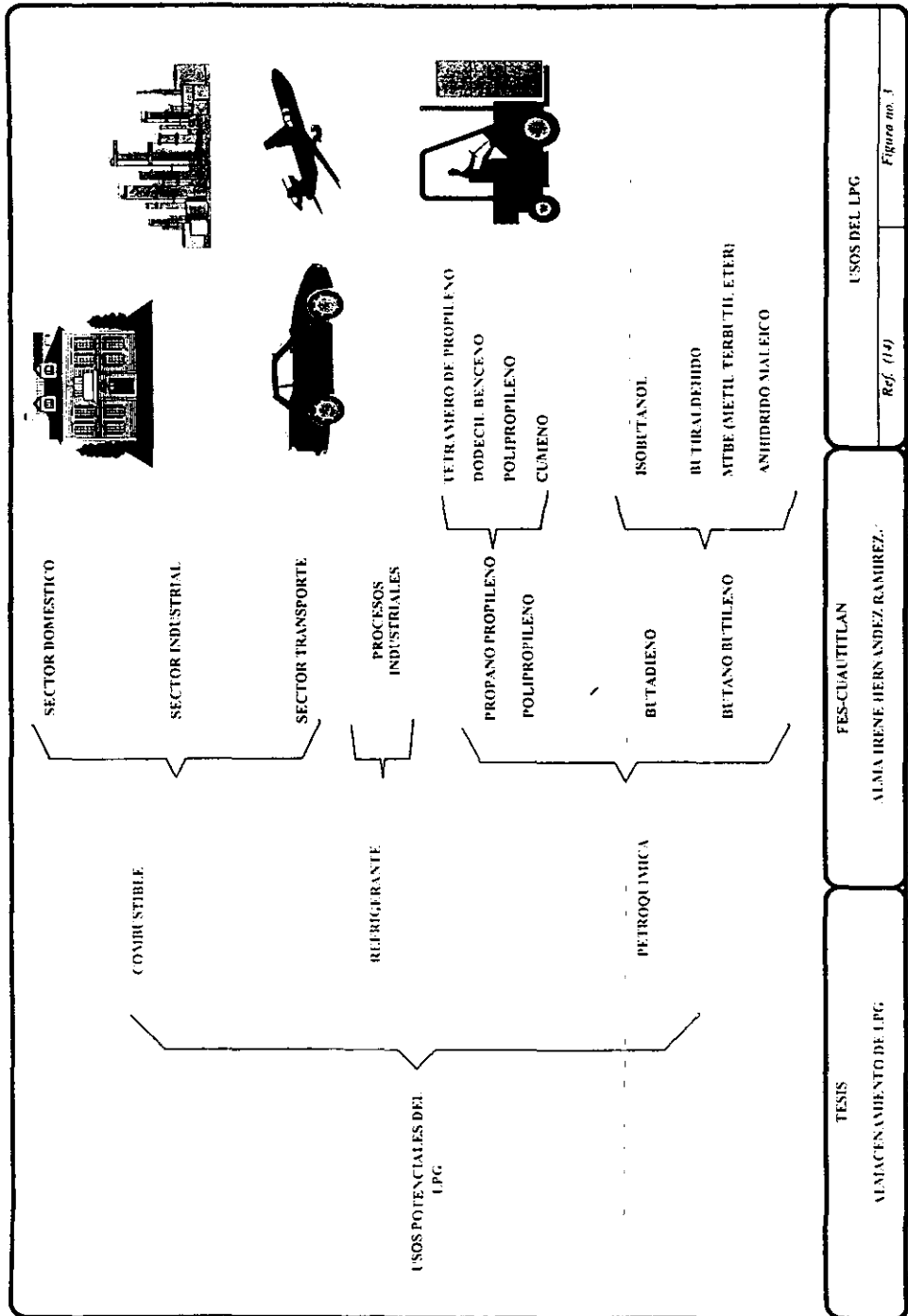
Los principales usos del LPG como materia prima en el mundo se muestran en la *figura no. 3*

Las mezclas propano-butano licuadas a presión son líquidas transparentes como el agua pero más ligeras que ésta, la densidad del LPG, en estado líquido es aproximadamente 0.530 g/cm³.

El LPG en estado líquido ejerce una presión en función de su presión de vapor, debido a que su presión de vapor es más alta que la presión atmosférica, el líquido está tratando de alcanzar un punto de equilibrio en función de la temperatura y de la cantidad de calor que absorbe del medio ambiente que rodea al recipiente, en otras palabras, al elevarse la temperatura del líquido, la presión aumenta y al disminuir la temperatura, la presión baja.

El LPG es químicamente estable, no es tóxico, es generalmente inodoro, su acción fisiológica sobre el organismo se traduce en náuseas y en una ligera acción anestésica. En concentraciones de 20% en la atmósfera no produce ningún trastorno después de estar expuesto durante 90 minutos.

En la *tabla no. 1* se muestra las propiedades físicas y químicas del LPG, referidas en la literatura. (1)(33)



CONCEPTO	PROPANO	BUTANO
FORMULA	C_3H_8	C_4H_{10}
PRESION DE VAPOR, EN PSIA A		
70°F	127	17
100°F	196	37
130°F	287	69
PUNTO INICIAL DE EBULLICION A 14.7 PSIA, °F	-44	15
GRAVEDAD ESPECIFICA DE GAS A 60°F	1.50	2.01
GRAVEDAD ESPECIFICA DE LIQUIDO A 60°F	0.504	0.582
PESO POR GALON DE LIQUIDO A 60°F, LB	4.20	4.81
CALOR ESPECIFICO DE LIQUIDO BTU/LB A 60 °F	0.630	0.549
PIES CUBICOS DE VAPOR POR LIBRA A 60°F	8.66	6.51
PIES CUBICOS DE VAPOR POR GALON A 60°F	36.38	31.26
CALOR LATENTE DE VAPORIZACION		
BTU POR GALON	773	808
BTU POR LIBRA	184	167
CALOR DE COMBUSTION A 60°F		
BTU. POR PIE CUBICO	2,488	3,280
BTU POR GALON	91,502	10,203
BTU POR LIBRA	21,548	21,221
TEMPERATURA DE IGNICION EN AIRE, °F	920-1,020	900-1,000
TEMPERATURA MAXIMA DE FLAMA EN AIRE, °F	3,595	3,615
LIMITES DE FLAMABILIDAD, % DE VAPOR EN MEZCLA AIRE-GAS		
ALTO	9.60	8.60
BAJO	2.15	1.55
NUMEROS DE OCTANOS (ISO-OCTANO=100)	MAS DE 100	92

TESIS

ALMACENAMIENTO DE LPG

FES-CUAUTITLAN

ALMA IRENE HERNANDEZ RAMIREZ

PROPIEDADES DEL LPG

Ref. (1)(33)

Tabla no. 1



1.2.2 PRODUCTOS Y COMPOSICIONES.

Como principales componentes del gas licuado se le consideran al propano y al butano comercial, así como las mezclas comerciales propano-butano de los cuales los compuestos adicionales son los propilenos y butilenos como se muestra en la *figura no. 4*.

En la *tabla no. 2* se presentan las composiciones típicas en fracciones mol de los principales componentes y mezclas de LPG: (16)(14)(4)

1.3 TECNICAS DE TRANSPORTE Y DISTRIBUCION DEL LPG.

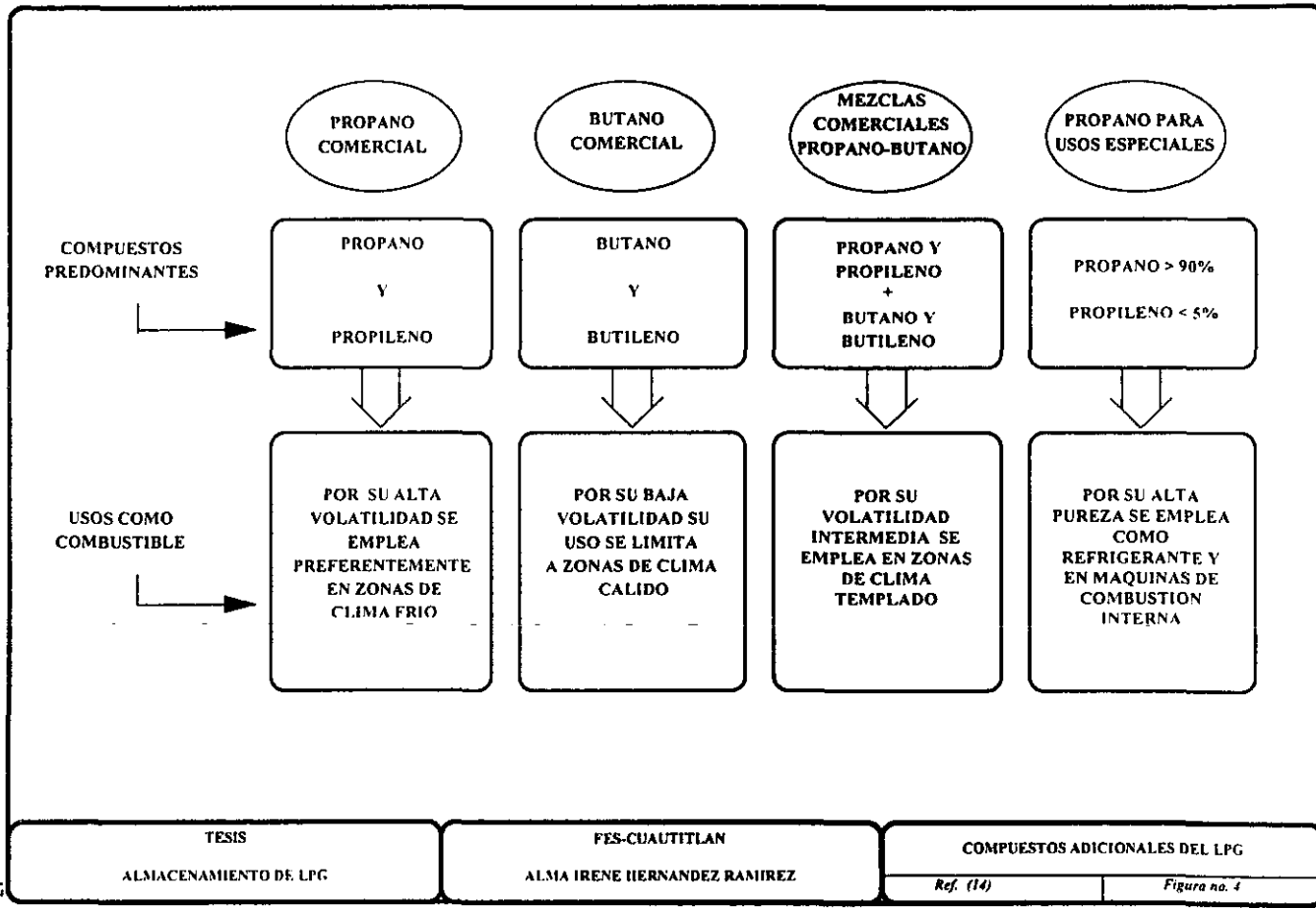
En nuestro país el proceso productivo de los hidrocarburos; exploración, perforación, explotación, compresión, refinación, petroquímica, transporte, distribución y comercialización, ha sido tradicionalmente una área de exclusividad del Estado (Gobierno) Mexicano, sin embargo ésta en vías de producirse apertura en algunas de estas áreas, y/o se han concesionado aspectos como la comercialización de aceites y combustibles como gasolina, diesel, kerosina, LPG y LNG.

El almacenamiento, transporte y distribución del LPG entre los diferentes centros productores/consumidores sigue siendo una actividad de exclusividad de Petróleos Mexicanos.

El objetivo del transporte del LPG es el de enviar grandes volúmenes del producto a las instalaciones de los consumidores o estaciones de almacenamiento desde la cuál se hará la distribución final de acuerdo a su zona.

Actualmente para el transporte y distribución del LPG, se utilizan los siguientes sistemas:

- Gasoducto.
- Remolques.
- Carrostanque.





- Buquestanque.
- Autostanque.
- Cilindros portátiles.
- Red de distribución.

Tabla no. 2

COMPONENTE	COMPOSICIONES APROXIMADAS EN % MOL					
	PROPANO		BUTANO		MEZCLA	
	COMERCIAL		COMERCIAL		PROPANO / BUTANO	
	70 / 30 %					
	LIQ. SAT.	VAP. SAT.	LIQ. SAT.	VAP. SAT.	LIQ. SAT.	VAP. SAT.
ETANO	1.088	3.279	2.508	17.102	0.000	0.000
PROPANO	91.355	89.869	2.303	4.678	72.764	89.532
PROPILENO	5.377	6.152	4.961	11.828	0.000	0.000
N-BUTANO	2.180	0.700	35.295	21.374	27.236	10.468
I-BUTANO	0.000	0.000	53.183	44.688	0.000	0.000
N-PENTANO	0.000	0.000	1.750	0.330	0.000	0.000
	T=68-100°F (20-37°C)		T= 68-112°F (22-40°C)		T= 68-90°F (20-32°C)	
	P=110-179 PSIG		P=39-85 PSIG		P=80-114 PSIG	
VISCOSIDAD A 20°C (CP)	0.1102		0.1436		0.1189	

Características de los sistemas de transporte y distribución:



Gasoducto.

Este sistema es el más usual para el transporte de volúmenes considerables de gas licuado entre centros productores y áreas de gran consumo o distribución. El sistema cuenta con estaciones de rebombeo distribuidas a lo largo de la tubería para que el gas licuado llegue con la presión necesaria a su destino. (18)

Remolques.

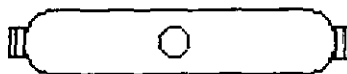
El remolque es un recipiente cilíndrico horizontal, montado en una estructura con llantas y dispositivos para ser remolcado por un tractor tipo trailer. Pueden ser de capacidades entre 40 o 45 m³. Por lo común se llenan a un 70-80% de su capacidad como máximo.



Transport.

Carrostanque.

El carrostanque es un recipiente cilíndrico horizontal montado en una estructura de ruedas de ferrocarril, para ser remolcado por una locomotora, con capacidades similares a los remolques y hasta 110 m³, se llenan al mismo nivel de 70-80% de su capacidad.



Railcar.

Buquestanque.

La tendencia para el transporte marítimo del gas licuado, es manejarlo en forma refrigerada, que ofrece mayor seguridad. El mayor número de buquestanque para el transporte de LPG tiene capacidades menores de 10,000 m³, le siguen buquestanque con capacidades entre 10,000 y 70,000 m³, y en menor número están los de capacidades mayores a 70,000 m³. Los buquestanque reciben el gas licuado de una terminal marítima y hacen el traslado de una a otra terminal, ya sea nacional o extranjera.



Para el traslado del LPG, el buquetanque cuenta con un sistema de recuperación de vapores, que consiste en un sistema de refrigeración en el que se utiliza el mismo gas licuado como medio refrigerante (o mediante un refrigerante externo).

A fin de evitar la estratificación debido a las bajas temperaturas de almacenamiento (-44 para propano y -6 para butano), se cuenta con una bomba para recircular parte del fluido, en forma de espreado por la parte superior de los contenedores. Los que normalmente se utilizan son contenedores de doble pared y de materiales especiales.

Para evitar que durante esta operación o durante el trayecto se colapsen los recipientes, se recomienda la instalación de líneas de presurización como gas inerte, o en su defecto válvulas rompedoras de vacío.

Autostanque.

El transporte por autostanque se efectúa desde las instalaciones del concesionario hasta los tanques estacionarios del consumidor final (doméstico e industrial). El sistema consiste en un recipiente cilíndrico horizontal montado en una estructura encima de un camión. Las capacidades nominales son de 11.2, 12.5 y 17 m³, normalmente se llena de LPG a un 70-80% de su capacidad total como máximo.



Bobtail.

Cilindros portátiles.

Este sistema es de los más comunes que usa el concesionario para suministrar el gas licuado, debido a que es lo más económico para instalaciones domésticas. Las capacidades usuales de estos cilindros son de 20 y 30 kg; también los hay de 10 y 50 kg.

Red de distribución.

Consiste en ductos, gasoductos, ramales, válvulas seccionadoras, paquetes de regulación de presión y puntos de medición a los centros consumidores y rutas intermedias.



1.4 TIPOS DE ALMACENAMIENTO DE LPG.

Debido a la vasta extensión territorial de nuestro país y al amplio desarrollo de los medios de transporte, los cuales son indispensables para el desarrollo económico, social y cultural de la nación, existe en forma cada vez más apremiante, la necesidad de movilizarse grandes distancias con rapidez, seguridad y comodidad. Dentro de este contexto los vehículos automotores conforman los medios básicos de transporte y requieren de grandes cantidades de combustibles y lubricantes, por lo que es necesario el almacenamiento y distribución de cada vez mayores cantidades de gases licuables a nivel nacional.

Para la elección de cualquier tipo de almacenamiento de LPG primeramente se identifican los diversos tipos, más eficientes, más económicos y de segura operación, evaluando las condiciones del sitio seleccionado para almacenamiento, considerando como puntos principales la facilitación del abastecimiento nacional y los costos de distribución del LPG. En cuanto a términos ambientales que trate de evitar daños ecológicos y sociales.

Para almacenar el gas licuado, se requieren condiciones en las cuales se mantenga en estado líquido, de éste modo se reduce los costos de almacenamiento debido a que baja el volumen.

Para lograr tales condiciones, se tienen dos opciones:

1) Almacenamiento superficial:

- ❖ Almacenar gas licuado a temperatura ambiente y presiones de 5 a 12.6 kg/cm² (manométrica), dependiendo de si la mezcla es butano o propano comercial a este tipo se le conoce como almacenamiento en recipientes a presión, y es útil y económicamente viable para capacidades bajas.
- ❖ Almacenar el gas licuado a temperaturas bajas (\pm a -42 °C dependiendo de si se trata de butano o propano comercial) y a presiones atmosféricas, a este tipo se le denomina como almacenamiento en recipientes refrigerados, y tiene aplicación para capacidades relativamente altas de almacenamiento



Sin embargo, para necesidades de muy altos volúmenes de almacenamiento, como aquellas encontradas en el abastecimiento de gas licuado a las grandes ciudades, existe una segunda opción:

2) Almacenamiento subterráneo:

- ❖ Almacenamiento en cavidades salinas.

- ❖ Almacenamiento en cavidades rocosas.

Ambos almacenamientos son viables para grandes capacidades y necesitan de diferentes tipos de subsuelos, por ejemplo los domos salinos requieren que en el subsuelo haya una capa o estrato salino, mientras que en las cavidades rocosas se precisa que existan en el subsuelo estratos rocosos de determinada clase. Por lo tanto, la decisión de uno u otro tipo de almacenamiento subterráneo va a depender del sitio y su correspondiente subsuelo, donde se piense instalar el almacenamiento.

Para los tipos de almacenamiento se toman muy en cuenta las condiciones de operación para el diseño del equipo e infraestructura tales como presión, temperatura, flujo, capacidad, nivel normal de líquido, sistemas auxiliares, condiciones de viento y sismo y peso del líquido.



CAPITULO DOS

ALMACENAMIENTO SUPERFICIAL EN RECIPIENTES A PRESION.

2.1 GENERALIDADES.

Los recipientes de almacenamiento están destinados al almacenaje de LPG y reciben el nombre de tanques estacionarios por considerarse en una posición permanente. Los tanques estacionarios se dividen en cuatro grupos, el primero corresponde a los tanques para plantas de almacenamiento. El segundo es aquel llamado de aprovechamiento, comprende los tanques para instalaciones de tipo doméstico e industrial. El tercer grupo son aquellos tanques que se encuentra montados permanentemente en los vehiculos y reciben la denominación del vehículo en que se encuentran (pipas). Y finalmente el cuarto grupo es el de tanques que se utilizan para carburación. El grupo de interés en este capítulo es el primero.

Estos tanques deberán colocarse fuera de las zonas urbanas y a distancias establecidas, según código, dentro de una zona protegida con pavimento impermeable, los tanques no requieren de aislamiento y es posible alimentar directamente a carrostanque, remolques y autostanque.

En los almacenamientos de LPG en recipientes a presión, la presión de operación es más grande que la atmosférica y la temperatura se considera ambiental. A estas condiciones la mezcla de LPG se mantiene en su fase líquida, cuando exista algún descontrol como un aumento de temperatura que provoque un represionamiento del recipiente, éste se protege mediante un control de presión en la parte superior liberando vapores, en este tipo de almacenamiento es necesario aclarar que es conveniente, pero no siempre la inclusión de sistemas auxiliares de recuperación de vapores, cuando se propone su instalación, es regularmente pequeño, en cuyo caso los vapores pueden ser canalizados a un sistema de desfogue.

La tecnología de fabricación de los almacenamientos superficiales en recipientes a presión puede ser nacional.



Las presiones de operación del almacenamiento a presión dependen del tipo de gas licuado almacenado que se maneje:

	Presión (kg/cm ²) Manométricas	Temperatura
Propano comercial _____	12.6 _____	Ambiente
Butano comercial _____	5.0 _____	Ambiente

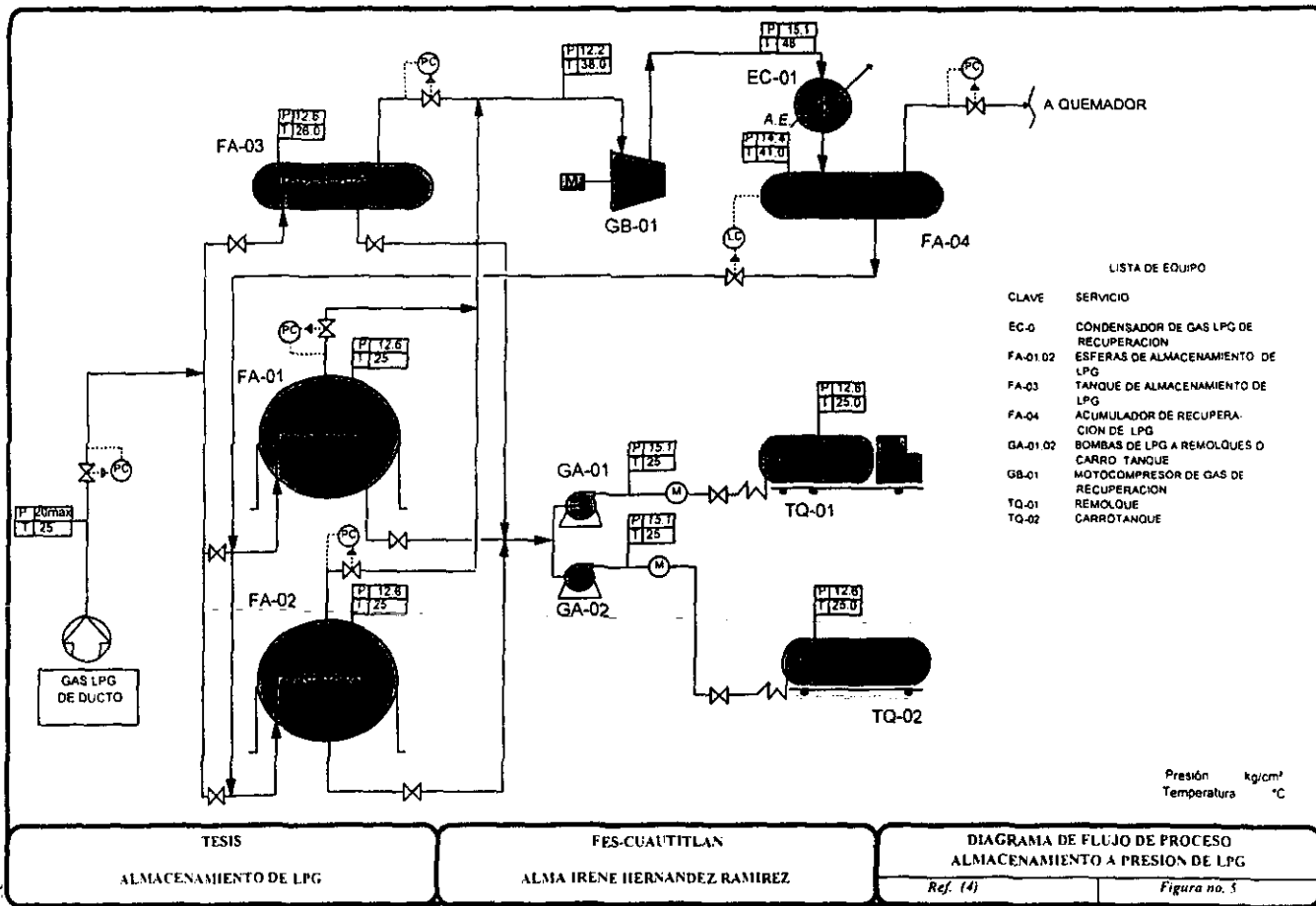
2.2 DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCESO.

En la *figura no. 5* se muestra el diagrama de flujo de proceso típico para el almacenamiento superficial de LPG en recipientes a presión.

2.3 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO.

La corriente de alimentación se recibe en recipientes cilíndricos horizontales (salchichas) y/o esferas, que operan a una presión de 12.6 kg/cm² manométricas y que son llenados por medio de la fase líquida, se emplean recipientes cilíndricos horizontales y esferas.

Los recipientes cuentan con alarmas e interruptores por alto nivel, a fin de tomar las acciones pertinentes para el llenado de un segundo recipiente o para interrumpir el flujo hacia el contenedor, mediante el cierre de la válvula de llenado.





Cuando el gas licuado se almacena durante largos periodos, debido a factores ambientales, el fluido en los contenedores alcanza niveles de temperatura cercanas a su temperatura de burbuja, por lo que se generan cantidades apreciables de vapor. Se cuenta con un sistema de compresión GB-01, que comprime el vapor generado hasta una presión de 15.1 kg/cm² y lo condensa en el EC-01 a 41° C para que el líquido arrastrado sea regresado a los recipientes esféricos. Este sistema opera automáticamente cuando se detecta un incremento de la presión en el espacio de vapor de los recipientes y tiene un acumulador FA-04, que cuenta con un control de presión que envía a desfogue el exceso de vapores, de acuerdo a código.

Para transferir el gas licuado de los recipientes a los remolques y/o carrotanques, se cuenta con las bombas GA-01 y GA-02, que reciben el fluido y lo descargan de la misma forma, a una presión de 15.1 kg/cm², para que llegue a las llenaderas a una presión de 12.6 kg/cm² y a esta presión se carguen para su transporte.

Cada llenadera es de tipo garza y cuenta con un sistema de medición de flujo volumétrico con corrección por densidad. Se recomienda que el llenado de los recipientes para transporte se haga en la fase vapor en forma de espreado.

2.4 LISTA DE EQUIPO.

Generalmente un almacenamiento a presión lo integran básicamente:

- Tanques y/o esferas de almacenamiento (contenedores).
- Instrumentos y accesorios.
- Tuberías de conducción.
- Equipos de trasiego.
- Plataformas de llenado.
- Condensador.

Ver características en la *tabla no. 3*.



Tabla no 3

EQUIPO	CLAVE	POSICION	MATERIAL DE CONSTRUCCION	PRESION (kg/cm ²)		TEMPERATURA °C	
				OPERACION	DISEÑO	OPERACION	DISEÑO
-ESFERAS DE ALMACENAMIENTO	FA - 01	—	ACERO AL CARBON	12.6	17.6	25	50
	FA - 02						
-TANQUE DE ALMACENAMIENTO	FA - 03	HORIZONTAL	ACERO AL CARBON	12.6	17.6	26	50
-ACUMULADOR DE RECUPERACION DE LPG	FA - 04	HORIZONTAL	ACERO AL CARBON	14.4	17.6	41	56
-CONDENSADOR H. DE T.	EC - 01	HORIZONTAL	ACERO AL CARBON	15.1	17.2	48	62
-BOMBAS DE LPG CENTRIFUGAS	GA - 01	HORIZONTAL	ACERO AL CARBON	P _{SUC} 12.6		Ambiente	
	GA - 02			P _{DESC} 15.1		Ambiente	
-COMPRESOR DE VAPORES DE RECUPERACIÓN	GB - 01	HORIZONTAL	ACERO AL CARBON	P _{SUC} 12.6		T _{SUC} 25	
				P _{DESC} 15.1		T _{DESC} 47	
- CARROTANQUE	TQ-01	HORIZONTAL	ACERO AL CARBON	12.6	17.6	25	33.3
- REMOLQUE	TQ-02	HORIZONTAL	ACERO AL CARBON	12.6	17.6	25	33.3
-TUBERIA RIGIDA			ACERO AL CARBON				

2.5 REQUERIMIENTOS MINIMOS DE EQUIPO.

El objetivo de estos requerimientos mínimos de equipo es el de presentar los puntos de mayor relevancia en la especificación de los equipos involucrados con este tipo de almacenamiento. Básicamente se debe tener siempre la precaución en todos los equipos que procesan gases licuables del petróleo, de no permitir la mezcla de estos con el aire en proporciones que produzcan mezclas explosivas o inflamables, ya que en cualquier momento pueden encontrar una fuente de ignición y originar una explosión. En la *tabla no. 4* se indican los porcentajes de flamabilidad o explosividad de algunos componentes del LPG.



Tabla no. 4

	METANO	PROPANO	BUTANO	ACETILENO	HIDROGENO
Limite máximo de inflamabilidad % de gas	15.0	9.5	8.4	80	74
Limite mínimo de inflamabilidad % de gas	4.8	2.4	1.9	2	3

Los contenedores o tanques utilizados en estos almacenamientos son: tanques y esferas.

Tanques (Recipientes Cilíndricos Horizontales).

Se denominan comúnmente "salchichas" y son recipientes cilíndricos con cabezas elípticas ó hemisféricas, diseñadas para soportar altas presiones. Se utilizan para el almacenamiento de LPG a presión, con capacidades menores de 90,000 galones. El LPG se encuentra a presiones de 5 a 12 kg/cm² y a temperatura ambiente. La capacidad de estos recipientes deberá ajustarse a valores comerciales para evitar el mayor costo de diseños especiales, en la siguiente *tabla no. 5* se muestra la capacidad que usualmente se utiliza en tanques, así como las dimensiones:

a) Temperatura.

Estos recipientes operan a una temperatura promedio máximo de 38 °C, la temperatura de diseño se determina aumentando a la temperatura máxima de operación 15°C, por lo que en este caso la temperatura de diseño es de 53°C.

b) Materiales.

El LPG es un fluido no corrosivo y se maneja prácticamente a temperaturas bajas (menor de 100°C) por lo que el material recomendado para fabricar salchichas es: Acero al Carbón SA-515-70.



Tabla no. 5

DATOS DE TANQUES DE LPG APROXIMADOS			
CAPACIDAD (GALONES)	DIAMETRO (PULGADAS)	LONGITUD (PIES)	PESO (LIBRAS)
1,000	41	16	2,200
2,000	46	24	4,110
3,900	84	17	6,665
6,565	84	26	12,250
9,200	84	36	17,300
12,000	84	45	22,400
18,000	108	41	30,400
30,000	108	66	51,500
30,000	131	69	51,500
45,000	131	69	76,200
60,000	131	90	102,000
90,000	131	134	153,400

c) Presión.

La presión de operación es equivalente a la presión de vapor del propano o butano comercial, a la máxima temperatura ambiente de 38°C, como lo muestra la tabla no 6.

GAS	TEMPERATURA MAXIMA	PRESION DE OPERACIÓN
	°C (°F)	Man kg/cm ² (lb/pul ²)
PROPANO COMERCIAL	38 (100)	12.6 (179)
BUTANO COMERCIAL	38 (100)	5.0 (71)

Tabla no. 6:



En cuanto a la presión de diseño, para el recipiente se obtiene de la tabla del NFPA No. 58 "Standard for the Storage and Handling of Liquefied Petroleum Gases" pag 58-13, que se reproduce a continuación en la tabla no. 7:

PRESION DE VAPOR DEL LPG 100°F, EN lb/pul ² .	PRESION DE DISEÑO MINIMA EN lb/pul ² .
80	100
100	125
125	156
150	187
175	219
215	250

Tabla no. 7

d) Espesor de la placa del cilindro.

Dicho espesor se determina de acuerdo al código ASME Sección VIII, Div. 1 y el cálculo se hace en base a dimensiones interiores o exteriores del cilindro.

e) Tipo de cabezas y espesor.

Los tanques horizontales utilizan cabezas del tipo hemisférico y en ocasiones elípticas; el cálculo del espesor requerido se determina de acuerdo con el Código ASME Sección VIII, Div. 1 y en base a las dimensiones interiores o exteriores.

f) Nivel máximo de llenado.

Existen formas de calcular el volumen máximo de llenado que puede ser almacenado en un recipiente para LPG. Uno de estos métodos es el de obtener directamente del NFPA No. 58 con la gravedad específica del LPG a 60°F; si se opera a otras temperaturas es necesario dividir el valor obtenido a 60°F entre el factor de corrección por temperatura de la tabla, F-1 del apéndice F y tabla E-2 del apéndice E, (Ver anexos)



Esferas

Recipientes en forma esférica, contruidos para soportar altas presiones. En estos recipientes esféricos se almacenan grandes cantidades de gas a presión y a una temperatura ambiente. Dichas esferas tienen capacidades que oscilan entre los 1,300 hasta los 125,000 barriles de gas licuado. Sin embargo, sus capacidades más usuales están entre los 5,000 y los 40,000 barriles de LPG.

La determinación de la temperatura, materiales, presión y espesor de la placa son similares a los recipientes cilíndricos horizontales, conocida la capacidad máxima de llenado y el volumen real comercial de la esfera, es posible determinar el volumen ocupado por el líquido en la esfera.

Instrumentos y accesorios.

a) Válvulas de control y seguridad.

Las válvulas tipo globo son las más utilizadas, estas están constituidas por el cuerpo que guía el fluido y sostiene el asiento, la selección de la válvula de control dependen del tamaño, de su sistema de control (on-off) y de su material. Las válvulas de seguridad serán tantas como sean necesarias para satisfacer la capacidad de descarga de gas, propia para el área de recipientes y calibradas a la presión de diseño del mismo

b) Indicadores de nivel de líquido

La selección de un indicador de nivel de líquido depende del tipo de tanque y su aplicación, del tipo de instalación, de las condiciones de servicio y de su lectura local o remota y exactitud, estos pueden ser del tipo rotatorio cuyo orificio restrictivo no sea superior en su diámetro o del tipo de flotador magnético.

c) Instrumentos de presión.

El rango es determinado después de considerar el valor de la lectura y exactitud requerida, es importante verificar la presión máxima. Se debe de considerar que los transmisores de presión



no serán dañados por una alta sobrepresión, pero si se pueden descalibrar. Regularmente son del tipo del tubo de Bourdón para LPG.

d) Instrumentos de temperatura.

La categoría será determinada después de verificar la temperatura de operación, deben de instalarse dentro de un tubo ciego (termopozo) para evitar que esté en contacto con el LPG.

e) Placas de orificio.

La placa de orificio es el dispositivo medidor del flujo más común en las instalaciones petroleras y para la medición de gas, se clasifican entre los que provocan una caída de presión, tiene importantes ventajas, bajo costo a tolerancias de presión muy pequeñas, facilidad de instalación, prácticamente no requieren de mantenimiento.

Todo tanque de almacenamiento está previsto de tres boquillas cuando menos, para conectar las líneas de tubería correspondientes a: Línea de entrada de líquido, línea de salida de vapores, línea de salida de líquido. Cada una de estas entradas está provista de una válvula de exceso de vapor.

Finalmente a las válvulas de relevo de presión se deberá acoplar firmemente un tubo de descarga vertical, de diámetro no menor al roscado de la válvula que lo recibe y de una longitud no menor a dos metros que servirá para permitir su descarga al medio ambiente, además los tanques deberán estar pintados con pintura anticorrosiva.

Tuberías de conducción.

En una planta las tuberías de conducción significan el medio por el cual se comunican los demás integrantes para llevar a cabo el trasiego de gas como son: de los tanques almacenadores a los remolques o carrostanque, a la bomba de llenado, al múltiple de llenado.

Las tuberías utilizadas para el trasiego pueden ser de acero al carbón, sus conexiones para 140 kg/cm² o más. También puede usarse tubería de acero al carbón sin costura, cuando las uniones sean soldadas en vez de roscadas. El diámetro de esta será de acuerdo al volumen de



gas de trasiego. El empaque de las tuberías roscadas deberá hacerse con litargidio y glicerina, o algún otro producto al cual no le afecte el LPG, garantizando su hermeticidad. En las bridas se utilizan empaques con las mismas características.

Para cuando se requiere un tendido de tubería subterránea, la profundidad mínima deberá ser de 0.6 m bajo el nivel de piso terminado y deberá contar con recubrimiento anticorrosivo y protección catódica, en caso de tubería superficial, ésta se instala sobre soportería de concreto.

Cuando se efectúa la conducción por medio de mangueras, éstas deberán ser resistentes a la flama y a la acción del LPG, y su presión de ruptura de 140 Kg/cm² o más.

Equipos de trasiego.

El trasiego de LPG entre dos recipientes se lleva a cabo por:

- a) Impulsión con bomba
- b) Presiones diferenciales con compresor

En el primer caso, el gas es movido en forma idéntica al agua por bombeo. Una bomba es diseñada para transformar energía mecánica en energía hidráulica que un fluido adquiere en forma de presión, normalmente se utilizan para este tipo de proceso bombas centrifugas, de tal manera que ésta sea capaz de establecer la velocidad de rotación y las dimensiones principales de una bomba óptimamente diseñada, para su diseño se debe saber con exactitud la eficiencia que se requiere o se utiliza.

En el segundo caso se utiliza un compresor de vapor de gas para inyectar presión y empuje del líquido hacia el tanque a llenar. La compresión se lleva a cabo regularmente a una o dos etapas; El compresor centrifugo es una maquina que tiene como función principal la de transformar energía mecánica en energía cinética transmitida por un impulsor al fluido de trabajo. Los compresores reciprocantes cubren un amplia rango de capacidad, generalmente son utilizados para altas presiones y bajos flujos volumétricos. Un criterio usual para la selección del compresor es el de lograr la mayor carga estática o aumentos de presión que sean posibles.



Este equipo deberá instalarse en el lugar adecuado y a las distancias mínimas que se establecen por normas y debiendo quedar protegido.

Las bombas y los compresores deben estar protegidos contra la acción de la intemperie mediante un cobertizo y que permita trabajar libremente en su mantenimiento.

Plataforma de llenado.

La plataforma o muelle de llenado de recipientes portátiles deberá tener amplia ventilación natural, además de ser sólido y su piso de materiales. La altura del piso del muelle sobre el nivel general del piso de la planta es la adecuada para facilitar las operaciones de carga y descarga de los recipientes. Sus bordes se protegen con material que impida la producción de chispas por impacto al acercamiento de los vehículos.

En el muelle se encuentran las llenadoras y el múltiple de llenado, éste deberá construirse con tuberías, conexiones, válvulas, mangueras y manómetros de alta presión, así como instalarse en forma segura y rígida contando con conexión a tierra así como los sistemas de vaciado, limpieza y pintura de los recipientes portátiles. Este equipo deberá contar con un diseño tal que sean mínimos los riesgos.

Condensador.

El rango de velocidades manejadas en el condensador es de 1-30 pies/seg. Estas velocidades son las recomendadas para evitar el desarrollo de depósitos, incrustaciones y erosión en las partes internas, alargando de esta manera la vida útil del equipo. La selección del equipo de transferencia de calor está dada por las siguientes recomendaciones: si no se permite la mezcla con el fluido frío; y si el medio de enfriamiento (agua) no escasea, comúnmente se utilizarán condensadores de tubos y coraza.

Debido a que el medio de enfriamiento (agua) provoca que ensucie por dentro el equipo, se recomienda manejarlo por el lado de los tubos y el LPG por el lado de la envolvente.



CAPITULO TRES

ALMACENAMIENTO SUPERFICIAL EN RECIPIENTES REFRIGERADOS.

3.1 GENERALIDADES.

El almacenamiento de LPG en forma líquida permite guardar grandes volúmenes del producto en un menor número de equipos del que se requeriría si éste se guardara en su estado natural (forma gaseosa).

La esencia de los procesos de licuefacción consiste en comprimir y enfriar el gas hasta que entre en la región donde coexisten las dos fases; líquido y gas.

Para este tipo de almacenamiento, se prefieren las condiciones bajo las cuales el LPG permanece en su fase líquida a las que se tiene que operar el gas, la presión en los almacenamientos refrigerados es realmente baja, al igual que la temperatura (-40°C), como sistema auxiliar se utiliza la refrigeración del gas, recuperando o extrayendo los vapores del LPG para su proceso de envío.

El enfriamiento puede obtenerse por los siguientes métodos:

1. Enfriamiento a presión constante, como es el caso de utilizar intercambiadores de calor.
2. Enfriamiento por medio de una máquina de expansión.
3. Enfriamiento por medio de una válvula de expansión.

El primer método requiere del desprendimiento de calor para obtener una temperatura más baja que aquella a la que el gas va a ser enfriado. Si la temperatura del gas se va a reducir por abajo de la temperatura ambiental, se requiere de un sistema de refrigeración externo. Por consiguiente, este método se emplea normalmente como un medio de preenfriamiento del gas.

Para los tres métodos se tiene el siguiente diagrama (temperatura - entropía) en el cual se ilustra su proceso fisicoquímico:



(1) Enfriamiento a P_{cte} \rightarrow baja temperatura

(2) Enfriamiento por maquina de expansión
 \rightarrow alta presión, intercambio de calor

(3) Expansión ΔH_{cte} \rightarrow válvula de expansión
 P_{cte}

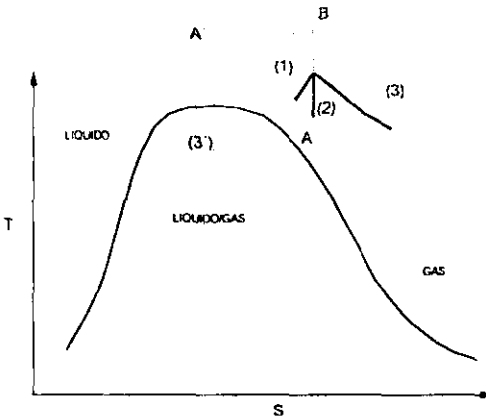


Figura no. 6

La trayectoria a presión constante (1) se aproxima a la región de dos fases (y a la licuefacción) mediante una disminución de la temperatura. La expansión isentálpica no llevará a la licuefacción, a menos que el estado inicial se encuentre a una presión lo suficientemente baja para que la línea a entalpía constante corte la línea de saturación y penetre en la región de dos fases. Si el estado inicial es A, no podrá obtenerse la licuefacción por el proceso (3); si el estado inicial es A', a la misma temperatura pero a una presión considerablemente mayor a aquella de A, entonces una expansión a entalpía constante a lo largo de (3') causará licuefacción.

El proceso de A a A' en la práctica se lleva a cabo con facilidad, comprimiendo el gas a la presión requerida (línea AB) y luego enfriando a presión constante (línea BA'). El proceso isoentrópico (2) no requiere de un estado inicial a presión alta para licuar el gas. La continuación del proceso (2) desde el estado inicial A, llevará finalmente a la licuefacción.

La tecnología de fabricación de este almacenamiento refrigerado puede ser nacional.



El almacenamiento refrigerado de LPG, consta primordialmente de un tanque tipo API, de un material adecuado para resistir bajas temperaturas y usualmente aislados. Los tanques son de pared sencilla o de doble pared, encontrándose que para LPG son más convenientes los de doble pared. Dichos tanques tienen cimientos de concreto, con un aislamiento que evita transmisión de calor y el congelamiento del suelo.

Adicionalmente, este almacenamiento cuenta con instalaciones para recuperar los vapores generados durante el llenado y vaciado de los tanques y aquellos que se forman por calentamiento debido al medio ambiente.

Las temperaturas y presiones a los que opera almacenamiento refrigerado:

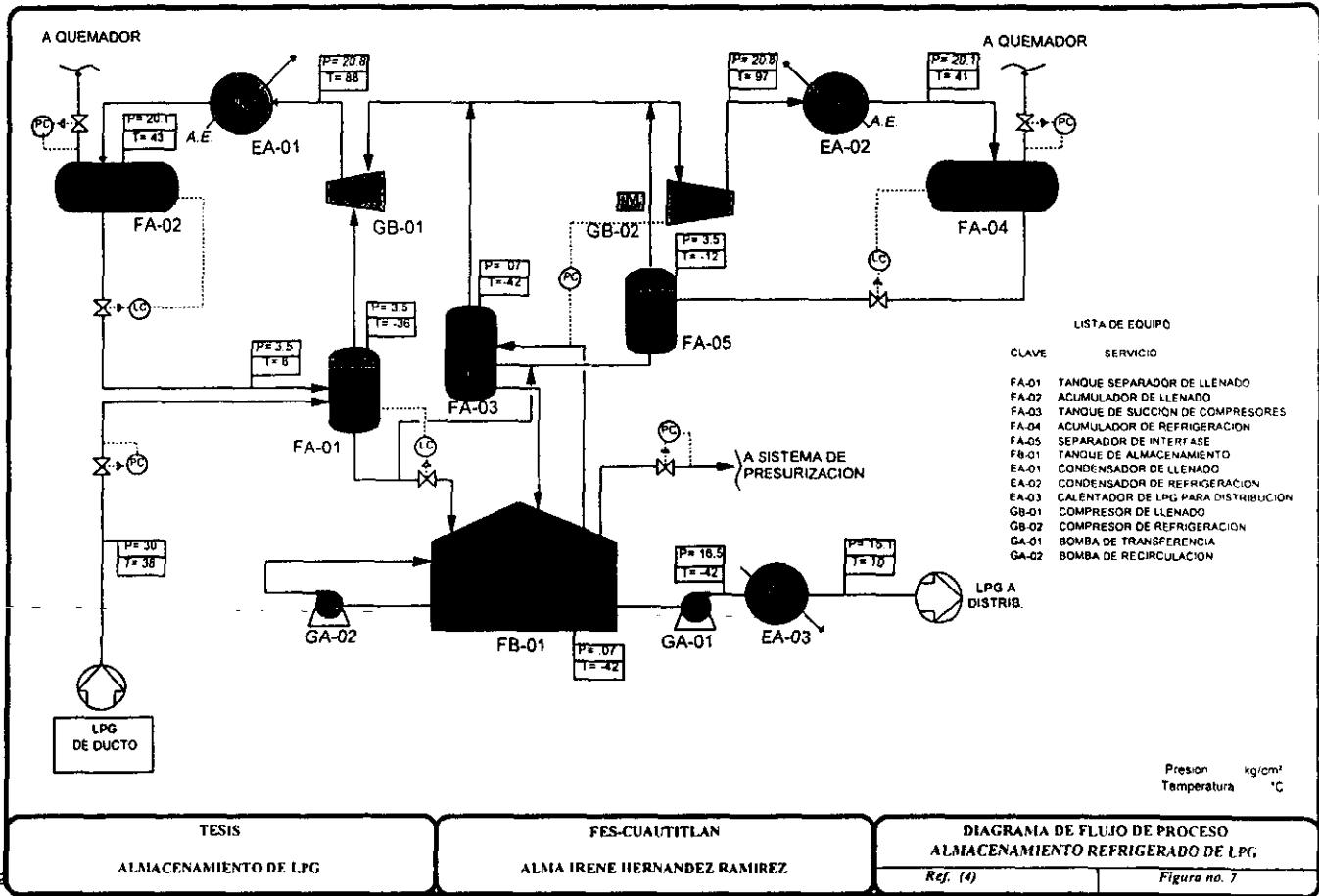
	Presión (kg/cm ²)	Temperatura (°C)
Butano comercial	Atmosférica	-6
Propano comercial	Atmosférica	-42

Además y debido a que el manejo de LPG se efectúa a baja presión su utilización es segura.

Por otro lado tiene la desventaja de requerir equipo de enfriamiento y de recuperación de vapores lo que hace la operación del sistema sea más complicada.

3.2 DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCESO.

La figura no. 7 muestra el diagrama de flujo de proceso típico para el almacenamiento superficial de LPG en recipientes refrigerados.





3.3 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO.

El almacenamiento se lleva a cabo en tanques refrigerados a presión atmosférica a una temperatura de -42°C .

El LPG líquido proveniente de límites de batería a 38°C y 30 kg/cm^2 manométricos se expande en el tanque de flasheo FA-01 hasta una presión de 3.5 kg/cm^2 manométricos y a una temperatura de -36°C . Parte del líquido que sale de este tanque se manda al tanque de almacenamiento FB-01 y la otra parte se desvía al serpentín del tanque de succión de compresores FA-03 para vaporizar el posible líquido arrastrado, para regresar este y enviarlo casi a presión atmosférica al tanque de almacenamiento FB-01, las condiciones de almacenamiento en éste tanque son de 0.07 kg/cm^2 manométricos y -42°C .

El vapor efluente del tanque de flasheo FA-01 se envía al compresor de llenado de LPG, GB-01.

Durante el almacenamiento de LPG se generan vapores debido a la absorción térmica del medio ambiente, expansión de la alimentación de la línea de retorno del serpentín y absorción de calor del tanque, para lo cual se cuenta con un sistema de refrigeración para recuperación de dichos vapores.

Los vapores generados durante el almacenamiento son enviados al tanque de succión de compresores FA-03, donde el líquido que se haya arrastrado se vaporiza mediante un serpentín colocado en el fondo del recipiente dirigiendo ese vapor a compresión.

La corriente que sale del compresor GB-01, se manda al condensador de llenado de LPG EA-01, y posteriormente al acumulador de llenado de propano FA-02 a 20.1 kg/cm^2 manométricos y 43°C , el vapor separado en este tanque se manda a quemador mediante un control de presión, y el líquido se alimenta al tanque de flasheo FA-01 a 3.5 kg/cm^2 manométricos y 6°C . En este tanque se mezcla con la corriente de alimentación



La corriente que sale del segundo compresor GB-02 se envía al condensador de refrigeración de LPG EA-02 a 20.8 kg/cm² manométricos y 97°C para bajar su temperatura a 41°C y enviar enseguida al acumulador de refrigeración FA-04, el vapor separado en este tanque se manda a quemador mediante un control de presión y el líquido se alimenta al tanque de flasheo de interfaces FA-05 a 3.5 kg/cm² manométricos, los líquidos de este tanque se envían al serpentín del tanque de succión de compresores FA-03. El vapor del tanque FA-05 a la misma presión de 3.5 kg/cm² manométricos entra al segundo compresor GB-02, donde se une con el vapor producido en el separador de interfaces FA-03 y la corriente total se comprime hasta 20.8 kg/cm² manométricos y 97°C.

Para mantener la temperatura baja en el tanque de almacenamiento FB-01, se utiliza como medio refrigerante el mismo LPG recirculándolo mediante la bomba GA-02, expandiéndolo y regresándolo al tanque de almacenamiento.

El LPG almacenado en el tanque de almacenamiento FB-01 a presión atmosférica y -42°C, es enviado al calentador de LPG, EA-03, mediante la bomba de transferencia GA-01, de tal manera que en límites de batería se tiene una presión de 15.1 kg/cm² manométricos y 10 °C para su distribución.

3.4 LISTA DE EQUIPO.

Generalmente el almacenamiento refrigerado lo integran básicamente

- Recipientes criogénicos.
- Tanques acumuladores.
- Instrumentos y accesorios.
- Equipo de trasiego.
- Tuberías de conducción.
- Condensadores.



Ver características en la *tabla no. 8*

EQUIPO	CLAVE	POSICION	PRESION (Kg/cm ²)	TEMPERATURA °C
-SEPARADOR DE INTERFASE	FA-05	VERTICAL	3.5	-12
-ACUMULADOR DE REFRIGERACION	FA-04	HORIZONTAL	20.1	41
-ACUMULADOR DE LLENADO	FA-02	HORIZONTAL	20.1	43
-TANQUE DE SUCCION DE COMPRESORES	FA-03	VERTICAL	0.07	-42
-CONDENSADOR DE LLENADO	EA-01	HORIZONTAL	20.0	T ₁ , 88, T ₂ , 43
-CONDENSADOR DE REFRIGERACION	EA-02	HORIZONTAL	20.0	T ₁ , 97, T ₂ , 41
-COMPRESOR DE LLENADO	GB-01	HORIZONTAL	P _{succ} 3.5 P _{desc} 20.0	36 88
COMPRESOR DE REFRIGERACION	GB-02	HORIZONTAL	P _{succ} 3.5 P _{desc} 20.0	-12 97
-TANQUE DE ALMACENAMIENTO	FB-01	VERTICAL	0.07	-42
-TANQUE TANQUE SEPARADOR DE LLENADO (DE FLASHEO)	FA-01	VERTICAL	3.5	-36
-CALENTADOR DE LPG PARA DISTRIBUCION	EA-03	HORIZONTAL	15.1	T ₁ , -42, T ₂ , 10

Tabla no. 8

3.5 REQUERIMIENTOS MINIMOS DE EQUIPO.

El objetivo de revisar los requerimientos mínimos de equipo es el de presentar los puntos de mayor relevancia en la especificación de los equipos involucrados en este tipo de almacenamiento. Básicamente se debe tener siempre la precaución de que en todos los equipos que procesan gases licuables del petróleo no se debe de permitir la mezcla de estos con el aire en proporciones que produzcan mezclas inflamables, ya que en cualquier momento pueden encontrar una fuente de ignición y originar una explosión. (Ver *tabla no. 4*)

Los contenedores o tanques utilizados en estos almacenamientos son



Recipientes Criogénicos.

Por ser del tipo API-620, sus dimensiones se fijan de acuerdo a una capacidad requerida y al estándar 650 del American Petroleum Institute. Estas dimensiones han sido fijadas de acuerdo a criterios económicos.

a) Temperatura.

La temperatura de operación o normal corresponde a la temperatura de burbuja del LPG y a la presión de 1 atmósfera. Esta temperatura debe ser la máxima permisible, para evitar la vaporización. La temperatura de diseño es la mínima que se puede esperar, dentro del tanque, como mínimo, ésta debe ser igual a la temperatura de operación.

Para el caso de recipientes de almacenamiento, es lógico suponer que éstos deberán alojar líquidos a muy baja temperatura, por lo que sus materiales deberán fijarse de acuerdo a este criterio. Los materiales que se recomiendan para este servicio es Acero al Carbón (SA-353, SA-553, SA-516, 55, 60, 65, 70).

b) Presión.

En estos tanques se corre el riesgo de que se presenten presiones inferiores a la atmosférica las cuales pueden ocasionar el colapso de los mismos; se recomienda la instalación de válvulas rompedoras de vacío y líneas de presurización, el espesor de la pared está en función del diámetro y la presión.

La capacidad de llenado se define como el porcentaje máximo del volumen del tanque que puede llenarse con líquido para hacer segura su operación, se expresa en % el volumen del tanque.

En lo que respecta a los demás equipos como lo son, el condensador, equipos de trasiego, tuberías de conducción e instrumentos y accesorios, se considera el mismo criterio que en el almacenamiento en recipientes a presión, descrito anteriormente.



CAPITULO CUATRO

ALMACENAMIENTO SUBTERRANEO EN CAVIDADES SALINAS

4.1 ANTECEDENTES.

La idea de utilizar cavidades generadas en formaciones salinas fue concebida por los alemanes durante la primera guerra mundial, como un medio para conservar los energéticos a salvo de sabotajes. Sin embargo, este tipo de almacenamiento alcanzó gran popularidad en Europa y Norteamérica, principalmente por las ventajas técnicas, económicas, de seguridad y protección al ambiente que presenta. Las primeras cavidades creadas en domos salinos fueron construidas en 1958 en Canadá con el propósito de almacenar hidrocarburos.

Para fines de 1985, el Gobierno Federal de los Estados Unidos, disponía de una reserva estratégica de mil millones de barriles de hidrocarburos almacenados en cavidades creadas en domos salinos, las cuales son grandes depósitos de sal, que por su volumen, forma y disposición con respecto a otras formaciones rocosas, reciben este nombre.

En México los primeros trabajos encaminados a obtener cavidades para almacenar hidrocarburos se desarrollaron durante 1959 y 1960, pero por diversos problemas, éstos quedaron diferidos. En 1961, en México se perforó un pozo en Tuzandépetl, Veracruz para almacenar LPG. El proyecto se suspendió porque las tuberías se taponaron con cristales de sal al suspender temporalmente las operaciones por falta de equipo. En 1963 PEMEX perforó otro pozo en Tuzandépetl, Veracruz con el propósito de investigar la calidad de sal y destinarlos como productores de salmuera para abastecer el complejo industrial

Sin embargo al iniciarse la explotación de hidrocarburos de los campos de la zona marina, surgió la necesidad de contar con mayor capacidad para el almacenamiento de los hidrocarburos, misma que se resolvió al ampliar la red de oleoductos y al crear centrales de almacenamiento y bombeo. Pero como la producción seguía aumentando principalmente en el área marina, y por tanto era necesario elevar la capacidad de almacenamiento, se utilizaron



buquestanque de gran tamaño. Aún con esto, la necesidad de incrementar la capacidad de almacenamiento siguió presentándose.

El almacenamiento subterráneo en cavidades creadas en domos salinos, resultó una idea muy atractiva para la industria petrolera, ya que además de ser mucho más económicas y seguras que los tanques superficiales, las enormes dimensiones de las cavidades permiten que se almacenen grandes volúmenes de hidrocarburo, aún cuando las malas condiciones climáticas dificultan la realización de embarques provocando suspensión de producción y hasta el cierre de los pozos.

4.2 GENERALIDADES.

El almacenamiento en cavidades salinas (Domos Salinos) se fundamenta en la formación de una cavidad en un domo salino, mediante la lixiviación con agua dulce del estrato salino. El almacenamiento se basa en las excelentes propiedades de la sal, que es una roca estanca, lo que permite almacenar a presión diversos líquidos o gases sin preocuparse por posibles fugas de producto. La sal es químicamente neutra con respecto al LPG. Además estructuralmente es lo suficientemente fuerte como para resistir las presiones a las cuales la caverna está sujeta, debido al almacenamiento de LPG (12.6 kg/cm²manométricos) y a la columna del líquido por encima del nivel de la caverna.

En la etapa de lixiviación se forma la caverna mediante la dilución de la sal con la inyección de agua dulce al estrato salino.

Para comprender más la metodología, se menciona a continuación una breve explicación de la formación de un domo salino:

Un domo salino es una masa de sales a más de 600 metros de profundidad en donde predomina el cloruro de sodio y su formación se debe a la intensa evaporación de los mares que existieron en las remotas eras geológicas.



Con el tiempo y debido a su baja densidad con respecto a los estratos depositados posteriormente los bloques de sal se van abriendo paso por flotación, que a su vez son ayudados por fenómenos tectónicos que refuerzan su movimiento.

Las características impermeables de estos bloques de sal permitieron suponer a los ingenieros que al minarlos se crearían enormes cavernas o depósitos que servirían como almacenadores de crudo y posteriormente de LPG.

La lixiviación consiste en la disolución parcial de la masa salina, mediante la inyección de agua dulce a una temperatura y presión determinadas, lo que permite que se disuelva la sal y se obtenga en la superficie salmuera de diversas concentraciones.

Este procedimiento se puede realizar de manera directa o inversa, es decir, mediante técnicas que se utilizan alternadamente a fin de darle la forma deseada a la cavidad. En la figura no. 8 se pueden observar las etapas de proceso de formación de una cavidad salina:



Figura no. 8



Es importante mencionar que para la formación de una cavidad es necesario tomar en cuenta aspectos como la perforación del pozo, la formación de la bolsa de insolubles, del cuerpo de la cavidad y del techo, así como las pruebas de hermeticidad y estanqueidad; de estas últimas dependerá el uso o no de las cavidades.

Por otra parte, es en la etapa de explotación en la cual las cavidades son operadas normalmente para recibir o expedir LPG mediante ciclos de llenado y vaciado de las mismas, que se efectúa por medio del desplazamiento de fluidos, es decir, se inyecta LPG para desalojar salmuera o viceversa, se inyecta salmuera para desalojar lpg. Debido a que la masa salina tiene propiedades viscoplásticas, las cavidades o depósitos siempre estarán llenos de LPG o salmuera saturada, con el fin de evitar que se cierren.

De acuerdo con sus características técnicas, estratégicas, operativas y económicas, las ventajas del almacenamiento de LPG en cavidades en domos salinos pueden resumirse en tres aspectos fundamentales; seguridad, ahorro y protección de la ecología del lugar.

Lo anterior significa que dado que el producto se encuentra profundamente enterrado en el subsuelo no puede ser alcanzado por fenómenos naturales o por actos de sabotaje, la ausencia de fugas y de oxígeno dentro de las cavidades las protege contra riesgos de explosión o incendio, y aún en el caso de que existiera un error humano, las válvulas, equipos y circuitos que las controlan, están protegidas por dispositivos que limitan las consecuencias de un accidente.

En lo que al ahorro se refiere, cabe decir que el costo por barril almacenado es más bajo que el convencional al utilizar tanques superficiales; dado que el área que ocupan las instalaciones de control de las cavidades es muy reducida, el costo por ocupación territorial es prácticamente nulo, y la capacidad de éstas puede ser ampliada a un costo mínimo.



Por otra parte, la flora y la fauna del lugar por lo regular casi no resienten algún impacto nocivo al no alterar su hábitat natural, no existen riesgos de contaminación ni fugas de LPG y tampoco se altera el porcentaje de humedad del medio ambiente.

El uso de cavidades en domos salinos es diverso, ya que en ellos se almacenan gas natural, crudo, aire comprimido, diferentes productos petroquímicos, residuos industriales e incluso se emplea como cementerio de desechos nucleares.

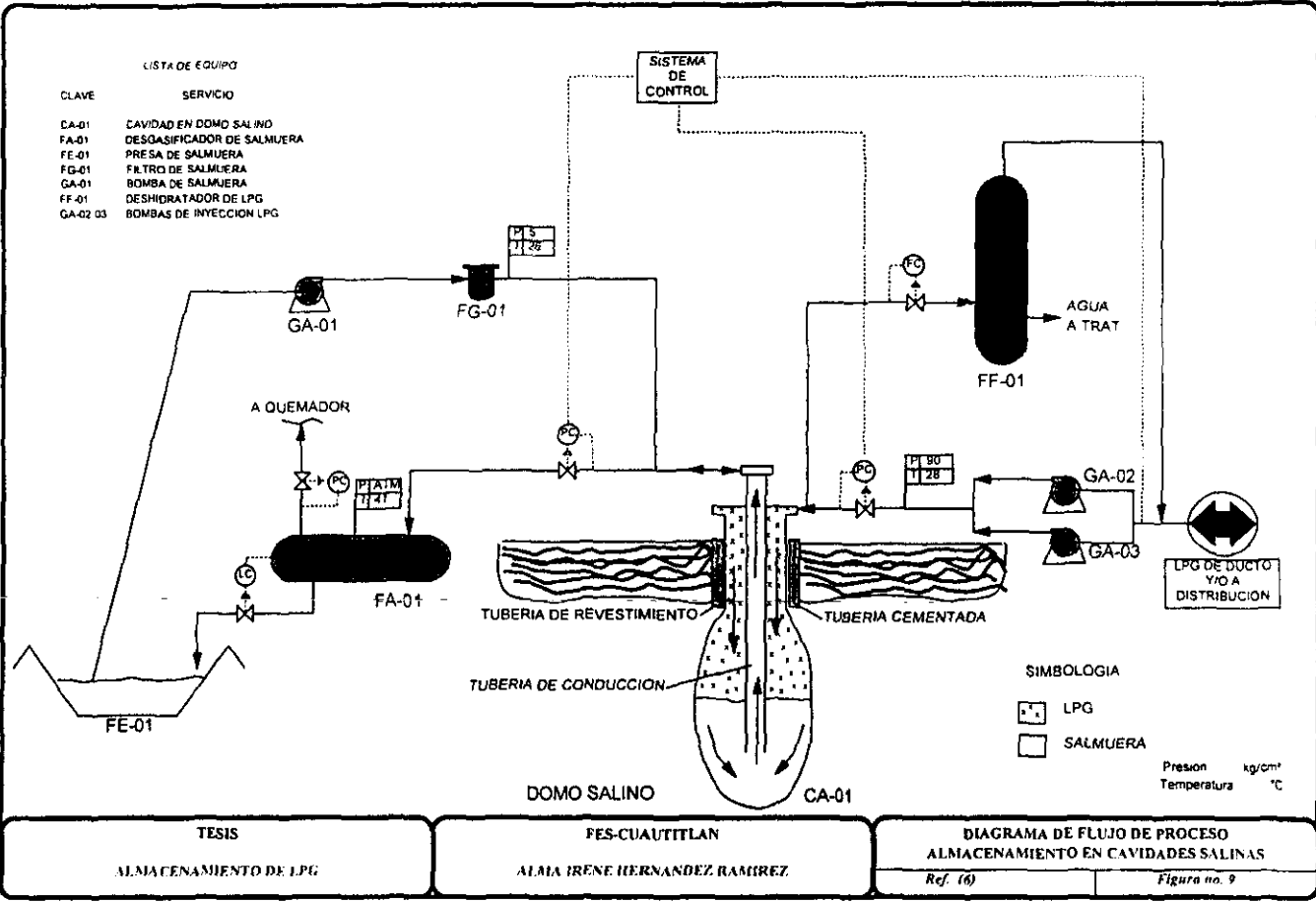
4.3 DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCESO.

La *figura no. 9* muestra el diagrama de flujo de proceso típico para el almacenamiento subterráneo de LPG en cavidades salinas.

4.4 DESCRIPCION DEL PROCESO.

Primeramente en un almacenamiento en domo salino, es necesario considerar la formación de la *cavidad en el domo para almacenar LPG*. Básicamente la formación de la cavidad se desarrollará inyectando agua dulce, obteniendo salmuera casi saturada disolviendo así el domo salino y quedando almacenada en la cavidad.

Luego se considera el almacenamiento (llenado de la cavidad) de LPG recibido por la línea proveniente de límites de batería y que para introducirlo a la cavidad será necesario proporcionar una presión de descarga suficiente para vencer la columna de salmuera almacenada y las pérdidas por fricción en la tubería. Para el llenado de la cavidad se requerirán de bombas de alimentación GA-02 y GA-03, utilizándose una válvula de control que absorberá el exceso de presión que resulte del sistema de bombeo. Antes de entrar a la cavidad se pasará por una válvula de control de flujo, teniendo un dispositivo registrador que servirá para llevar el control de los volúmenes de LPG almacenado.





A la salida de la cavidad la salmuera estará saturada de cloruro de sodio y se enviará a un desgasificador FA-01 para disminuir la presión hasta la presión atmosférica y una temperatura de 41°C, enviando los hidrocarburos gaseosos hacia la atmósfera, en un lugar donde se minimicen los riesgos de explosión, incendio o daños al personal.

La salmuera de baja presión y libre de gases será enviada a la presa de salmuera FE-01 para acondicionarla separando los materiales insolubles provenientes del domo salino y el aceite que pudiera haberse arrastrado.

Finalmente se considera el vaciado de LPG de la cavidad, que se realizará utilizando salmuera como fluido de desplazamiento, proveniente de la presa FE-01. La salmuera saturada será enviada mediante la bomba GA-01 a una presión de 5 kg/cm² y temperatura de 26°C por la tubería hacia la cavidad, antes pasará por el filtro de salmuera FD-01 para asegurar que ningún sólido pase a la tubería y cause depósitos u obstrucciones al sistema.

La salida del producto se efectuará por desplazamiento. A la salida de la cavidad el LPG se enviará a una torre deshidratadora FF-01 para garantizar la entrega del producto en límites de batería con un contenido de agua de acuerdo a código. Una vez pasando por el sistema de deshidratación se integrará a la línea de distribución.

4.5 PRINCIPIOS DE CONSTRUCCION DE UN DEPOSITO.

Este procedimiento basado en una patente alemana de los años 30, ha sido considerablemente desarrollado, principalmente en los Estados Unidos y Europa, a partir del fin de la segunda guerra mundial.

Se basa en algunas características de la roca "sal" que se adaptan perfectamente a los objetivos del almacenamiento: La sal es químicamente neutra al LPG; la sal es una roca estanca, Y si su geometría es adecuada, las cavidades creadas en la sal son estables.



Cabe recordar que este tipo de cavidad conviene para el almacenamiento de todos los hidrocarburos líquidos, licuados y gaseosos, así como para el aire comprimido, pero no se adapta para los productos a baja temperatura.

4.5.1 TECNICAS DE CREACION.

Si el lugar escogido posee una capa de sal gema relativamente espesa, la creación de una cavidad se desarrolla de la siguiente manera:

- Perforación de un pozo tipo petrolífero hasta llegar debajo del techo de la capa de sal.
- Cementación de una tubería (casing) de protección de los terrenos situados encima de la capa de sal, en particular los eventuales acuíferos, y del techo de la sal en un espesor variable según el caso, pero que puede ser de varias decenas de metros, continuación de la perforación en un diámetro más reducido hasta la profundidad escogida como fondo de la cavidad.
- Prueba de estanqueidad del pozo así creado. En realidad es la prueba de la calidad de la cementación de la tubería, a una presión superior a la presión de servicio de la cavidad, de modo que el remate del casing y su cemento no puedan constituir ulteriormente un eventual punto de escape del producto almacenado.

Una vez probado el pozo, se hacen bajar al fondo dos tuberías concéntricas y se inyecta agua dulce por el tubo central. Esta agua va a disolver las paredes del pozo excavado en la capa de sal y se cargará de sal paulatinamente, transformándose en una salmuera más o menos saturada en función del régimen de lixiviación adoptado. Para evitar que la salmuera suba por las paredes del pozo y el tubo externo, se inyecta un colchón protector, en general un hidrocarburo gasoleo, por lo tanto la única vía accesible para la salmuera es el espacio anular entre los dos tubos concéntricos.

Al salir del pozo la salmuera, se recoge y se evacua hacia un lugar de descarga definitivo (mar, capa porosa y permeable profunda) o bien hacia un lugar de reserva (presa, lago o estanque).



Un cierto volumen de salmuera saturada o próxima a la saturación debe ser conservado para utilizarlo en la fase de explotación.

Subiendo progresivamente las tuberías, se va formando y agrandando la cavidad, vertical y lateralmente. Los bancos insolubles (anhidrita, arcilla, dolomita) diseminados en la masa de sal se van liberando de la misma y cuando el tamaño de la cavidad es tal que quedan sueltos, se desmoronan y caen al fondo. Para evitar que su masa ocupe un volumen útil demasiado grande en la cavidad, se *preverá una bolsa para insolubles al comenzar la creación de la misma*, la cavidad creada dentro de límites geométricos compatibles con las características de la sal y que garanticen su estabilidad a largo plazo, se encuentra llena de una salmuera más o menos concentrada según el régimen adoptado para la lixiviación.

Estos límites habrán sido controlados una o varias veces durante la fase de lixiviación con un aparato de ultrasonido "sonar" o "cavermómetro"; se procede entonces a probar la cavidad, siempre bajo control de la autoridad competente, para verificar que a una presión superior a la presión de servicio, no se produzca ningún escape.

4.5.2 ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO DE OPERACION.

Se deben considerar dos fases:

- 1) Almacenamiento (llenado).
- 2) Desalmacenamiento (vaciado).

Sin olvidar que la plasticidad de la sal (salvo a muy escasa profundidad) no admite que la cavidad quede vacía; en todo momento la cavidad debe contener o salmuera o el producto almacenado. Como el LPG es más liviano que el agua, sobre todo si es salada, la introducción de los fluidos en la cavidad se hará de abajo hacia arriba, entre la salmuera y el producto líquido.



Llenado.

En la fase de explotación, el tubo central o tubería de conducción se desciende hasta el fondo, lo más cerca posible de la cima de la masa de insolubles. El hidrocarburo (LPG) empuja la salmuera fuera de la cavidad por el tubo central hasta que la interfase entre salmuera y producto esté un poco por encima del pie del tubo central.

La salmuera evacuada, en general concentrada, se conserva generalmente en una presa cercana al pozo para utilizarla en la fase de Vaciado.

Vaciado.

El desalmacenamiento se realiza por el proceso inverso. Se introduce la salmuera en la cavidad por el tubo central y el producto almacenado sale por el espacio anular, si no hay salmuera saturada disponible, el desalmacenamiento se efectúa con salmuera no saturada o con agua dulce. Esto sólo es posible si la dimensión máxima de la cavidad compatible con las características geomecánicas de la sal aún no ha sido alcanzada, puesto que la inyección de agua dulce provoca un agrandamiento de la cavidad por lixiviación.

Si ya se ha alcanzado la dimensión máxima de la cavidad, el desalmacenamiento sólo puede hacerse con salmuera saturada.

4.6 REQUERIMIENTOS MÍNIMOS DE INFRAESTRUCTURA.

El requisito para la construcción de un almacenamiento en la sal es la existencia de formaciones salinas estratificadas. Estas fueron formadas debido a la separación parcial de los océanos y sucesiva evaporación solar que causó la concentración y finalmente precipitación de la sal.

En el curso de los periodos geológicos, la sal fue cubierta por sedimentación normal que finalmente dio lugar a los grandes depósitos de la actualidad.



Las *cavidades salinas* son ampliamente utilizadas en nuestros tiempos, porque permiten almacenar diferentes tipos de productos dentro de un amplio rango de presiones y temperaturas, presentando gran impermeabilidad.

La localización de la estructura requiere de una exploración que se realiza por métodos geofísicos convencionales. Una vez que se ha identificado la formación, se continúa la *investigación*, utilizando métodos usuales de perforación y determinando propiedades físicas y químicas de muestras de sal.

Una vez que la etapa anterior se ha cumplido y el domo apropiado se ha seleccionado, se procede al desarrollo de la ingeniería para la construcción de la cavidad.

Procesos de construcción de cavidades en estructuras salinas:

En un proyecto de almacenamiento en cavidades salinas, se llevan a cabo tres etapas principales:

- 1) Estudios previos para determinar la factibilidad del almacenamiento
- 2) Creación de la cavidad.
- 3) Utilización de la cavidad para almacenamiento.

1) Durante la primera etapa, se perfora el pozo con la finalidad de definir la calidad de la sal y sus prioridades (para almacenamiento y comercialización), se recaban datos, se toman muestras y se hacen registros de lodos, se define la calidad de la cubierta de roca y la posición de la caverna. Al llegar a la cima de la sal, se perfora un intervalo considerable (100 metros) sin tomar muestras, ya que este intervalo constituirá el techo de la cavidad

Una vez que se ha perforado esta parte, se reanudará el muestreo hasta alcanzar el intervalo calculado para construir la cavidad, si este intervalo muestra condiciones favorables para el desarrollo de la cavidad, se suspende la perforación. En caso de que la sal no reúna las características deseables se continuará con la perforación y el muestreo hasta encontrar un espesor adecuado, que reúna las características deseadas.



La profundidad mínima para el desarrollo de la caverna se determina en base a la presión del producto por almacenar, la cual no debe ser mayor al gradiente de fractura de la formación salina. En cuanto al límite máximo, debe tomarse en cuenta que la sal se comporta como un fluido plástico a medida que la profundidad crece, normalmente las cavernas son diseñadas para profundidades menores de 1800 metros con el fin de evitar que las cavidades se cierren y/o las tuberías queden atrapadas. Se recomienda localizar la cavidad de tal modo que la influencia de ésta sobre el borde del domo salino sea insignificante.

La forma preferida de la cavidad por estabilidad es la de un cilindro. Debe considerarse que durante su vida útil, la cavidad crecerá de manera no uniforme, será de mayor volumen en la parte baja de la cavidad, y para lograr una forma similar a un cilindro, debe elegirse una forma inicial tipo cono truncado.

El diámetro de la cavidad debe calcularse de modo que ésta tenga suficiente estabilidad mecánica para que pueda ser utilizada por lo menos 20 años. La estabilidad depende esencialmente de dos factores:

- La diferencia de presión entre el terreno y la caverna.
- El espesor del pilar entre cavernas.

Si la presión interior es demasiado grande, se fractura la formación salina; si es demasiado pequeña puede ocasionarse fluencia, caída de bloques y en general una pérdida de volumen.

En una zona de almacenamiento en donde existan varias cavidades, debe respetarse una distancia mínima entre ellas (el diámetro de la cavidad), ésta distancia también está en función de las propiedades físicas y resistencia de la sal, además de que las tensiones en el pilar deben ser limitadas.

2) Durante la etapa de creación de la cavidad, se inyecta agua, lo que ocasionaría que la sal del domo se disuelva y se genere un agujero que, durante esta etapa se encontrará siempre lleno de salmuera.



El principio fundamental de la disolución reside en el hecho de que el agua es capaz de disolver sal, mientras no esté saturada:

AGUA DULCE	+	SAL	=	SALMUERA
SALMUERA	+	SAL	=	SALMUERA SATURADA
SALMUERA SATURADA	+	SAL	=	SALMUERA SOBRESATURADA

A esta etapa se le llamará "Lixiviación" nombre de la operación unitaria en la cual se *disuelve* preferencialmente un componente de una mezcla sólida con un solvente líquido.

3) La tercera etapa será la utilización de la cavidad para almacenamiento, conocida como "explotación". Durante ella, se usará el espacio generado en la etapa anterior, para almacenar el LPG. Es necesario inyectar el producto a una presión suficiente para desplazar la salmuera que se encuentra dentro de la cavidad. Cuando se requiera recuperar el producto, se llevará a cabo una operación inversa, inyectando salmuera para obtener producto en la superficie.

Otro proceso empleado para la formación de cavidades es el método de fracturación entre pozos, el cual consiste en perforar dos pozos a una distancia aproximadamente de 50 metros y crear una fractura en la sal que una los dos pozos.



CAPITULO CINCO

ALMACENAMIENTO SUBTERRANEO EN CAVIDADES ROCOSAS.

5.1 ANTECEDENTES.

La utilización de minas abandonadas o inactivas es un desarrollo relativamente nuevo en la expansión de los almacenamientos de grandes cantidades de hidrocarburos. Para uso favorable y adecuado, se debe tener una buena estabilidad interior, ser rocas impermeables no reactivas con el producto y una apropiada condición hidrológica sin fisuras o fallas que filtren o dejen escapar al producto, para poder ser utilizadas para almacenamiento.

La conversión de minas es usualmente económica comparándola con las cavernas por disolución, pero ambos métodos son realizados a un bajo costo lo que incrementa su utilidad. La primera conversión conocida de una mina subterránea para el almacenamiento de hidrocarburos fue una mina de carbón cerca de Denver, Colorado en 1959, la cual fue utilizada para el almacenamiento de gas.

En 1950, Roberts & Scisson, Inc. obtuvo contrato para desarrollar el proyecto de una compañía petrolera Warren, para abrir una nueva frontera de una mina de esquistos en Texas para almacenamiento de LPG bajo una presión aproximada de 7 kg/cm^2 . El acceso a la caverna fue abierto a través de una simple perforación para proseguir cavando hasta obtener el volumen requerido. Tecnológicamente, es posible hacer que la conversión de cualquier excavación subterránea sea económica y de factible construcción, además de ser perfectamente estanca y estable, estando el producto sin pérdidas y a un bajo costo comparado con los tanques atmosféricos a presión.

Este procedimiento de uso más reciente que el almacenamiento en cavidades lixiviadas en la sal, surgió de los considerables progresos realizados en ingeniería civil y en particular en la excavación de grandes galerías subterráneas.



Sin embargo el desarrollo de acondicionar una cavidad rocosa expresamente para almacenamiento de LPG, tiene un costo elevado.

Los principios generales de implantación, de creación y de explotación de los depósitos subterráneos de LPG de uso industrial tienden a utilizar de manera óptima las características del subsuelo, minimizando los complementos artificiales.

5.2 GENERALIDADES.

Las cavidades rocosas son depósitos excavados en la roca, utilizados para almacenar LPG. Se aprovechan las propiedades de ciertos estratos rocosos, además de que muchos de ellos son químicamente inertes con respecto al LPG.

El almacenamiento en cavidades rocosas tiene por objeto almacenar grandes cantidades de LPG. Este almacenamiento se hace en grandes galerías subterráneas excavadas en la roca, que son ideales para proveer el almacenamiento adecuado para distribución de LPG para una gran ciudad, o bien para embarque de exportación, o recibo de importación. Es además una forma muy segura y conveniente pues minimiza los riesgos de incendio y explosión.

Este almacenamiento es adecuado para hidrocarburos líquidos, gaseosos, aire comprimido e inclusive se adapta para el almacenamiento de productos a baja temperatura. Además se ha probado que la mayoría de las rocas del subsuelo son químicamente inertes a muy diversos productos líquidos y gaseosos, entre los cuales se encuentra el LPG. Es por eso que el uso de estas galerías subterráneas se ha popularizado alrededor del mundo.

Estas cavemas pueden ser usadas en centros de producción, puertos de importación y exportación o centros de consumo.

Las cavidades se construyen con técnicas clásicas de minería, y su forma se determina con un estudio geofísico del estrato rocoso, evitando en lo posible que pudiera haber necesidad de



refuerzos de concreto, que haría incosteable la obra. Además las cavernas se construyen a profundidades adecuadas, dependiendo de la presión de vapor del fluido a almacenar.

En el caso del LPG, las profundidades en que estas cavernas se construyen son:

	Presión de Vapor (kg/cm ²) Manométricas	Temperatura (°C)	Profundidad (metros)
Propano comercial	12.6	38	100 - 120
Butano comercial	5.0	38	60 - 80

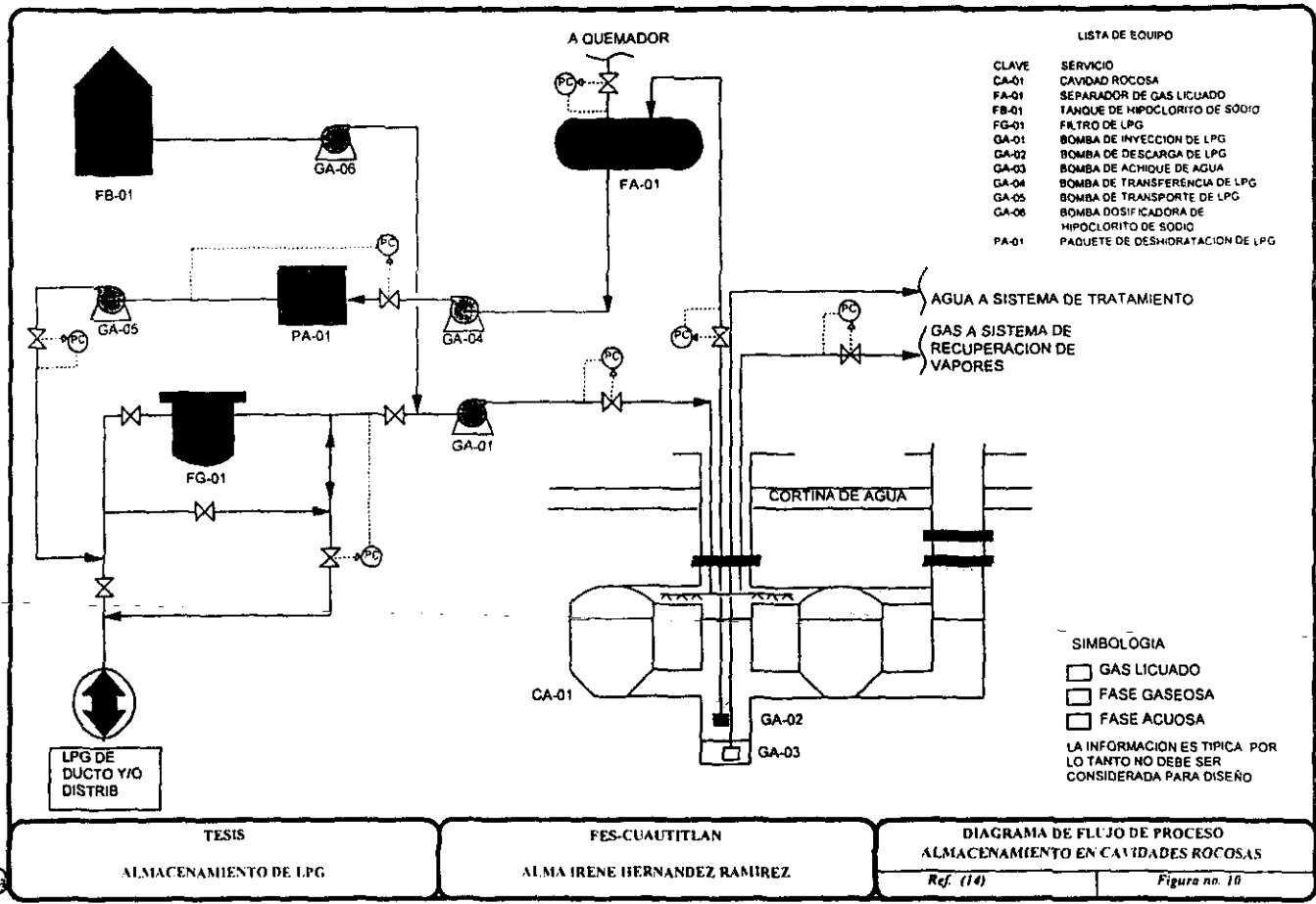
Para evitar fugas de LPG debido a que la roca es porosa se mantiene una columna hidrostática de agua que fluye por las paredes de la caverna y mantiene al LPG dentro de ella.

Las cavernas en roca (cavidades rocosas) representan una gran alternativa para el almacenamiento subterráneo, debido a que para estos sistemas se pueden utilizar diversos tipos de roca, además de que se tienen grandes posibilidades para la localización de formaciones rocosas adecuadas.

Las capacidades de las cavernas para este tipo de almacenamiento oscilan entre los 50,000 y 1,000,000 barriles.

5.3 DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCESO.

La figura No. 10 muestra el diagrama de flujo de proceso típico para el almacenamiento subterráneo de LPG en cavidades rocosas.





5.4 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

El almacenamiento de LPG se lleva a cabo en la cavidad rocosa subterránea CA-01 de acuerdo al siguiente proceso: Proveniente de límites de batería el LPG antes de ser enviado a la cavidad por medio de la bomba de inyección GA-01, es filtrado en el FG-01 para eliminar materiales tales como productos de corrosión, polvo de la atmósfera, posibles partículas abrasivas, etc. que pueda contener el líquido. Con el fin de proteger la tubería, se aplica un tratamiento a base de hipoclorito de sodio actuando como biocida proveniente del tanque FB-01 y enviándolo mediante la bomba GA-06 a la línea de entrada de líquido a la cavidad, acondicionado el LPG se inyecta a la cavidad CA-01 teniendo un controlador por presión, la cavidad deberá estar acondicionada mediante una capa de agua por posibles fugas de gas.

El vapor generado durante el almacenamiento se envía a un sistema de recuperación de vapores por medio de una válvula del sistema de control de presión.

El agua acumulada en el fondo de la cavidad se envía mediante la bomba GA-03 a un sistema de tratamiento para eliminar el LPG arrastrado e impurezas disueltas en el agua.

Para el vaciado de la cavidad, el LPG se envía por la bomba GA-02 al tanque de separación FA-01 donde los vapores que fueron arrastrados por el líquido son separados y enviados a desfogue, el LPG se envía a una planta de deshidratación PA-01 mediante la bomba de transferencia GA-04 para eliminar el agua en el gas proveniente de la cortina de agua de la cavidad.

El LPG libre de H₂O es transportado mediante la bomba GA-05 y de acuerdo a especificación se envía para su distribución por el ducto de entrada, controlando la presión .

5.5 PRINCIPIOS DE CONSTRUCCIÓN DE UN DEPOSITO.

El primer paso en la construcción de un depósito en cavidad rocosa, es el estudio del subsuelo de la localización. Esto permite garantizar que la roca del subsuelo es químicamente inerte y



compatible con el producto a almacenar, en este caso, LPG del petróleo, para evitar la formación de colonias bacterianas en el depósito.

El siguiente paso es el estudio estructural de la forma de la caverna, la estabilidad mecánica de las cavidades debe ser natural. Esto es de gran importancia ya que la forma de la caverna no debe ir reforzada con ningún implemento extra, tal como refuerzos o trabes de concreto, ya que esto eleva el costo de la caverna y dificulta su implementación, sino que debe adaptarse únicamente a los refuerzos necesarios para garantizar durante los trabajos la seguridad del personal en el fondo. En la mayoría de los casos, la estabilidad estará asegurada únicamente por la forma escogida para las cámaras o galerías de almacenamiento.

En este punto, dos tipos de esfuerzos deben ser considerados en el diseño de la caverna, los estáticos y los dinámicos ya que de ellos depende la resistencia de la roca.

Los esfuerzos estáticos son aquellos referidos a la presión que ejercen las capas de terreno situado encima de la caverna y aquellos relacionados con la presión hidrostática del agua de formación que impregna estos terrenos. Durante la excavación, los esfuerzos estáticos tendrán la presión atmosférica como única oposición desde el interior de la cavidad.

Los esfuerzos dinámicos son aquellos que se relacionan con la presión reinante de la cavidad es decir la del producto almacenado o la del agua que lo reemplaza durante la fase de explotación.

Dentro del diseño estructural solo se permiten ciertos refuerzos como serían los que se realizan, después de efectuar la purga, a zonas persistentes de inestabilidad, como son los refuerzos mediante empernados, con placas metálicas o con enrejados, o bloques que podrían desprenderse ulteriormente y que significan un peligro para el personal. La purga mencionada consiste en dejar caer a propósito y con precaución, trozos de roca desprendidos mediante explosivos o con la perforación de túneles.



En estas circunstancias, el macizo rocoso normalmente estable, se encuentra en desequilibrio en los alrededores del depósito y la forma de la cavidad debe resistir a los eventuales desórdenes relacionados con dicho equilibrio.

Las características geotécnicas de la roca y la profundidad a la que se hará el depósito deberán considerarse cuidadosamente cuando se calcule la geometría de la parte subterránea de la obra: sección y forma de vacíos, repartición de los mismos, distancia mínima entre ellos, localización de los accesos, de las galerías de comunicación o de los pozos de explotación.

Estos estudios utilizan los procedimientos clásicos de la geotécnica: fotoelasticidad, interferometría y modelación matemática.

Otro aspecto a considerar es la estanqueidad hidráulica del depósito. Para comprender el proceso suponiendo que todo tipo de roca es permeable, a excepción de la sal, y este principio es asegurado por las condiciones naturales.

En este tipo de depósito, las paredes de la cavidad no están revestidas y la capa freática, situada encima del depósito es mantenida natural o artificialmente a un nivel hidrostático superior al potencial de presión del producto, con esto se asegura que no escape hacia la roca. *Por lo tanto para asegurar este fenómeno hay que ubicar las cavidades a cierta profundidad.* Dicha profundidad está determinada por la naturaleza, presión del producto almacenado, entorno hidrogeológico y geometría de la obra.

Se ha demostrado que dicho parámetro es función de la geometría de las cavidades, de la *posición de los límites hidrogeológicos, de las heterogeneidades y anisotropías del macizo y de la naturaleza del producto almacenado.*

5.5.1 TÉCNICAS DE CREACION.

La construcción de una caverna se realiza utilizando técnicas de minería e ingeniería civil. La geometría de la caverna debe desarrollarse en la forma más simple posible, procurando obtener la mayor sección transversal, de acuerdo con las condiciones que presente la roca.



La técnica de creación es función de la profundidad a la que se situará la cavidad, y esta profundidad depende de la presión de vapor del producto a almacenar. Así por ejemplo para un depósito que contendrá butano se requiere una profundidad del orden de 60 m a 80 m y para uno de propano de 100 m a 120 m.

Las cavidades se excavan utilizando túneles de acceso inclinados que permiten el libre acceso de los trabajadores y de la maquinaria al lugar de trabajo, así como el transporte de la piedra de excavación. Los túneles también sirven como canales de ventilación que permiten la salida de los gases producidos por las detonaciones y por los vehículos funcionando en el subsuelo. La siguiente *figura No. 11* muestra como ejemplo, trazos de los túneles de construcción y la cavidad en roca.

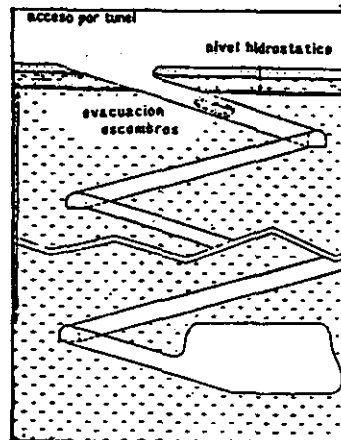


Figura No. 11

La elección del método de acceso depende del costo y del plazo para la obra. En este aspecto también deben de tenerse en cuenta los problemas de evacuación de escombros. Dentro de este aspecto prevalecen dos técnicas generales:

- Acceso de pozos de Grand.
- Acceso por túnel, que permite usar máquinas más poderosas y material rodante para la evacuación de escombros.



Una vez alcanzada la profundidad deseada, las técnicas de excavación dependen del tipo de roca a excavar y del equipo disponible. En general se utiliza el arranque con explosivos o con excavadoras de túneles.

Como estos trabajos se realizan en una zona impregnada de agua a una cierta presión hidrostática, y como las fallas y las fracturas provocan llegadas de agua demasiado importantes a la zona de cavidad, habrá necesidad de instalar equipos de bombeo de agua para prevenir las entradas de agua de este tipo y de realizar inyecciones preventivas; estas inyecciones preventivas consisten en saturar las zonas de agua y así prevenir los escurrimientos.

Una vez realizadas las galerías de almacenamiento y las eventuales galerías de comunicación, se excava un pozo desde o hacia la superficie que permitirá el paso de los diversos equipos de explotación de fondo.

Este pozo de explotación puede ser el pozo excavado al comienzo de los trabajos, u otro pozo realizado en el transcurso de los mismos, para facilitar la ventilación de los puestos de trabajo. Ulteriormente, las cavidades serán cerradas con tapones de hormigón en el fondo de la galería o del pozo de acceso.

5.5.2 ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO DE OPERACIÓN.

La operación del depósito de las cavidades se subdivide en dos grandes categorías y están en función del modo de explotación:

- a) Cavidades con nivel de agua constante.
- b) Cavidades con nivel de agua variable.

En las primeras el agua se filtra a lo largo de las paredes, y debido a la diferencia de su densidad y porque no se mezcla con el producto, se acumula en la base de la cavidad. En la solera de la cavidad se construye un sumidero en cuyo fondo se colocan bombas de achique que capta y evacua el agua a un nivel constante.



En el almacenamiento el producto se manda directamente dentro de las cavidades, y en el vaciado se recupera mediante bombas sumergidas situadas por encima del nivel de la superficie de contacto agua/producto. Al disminuir la cantidad de producto almacenado, el espacio gaseoso ocupa un volumen más importante.

En el caso de las cavidades a nivel de agua variable, el nivel superior de producto permanece constante, el espacio gaseoso encima del producto almacenado es prácticamente inexistente. En este almacenamiento, el agua es evacuada mediante bombas sumergidas, dejando así espacio disponible para el producto a almacenar. En el vaciado, el producto es bombeado a la parte superior de la cavidad y el agua de formación entra progresivamente o se inyecta a la cavidad cantidades de agua equivalentes al volumen de producto extraído.

Este método elimina los problemas de control de atmósfera gaseosa en contacto con el producto líquido.

5.6 REQUERIMIENTOS MÍNIMOS DE INFRAESTRUCTURA.

Para llevar a cabo la operación de almacenar LPG en cavidades rocosas, es necesario como primer término tomar en cuenta las siguientes etapas:

- Obtener información geológica de la zona considerada, que permita conocer las posibles zonas de falla y las necesidades de refuerzos y soportes, así como las posibilidades de extensión.
- Llevar a cabo la operación de minería.
- Equipar la caverna para almacenamiento.

El costo final de una instalación completa depende de factores como: calidad de la roca, costo de la roca recuperada, volumen a almacenar, producto almacenado y profundidad de la caverna.



Los requerimientos mínimos necesarios de la roca son:

- a) Debe ser mecánicamente competente y con la resistencia suficiente para permitir una excavación grande, sin problemas de derrumbes
- b) Debe ser homogénea en un espesor suficiente para asegurar que la excavación se encuentre dentro de una masa con propiedades y características de comportamiento similares en toda su extensión.
- c) Estar libre de fallas mayores, grietas y planos debilitados, todo lo cual requiere un trato especial.
- d) Debe tener permeabilidad a fin de mantener bajos los costos de bombeo de agua durante la operación, pero permitiendo la suficiente columna de agua subterránea para proporcionar un sello adecuado al fluido almacenado.
- e) La profundidad debe ser tal que la caverna se encuentre:
 - Abajo del nivel freático
 - Tan cerca de la superficie como sea posible
 - Debajo de una capa de roca de suficiente grosor, que no cause problemas en el techo de la cavidad
- f) La roca no deberá reaccionar con el producto almacenado.

Existen varios tipos de roca que cumplen con estos requisitos:

- Rocas intrusivas.- Granitos, dioritas
- Rocas metamórficas.- Esquistos, cuarcitas
- Calcáreas.- Calizas, dolomitas
- Rocas volcánicas y areniscas.- Riolitas, basaltos

Procesos de construcción de cavidades en roca:

Las etapas mínimas requeridas en la construcción de una caverna en roca son:

- Estudios preliminares.
- Selección de lugar.
- Investigación del lugar, que incluye el muestreo del subsuelo, establecimiento de las Bases de Diseño y costos aproximados.



- Detalles del diseño
- Construcción del pozo.
- Minado.
- Pruebas y puesta en operación.

Dado que la mayoría de las veces el techo y las paredes de la cavidad presentan cierta porosidad, debe proveerse de un método para sellar todas las fisuras y obtener una cavidad plenamente hermética.

El almacenamiento en cavidades rocosas subterráneas difiere de acuerdo al tipo que se presente, al lugar y capacidad de almacenamiento. Además de las cavidades rocosas, se pueden manejar a) minas abandonadas y b) cavidades creadas por explosiones nucleares.

En el primer tipo, frecuentemente se utilizan minas abandonadas para almacenamiento subterráneo. Estas pudieron haber sido minas de sal, carbón, piedra caliza, lignito, etc.

Como consideraciones iniciales deben determinarse la ausencia o presencia de agua y el grado de comunicación entre la cavidad de la mina y la roca saturada de agua que la rodea.

Se aplican las pruebas y consideraciones hidráulicas comunes. Es necesario aplicar pruebas que aseguren que el techo no ha sufrido deterioros (como hundimiento) a causa de las operaciones de minería.

Una vez que se ha convertido la mina para almacenamiento, aplican las mismas condiciones para cavernas en roca.

En el segundo tipo la creación de la cavidad mediante el uso por explosiones nucleares controladas es un método más para crearse un almacenamiento subterráneo.

El problema principal consiste en escoger un sitio a una profundidad adecuada, en donde pueda ser colocado el explosivo. A una cierta distancia arriba de este sitio, debe existir una



capa de roca impermeable que evitará que haya fugas a fin de evitar su contaminación radioactiva.

La detonación causa que algo de roca vaporice y otra se funde, por lo que formará un charco de roca fundida que formará el piso de la cavidad

La altura del tiro de la cavidad generalmente varía entre 3 y 5 veces el radio de la cavidad.

Debido al impacto de la explosión, son creadas fugas que se propagan desde el punto de disparo y cuya extensión es de suma importancia para el cálculo del volumen de la cavidad.

Para la operación de estas instalaciones se requieren bombas de explotación que sumergidas en el LPG, lo extraen de la caverna y lo llevan a la superficie. También son necesarias bombas de achique de agua, para eliminar ésta de la columna hidrostática que se filtra a través de los poros de las paredes de la caverna.

Como instalaciones de superficie, se necesitan coalescedores que eliminen el agua libre del LPG proveniente de cavernas y plantas deshidratadoras de LPG que lo liberen del agua de saturación y se obtenga bajo especificaciones.



CAPITULO SEIS

RESUMEN GENERAL Y ASPECTOS ECONOMICOS.

En los capítulos anteriores se explicaron los tipos de almacenamiento superficiales y subterráneos que fueron agrupados en:

★ Tipos de almacenamiento superficial:

- A Presión (Recipientes).
- Refrigerado (Recipientes).

★ Tipos de almacenamiento subterráneo:

- Cavidades Lixiviadas (Domos Salinos)
- Cavidades Rocosas (Formaciones Rocosas).

La selección de cualquiera de los tipos de almacenamiento de LPG dependerá de la consideración de factores como:

- ◆ Capacidad requerida de almacenamiento (volumen a almacenar, frecuencia de vaciado/llenado).
- ◆ Tipo de fluido a almacenar (consideraciones de operación: Presión, Temperatura, Estado de la materia, Flujo).
- ◆ Ubicación del almacenamiento (cercano a los sistemas de transporte y centros de consumo)
- ◆ Existencia de las condiciones geológicas adecuadas en el lugar donde se desea ubicar el almacenamiento (domos y formaciones, centros de distribución)
- ◆ Costos de construcción, operación y mantenimiento.



Debe remarcarse que antes de hacer una selección definitiva del tipo de almacenamiento, debe realizarse un estudio de estabilidad, análisis de riesgo y un manifiesto de impacto ambiental a fin de garantizar la seguridad de las personas y del medio ambiente.

La mayor parte de la producción nacional de LPG tiene lugar en el sureste de nuestro país, por lo que a continuación en la *figura no. 12* se muestra el sistema integral de producción y comercialización de LPG, dando la ubicación de los centros de embarque a exportación, ductos de distribución y terminales nacionales de LPG.

En la *tabla no. 9* que se muestra a continuación se enlistan los intervalos de capacidades adecuados para los diferentes tipos de almacenamiento de LPG.

En aquellos intervalos de capacidad en donde haya opción de utilizar uno u otro sistema de almacenamiento, la decisión dependerá de un estudio técnico – económico de factibilidad.

6.1 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS DIFERENTES TIPOS DE ALMACENAMIENTO.






Para el **almacenamiento a presión** se encontraron que las ventajas son: que los tanques de almacenamiento no requieren de aislamiento, que el sistema de regulación de vapores es muy pequeño (en ocasiones los vapores formados durante el llenado y vaciado pueden ser canalizados a un sistema de desfogue); es posible proveer directamente a carrostanque, remolques y autostanque.

Desventajas del almacenamiento a presión:

Es de alto costo; el requerimiento de área de los tanques y/o esferas a presión es grande; se necesita de un continuo mantenimiento; hay riesgo de siniestro si no se tienen las debidas precauciones.



Tabla no. 9

<u>CAPACIDAD (BLS)</u>	<u>ALMACENAMIENTO VIABLE</u>	
HASTA 5,000	RECIPIENTES CILINDRICOS A PRESION	
DE 5,000 A 40,000	ESFERAS A PRESION	
DE 40,000 A 600,000	RECIPIENTES CILINDRICOS REFRIGERADO	
DE 50,000 A 1,000,000	CAVIDADES SALINAS SUBTERRANEAS	
	CAVIDADES ROCOSAS SUBTERRANEAS	



Para el **almacenamiento refrigerado** las ventajas dependen del tipo de proceso que se lleve a cabo por ejemplo:

Si se requieren de tanques de acero de pared doble, éstos pueden ser de bajo costo; facilidad de acceso al recipiente; de fácil y tiempos cortos de construcción, pero existiendo limitadas protecciones en el recipiente.

Si se requieren de doble pared y de materiales de aleaciones de acero/concreto, se tiene que el requerimiento de área es pequeño y es de mayor resistencia a proyectiles y bombardeos.

Desventajas:

Su costo es mucho más elevado, así como más tardía su construcción; se necesitan de construcciones más complejas por la refrigeración.

Las ventajas y desventajas para los almacenamientos en **cavidades salinas** son:

Ventajas:

- El gas licuado sale sin contaminación alguna del almacenamiento, prácticamente seco.
- Se pueden almacenar grandes volúmenes
- Los riesgos de sabotaje son mínimos
- Las instalaciones en tierra son mínimas
- Sus ventajas económicas son muy amplias para almacenar grandes volúmenes.
- Riesgos muy bajos por concepto de fuego o aún sabotaje.
- Prácticamente no modifican las características del lugar, pues ocupan poco espacio en la superficie.

Desventajas:

- Se requiere de grandes cantidades de agua para su operación.



- La caverna salina se agranda a través de la explotación, con lo que eventualmente se hace tan grande que se tiende a abandonar, pues su estabilidad baja y su uso se vuelve peligroso.
- Hay un fuerte problema de contaminación por el deshecho de salmuera.
- Hay contaminación por el aceite de sello en el agua utilizada para lixiviar.
- La localización está limitada solo a lugares donde el subsuelo tenga estrato salino adecuado.

Las ventajas y desventajas para los almacenamientos en cavidades rocosas son:

Ventajas:

- Es económico para grandes volúmenes.
- En cuanto a su localización ofrece mayores posibilidades que los domos salinos.
- Es posible almacenar LPG a temperatura ambiente o también refrigerado.
- Riesgos muy bajos por concepto de fuego o aún sabotaje.
- Prácticamente no modifican las características del lugar, pues ocupan poco espacio en la superficie.
- No se produce contaminación por salmuera.
- La cavidad rocosa no se agranda como la cavidad salina.

Desventajas:

- El LPG obtenido de cavernas queda fuera de especificación en cuanto a su contenido de agua, requiriéndose equipo especial para su deshidratación.
- Por aspectos económicos, se prefiere el uso de domos salinos sobre cavidades rocosas en el caso en que existan estratos salinos en el lugar.
- Mayor probabilidad de fugas de LPG, produciéndose un efecto contaminante en el medio.

6.2 ENFOQUE TECNICO ECONOMICO.

Para llevar a cabo la construcción de depósitos de almacenamiento en cavidades subterráneas, el primer aspecto a considerar es la existencia de una capa de terreno en la que sea posible



crear la cavidad, para este fin conviene la realización de un estudio geológico zonal, completado por la exploración de la zona seleccionada. Se necesita también un estudio hidrogeológico del macizo. Con esto se podrá esbozar un primer esquema de lo que será en un futuro.

La fase de concepción general comprenderá los datos de explotación del futuro depósito, además de los productos por almacenar y las características del sistema de bombeo, calentadores en el puerto de importación, secadores de vaciado, etc.

También se elabora un documento que presente un esquema geométrico de la obra, planos de circulación de los fluidos; programas de creación, presupuestos de inversión y de explotación, con esto se permitirá al propietario de la obra tomar la decisión de crear el depósito.

Durante la concepción detallada de la parte subterránea, es importante la selección del acceso a la profundidad de la cavidad, el modo de excavación y detalle de los accesos.

La puesta en servicio se efectúa después de realizar las pruebas de estanqueidad de la cavidad y funcionamiento del equipo.

Para las condiciones de creación de cavidades salinas debe de existir además de una capa de sal en el subsuelo, una fuente de agua dulce, salobre o ligeramente salada (mar) cerca del futuro centro de almacenamiento, un lugar de descarga o utilización de la salmuera de lixiviación a una distancia económicamente aceptable y debe existir un lugar de almacenamiento para la salmuera concentrada cercano al futuro depósito.

Por lo anterior se investigan los precios del LPG que en su momento ayudan para un análisis de cómo se ha ido desarrollando la producción y su demanda de consumo, en especial aquellos lugares de más producción en nuestro país, y de mejor cotización en el extranjero de acuerdo al mercado, principalmente de PEMEX.

El cálculo de los costos y gastos de operación para los cuatro tipos de almacenamiento se realizan asignando precios a los distintos recursos requeridos para el buen funcionamiento de



un sistema de almacenamiento. El presupuesto de costos se subdivide en costos directos y costos indirectos, los primeros los componen la mano de obra directa de producción, la materia prima, los insumos, los materiales y servicios. Los segundos son compuestos por la depreciación y amortización de la inversión, la mano de obra indirecta de operación, mantenimiento, seguros e impuestos de la planta.

Siendo el total de los costos de producción la suma de los costos directos e indirectos.

La evaluación de un proyecto industrial consiste en verificar que éste se encuentre definido totalmente y que todas las decisiones adoptadas con respecto a las características básicas del mismo estén bien fundamentadas.

6.3 METODOS DE CARACTERIZACION DEL COMPORTAMIENTO MECANICO DEL ALMACENAMIENTO Y PREDICCIÓN DE SU VIDA ÚTIL.

La caracterización mecánica de los diferentes tipos de almacenamiento de LPG es fundamental por cuestiones de seguridad y para conocer el tiempo de vida útil de cada uno de ellos, basándose en esto se puede realizar un análisis técnico – económico para decidir la mejor opción.

La mecánica de los medios continuos permite escribir ecuaciones diferenciales que relacionan los esfuerzos mecánicos con las deformaciones a las que se vea sometido un material en función de sus propiedades físicas. Comúnmente pueden aparecer varios tipos de esfuerzos mecánicos como por ejemplo esfuerzos de compresión, esfuerzos de tensión y esfuerzos de flexión, este según la geometría y naturaleza del material, en cavidades rocosas, domos salinos y recipientes. Los principales tipos de esfuerzos que aparecen son los de corte y tensión - compresión, (esfuerzos tangenciales y normales) Por lo tanto para la caracterización mecánica completa es necesario plantear un conjunto de ecuaciones simultáneas que permite modelar la forma en que se aplican los esfuerzos y los efectos físicos que se tienen sobre la cavidad o recipiente. La solución de las ecuaciones diferenciales puede complicarse si se trata de geometría muy irregular, comúnmente sucede en los domos salinos y cavidades rocosas y



además por efecto de heterogeneidad a la distribución de esfuerzos o en la composición del material de almacenamiento. Es muy frecuente que no se pueden realizar soluciones analíticas y que se requieren de procedimiento numéricos para lograr la caracterización mecánica.

Una descripción correcta de los fenómenos que ocurren en la naturaleza debería tomar en cuenta las características discretas de la materia. Sin embargo a nivel pragmático, en muchas situaciones es conveniente la hipótesis de continuidad de la materia, lo cual permite modelar matemáticamente mediante ecuaciones diferenciales y utilizar la poderosa herramienta del cálculo diferencial e integral en la caracterización de los fenómenos físicos.

Para vencer la dificultad que presenta la solución de problemas continuos reales, caracterizados por ecuaciones diferenciales, ingenieros y matemáticos han propuesto a través de los años, diversos métodos de discretización, desde el simple y limitado método de diferencias finitas hasta los versátiles métodos de elemento finito.

En la década de los 50 se desarrolló esta técnica en el ámbito de la ingeniería aeronáutica, y se utilizó por primera vez en el diseño de un aeroplano. El nombre del método como "Elemento Finito" que permite hallar soluciones aproximadas de las ecuaciones diferenciales parciales convirtiendo el problema en un conjunto de ecuaciones algebraicas simultáneas.

La técnica de elemento finito, es un método para encontrar la mejor solución aproximada de una ecuación diferencial por optimización de los parámetros de una función propuesta como solución. La región de solución se divide en "subregiones" o elementos finitos, y se ensaya una función de aproximación a la solución de la ecuación diferencial dentro de cada elemento, imponiendo las condiciones apropiadas de continuidad en las fronteras entre las subregiones: para cada región se buscan los parámetros que minimizan el error de la solución propuesta respecto a la solución de la ecuación diferencial. El mejoramiento de la precisión se puede lograr, ya sea al disminuir el tamaño de los elementos (consecuentemente aumentar su número) o al aumentar el número de términos en las funciones de aproximación dentro de cada subregión.



Este método permite dividir la región de interés, es decir, el dominio de solución de la ecuación diferencial, de una manera mucho más flexible que con la técnica de diferencias finitas. Los nodos en los cuales se desea hallar el valor de la variable de interés no tienen que descansar en un arreglo rígido sino que pueden formar parte de una malla flexible, lo cual permite el manejo de geometrías complicadas y bordes móviles.

Es de gran importancia seguir el proceso de formación de una cavidad y el conocer su comportamiento ya en operación, para ello es necesario obtener datos para que de ahí deducir cuándo se construyeron (en forma natural) estas cavidades y determinar cual es su estado físico. Para dar respuesta a estas necesidades en junio de 1998 el Instituto Mexicano del Petróleo dio a conocer un sistema creado para la toma de datos (registros) y el subsecuente procesamiento mediante la herramienta sonar SONIMP I. Del procesamiento de dicha información se tienen resultados que definen el estado físico de la cavidad tales como la forma que asumió las dimensiones generales entre paredes horizontales, la altura de fondo al techo y, por ende, la capacidad volumétrica disponible para almacenamiento (31).

6.4 GRAFICAS COMPARATIVAS DE COSTO.

Se realizó una búsqueda en la literatura referenciada para los diferentes tipos de almacenamiento de LPG, en cuanto a su costo, producción y demanda. A continuación se presenta una serie de gráficas y cuadros comparativos de lo más relevante respecto al almacenamiento de LPG.

6.4.1 PRODUCCION Y DEMANDA.

Figura no. 13 PRONOSTICOS DE PRODUCCION Y DEMANDA DE LPG (19).

Figura no. 14 VENTAS MUNDIALES DE LPG (20).

Figura no. 15 PRODUCCION DE LPG EN MEXICO (21).



Figura no. 16 VENTAS INTERNAS DE LPG EN MEXICO (22).

Figura no. 17 VOLUMEN DE LAS VENTAS INTERNAS DE LPG EN MEXICO (23).

6.4.2 COSTOS DE ALMACENAMIENTO.

Figura no. 18 COMPORTAMIENTO DEL COSTO DE ALMACENAMIENTO DE LPG (24) (6).

Figura no. 19 COMPARACION DE COSTOS DE ALMACENAMIENTO DE LPG (6) (25).

6.5 CONSIDERACIONES.

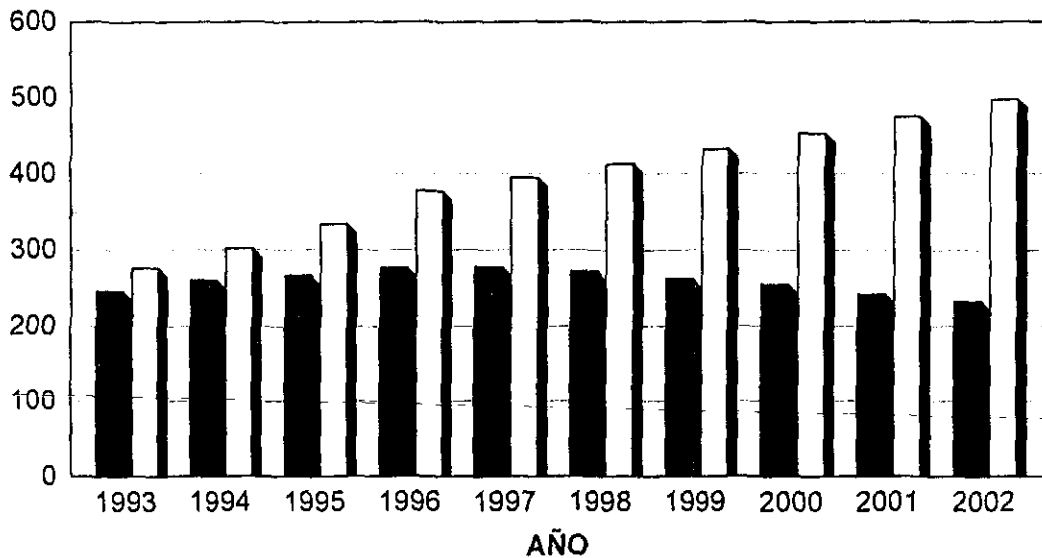
Los sistemas que se encuentran en condiciones que se puedan manejar nacionalmente son las Cavidades Salinas (Domas Salinos), ya que estos requieren de un menor costo en comparación con los otros sistemas ya especificados y cuentan con capacidad suficiente para cubrir las exigencias de la demanda y emergencias (malas condiciones climatológicas, largos tiempos de entrega, etc.). En México se cuenta con el subsuelo adecuado que se requiere para este tipo de almacenamiento. Se ha encontrado que en estos sistemas hay mínimas posibilidades de explosión e incendio, se evita la contaminación atmosférica, las instalaciones superficiales son mínimas y los gastos son menores. Además de que como cada vez es mayor la demanda de almacenamiento, los sistemas a presión o refrigerados no pueden alcanzar muy altos volúmenes.

**ESTA TIRAS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

PRONOSTICOS MUNDIALES DE PRODUCCION Y DEMANDA DE LPG

1993 - 2002

MMBPD



■ PRODUCCION

□ DEMANDA

TESIS

ALMACENAMIENTO DE LPG

FES-CUAUTITLAN

ALMA IRENE HERNANDEZ RAMIREZ

PRODUCCION Y DEMANDA DE LPG

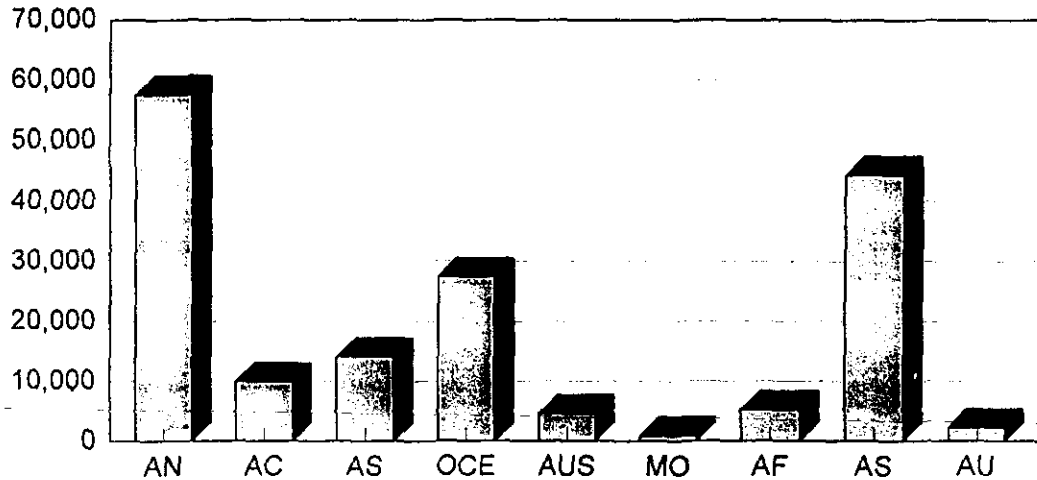
Ref. (19)

Figura no. 13

VENTAS MUNDIALES DE LPG

1997

VOL. 1000 TONS



REGION

AN	AMERICA DEL NORTE	AUS	ANTIGUA UNION SOVIETICA
AC	AMERICA CENTRAL	MO	MEDIO ORIENTE
AS	AMERICA DEL SUR	AF	AFRICA
OCE	OESTE Y CENTRO DE EUROPA	AS	ASIA
		AU	AUSTRALIA

TESIS

ALMACENAMIENTO DE LPG

FES-CUAUTITLAN

ALMA IRENE HERNANDEZ RAMIREZ

VENTAS DE LPG

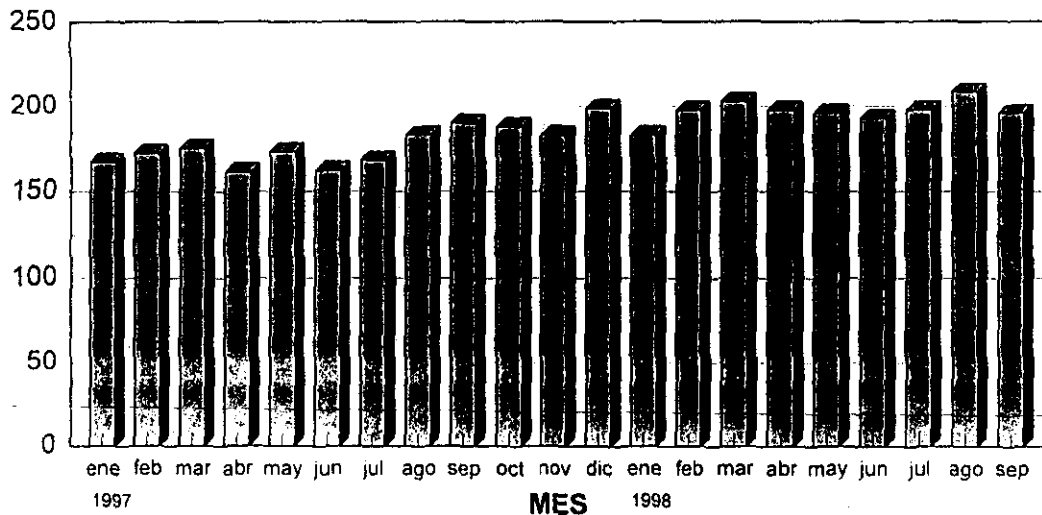
Ref. (20)

Figura no. 14

PRODUCCION DE LPG EN MEXICO

1997-1998

MILES DE BARRILES DIARIOS



TESIS

ALMACENAMIENTO DE LPG

FES-CUAUTITLAN

ALMA IRENE HERNANDEZ RAMIREZ

PRODUCCION DE LPG

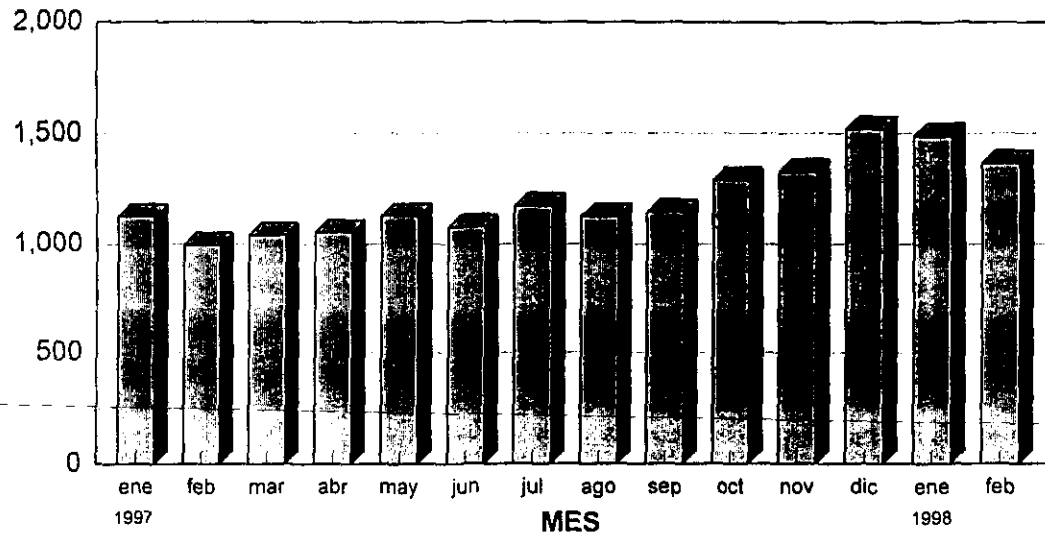
Ref. (21)

Figura no. 15

VENTAS INTERNAS DE LPG (MEXICO)

1997-1998

MILLONES DE PESOS



TESIS

ALMACENAMIENTO DE LPG

FES-CUAUTITLAN

ALMA IRENE HERNANDEZ RAMIREZ

VENTAS INTERNAS DE LPG

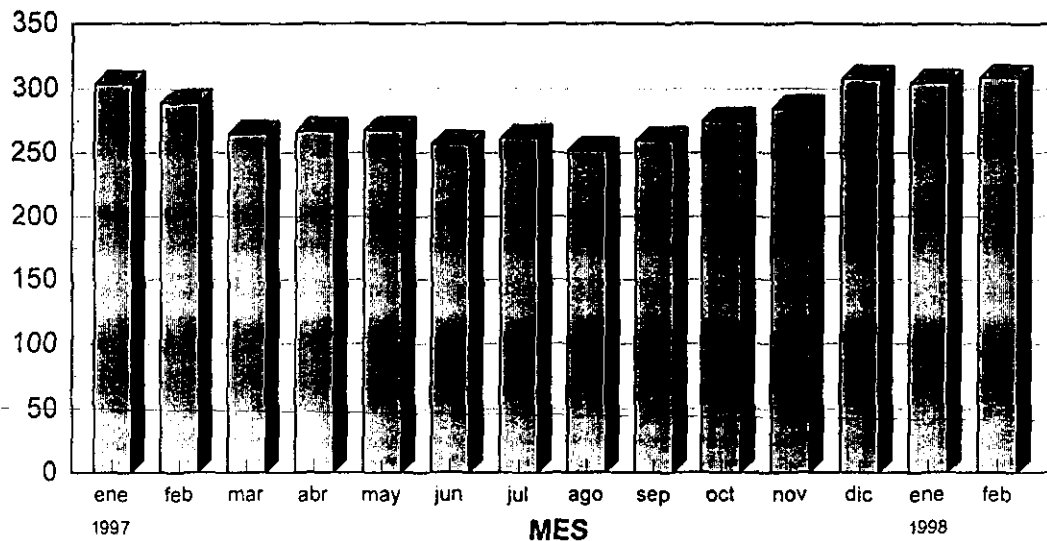
Ref. (22)

Figura no. 16

VOLUMEN DE LAS VENTAS INTERNAS DE LPG (MEXICO)

1997-1998

MILES DE BARRILES DIARIOS



TESIS

ALMACENAMIENTO DE LPG

FES-CUAUTTLAN

ALMA IRENE HERNANDEZ RAMIREZ

VENTAS INTERNAS DE LPG

Ref. (23)

Figura no. 17

COSTO DE ALMACENAMIENTO DE LPG

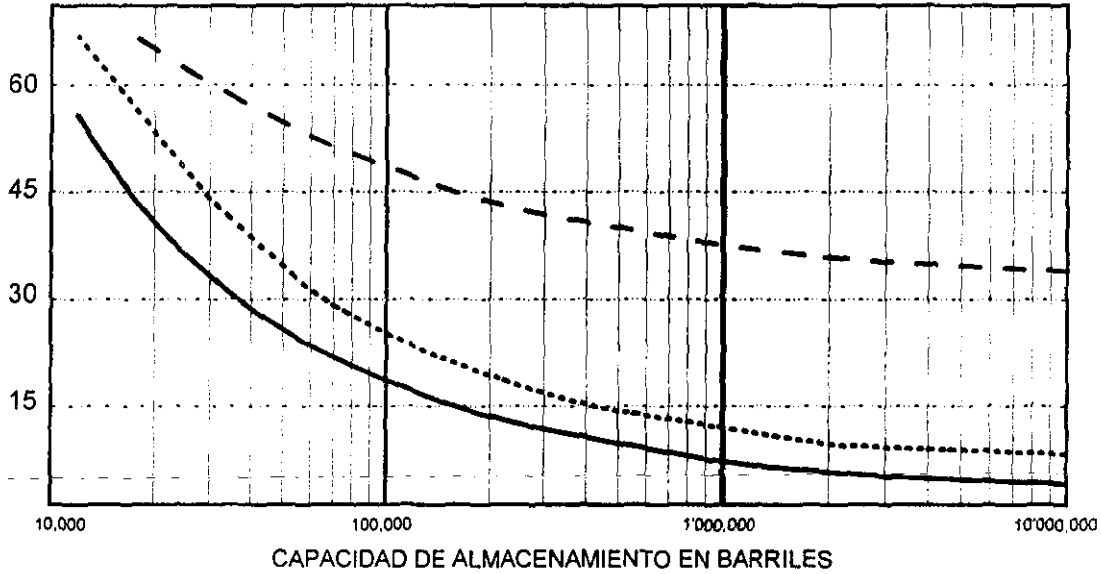
USD/BLS-AÑO

DOMOS SALINAS	5
CAVERNAS ROCOSAS	5 - 11
REFRIGERADO	15 - 20
A PRESION	35

NOTA: EL COSTO DE ALMACENAMIENTO DEPENDE DE LA CAPACIDAD TOTAL QUE SE REQUIERA

COMPARACION MUNDIAL DE COSTOS DE ALMACENAMIENTO DE LPG

COSTO UNITARIO: \$ USD/BL



— TANQUES PRES.

... CAVERNAS ROCA

— EN DOMO SALINO

TESIS

ALMACENAMIENTO DE LPG

FES-CUAUTITLAN

ALMA IRENE HERNANDEZ RAMIREZ

COMPARACION DE COSTOS DE ALMACENAMIENTO DE LPG

Ref. (6) (25)

Figura no. 19



CONCLUSIONES

Durante el desarrollo de esta tesis, se ha presentado una revisión bibliográfica y general de la importancia de los tipos de almacenamiento de LPG que existen a nivel mundial, los procesos típicos utilizados y el equipo e infraestructura mínima que se requiere para cada tipo de almacenamiento de LPG. Estos aspectos básicos se pueden tomar como punto de partida para estudios más complejos del sistema de almacenamiento que se requiera.

A través de los capítulos de esta tesis, se pueden determinar los beneficios técnicos, económicos y estratégicos que se pueden obtener en la aplicación de cualquier tipo de almacenamiento y los cuales se deben de considerar para su selección. Se puede decir que los **técnicos** son los que permiten diseñar y construir, ya sea con tecnología nacional o extranjera, almacenamientos económicos, seguros y apegados a las necesidades y alcances de los usuarios. **Económicos** los que definen la rentabilidad de los tipos de almacenamiento considerando la inversión inicial, el mantenimiento, los gastos de operación y las distancias de transporte. Y **estratégicos** los que permiten presentar las mejores condiciones de seguridad, funcionalidad y operación.

Respecto al almacenamiento superficial en recipientes a presión o refrigerados, el almacenamiento subterráneo, en todas sus variedades, presenta ventajas considerables desde el punto de vista de seguridad y de protección del medio ambiente, puesto que el LPG está aislado de su comburente natural y de esta manera se protege de un conjunto de accidentes que pueden afectar a la superficie tales como incendios, atentados, caídas de aviones, etc., además de que el almacenamiento subterráneo economiza de manera considerable la superficie ocupada.



Desde el punto de vista de seguridad en los almacenamientos en cavidades salinas no existen accidentes enlazados a la cavidad, en primer lugar debido a las excelentes características de estabilidad de la sal, en segundo lugar debido a sus características mecánicas, la sal cede pero no se rompe. El almacenamiento de LPG en cavidades salinas se justifica por ser estratégico para suspender importaciones cuando el mercado ofrece precios elevados, por ser compensador debido a las variaciones en la oferta y demanda, contingencias en la logística de manejo y distribución, además de tener el menor costo de inversión, operación, mantenimiento y tiempo de implantación comparado con los demás tipos de almacenamiento de LPG.



BIBLIOGRAFIA

- 1 UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY
"FINAL REPORT LPG LAND TRANSPORTATION AND STORAGE SAFETY"
APPLIED TECHNOLOGY CORP.
SEPTIEMBRE DE 1981
2. CLARKE CRIBB AND WALTERS
"THE PHILOSOFY OF GAS STORAGE"
I.G.E. JOURNAL
NOVIEMBRE, 1997
3. INSTITUTO MEXICANO DEL PETROLEO
COMPENDIO "SEMINARIO SOBRE ALMACENAMIENTO SUBTERRANEO"
GEOSTOCK
MÉXICO, D.F., 1985
4. SUBDIRECCIÓN DE INGENIERÍA DE PROYECTOS DE EXPLOTACIÓN IMP, SUBDIRECCION
COMERCIAL DE PEMEX
"MANUAL MANEJO DE GAS LICUADO EN AGENCIAS DE VENTAS Y TERMINALES MARITIMAS"
INSTITUTO MEXICANO DEL PETRÓLEO
MÉXICO D.F. 1990
- 5 SUBDIRECCIÓN DE INGENIERÍA DE PROYECTOS DE EXPLOTACIÓN
"CREACION DE UNA INFRAESTRUCTURA PARA EL DESARROLLO DE TECNOLOGIAS DE
PROCESO PARA PLANTAS DE REFINACION Y PETROQUIMICA"
INSTITUTO MEXICANO DEL PETRÓLEO
MÉXICO D.F. FEBRERO, 1988
- 6 SUBDIRECCION GENERAL DE TECNOLOGIA Y EXPLOTACION, SUBDIRECCION DE
INGENIERIA DE PROYECTOS DE EXPLOTACION
"ANALISIS TECNICO - ECONOMICO PARA LA JUSTIFICACION DEL ALMACENAMIENTO DE GAS
LP EN DOMOS SALINOS EN TUZANDEPETL, VERACRUZ"
INSTITUTO MEXICANO DEL PETRÓLEO
MÉXICO D F MARZO 1993



7. COLETTE PATIN – ALAIN BOULANGER
"EL ALMACENAMIENTO SUBTERRANEO DE GAS LP"
GEOSTOCK
PARIS, FRANCIA, 1986

8. G. P. I. UNDER GEOSTOK SUPERVISION
"ALMACENAMIENTO SUBTERRANEO EN CAVIDADES MINADAS EN ROCA"
(UNDERGROUND STORAGE IN MINED CAVERNS)
GEOSTOCK
LAVERA, FRANCIA, 1985

9. PATRICIA ELIZABETH PALMAS, JUAN MANUEL JIMÉNEZ
"ALMACENAMIENTO SUBTERRANEO DE PETROLEO CRUDO EN CAVIDADES SALINAS"
TESIS, FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN, UNAM
CUAUTITLAN IZCALLI, 1989

10. CARLOS EUGENIO GARCÍA FIGUEROA
"DISEÑO DE UNA PLANTA DE ALMACENAMIENTO, DISTRIBUCION Y SUMINISTRO DE GAS LP,
EN ZAMORA, MICH."
TESIS, FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN, UNAM
CUAUTITLAN IZCALLI, 1989

11. KATZ D.L. AND VARY, A.H.
DESIGN OF GAS STORAGE FIELDS
PETROLEUM TRANSACTIONS, AIME
VOL. 216, PAGE. 44, 1981

12. W. F. BLAND AND R. L. DAVISON
PETROLEUM PROCESSING HANDBOOK
MC GRAW HILL
1967

13. W. F. BLAND AND R. L. DAVISON
ENVIROMENT/PROCESS TECHONOLOGY
HIDROCARBON PROCESSING
APRIL, 1998



14. SUBDIRECCION DE INGENIERIA DE PROYECTOS DE EXPLOTACION
PRACTICAS, RECOMENDACIONES DE INGENIERIA "DIAGNOSTICO DE LAS INSTALACIONES
PARA EL MANEJO, TRANSPORTE Y DISTRIBUCION DE GAS LICUADO"
INSTITUTO MEXICANO DEL PETROLEO
MEXICO, D.F. 1988

15. MICHELE SNOECK
"LA INDUSTRIAL DE LA PETROQUIMICA BASICA EN MEXICO"
EL COLEGIO DE MEXICO, A.C.
MEXICO, D.F. 1986

16. ROBERT THORNTON MORRISON, ROBERT NEILSON BOYD
"QUIMICA ORGANICA" 2^{da} EDICION
SITESA
MEXICO, D.F. 1976

17. DIRECCION INTERNET:
<http://www.pemex.com/transp6.html>

18. GERENCIA DE SEGURIDAD INDUSTRIAL
NORMA NO.03.0.02 "DERECHOS DE VIA DE LAS TUBERIAS DE TRANSPORTE DE FLUIDOS"
INSTITUTO MEXICANO DEL PETROLEO
MEXICO, D.F. NOVIEMBRE, 1985

19. MEMORIAS DE LABORES DE PEMEX DE 1993 A 1997
MEXICO, D.F.

20. DIRECCION INTERNET:
<http://www.langeegas.com/statwle.html#WORLD>
Statistics of the worldwide lpg sales

21. DIRECCION INTERNET:
<http://www.pemex.com/enprocesogas.html>

22. DIRECCION INTERNET:
<http://www.pemex.com/ntab13.html>



23. DIRECCION INTERNET
<http://www.pemex.com/ntab12.html>
24. INDUSTRIES STORAGE
HYDROCARBON PROCESSING
NOV, 1990
25. CLAUDIO AGUILAR
UNDERGROUND STORAGE TECHNOLOGY
"PRESENTACION DE ALMACENAMIENTO DE LPG EN DOMOS SALINOS"
BRASIL, 1993
26. BARRON T.F.
"SPECIAL PIPELINE REPORT/REGULATORY, TECHNICAL PRESSURES PROMPT MORE US
SALT-CAVERN GAS STORAGE"
OIL & GAS JOURNAL
V92 N37 P55-56,58....67 (9/12/94)
27. COX J.
"A VAPOR CLOUD RELEASE FROM AN LPG STORAGE CAVERN"
NOVA PETROCHEMICALS INC.
VOL. 7, PAG. 24 (1990)
28. BEATRIZ GONZALEZ BARCENAS
"DOMOS SALINOS, ALTERNATIVA NATURAL PARA ALMACENAR GRANDES CANTIDADES DE
PETROLEO"
GACETA IMP, ORGANO INFORMATIVO
MEXICO, D.F. AÑO 1, NUM. 17, NOVIEMBRE, 1997
29. SUBDIRECCION GENERAL DE TECNOLOGIA, SUBDIRECCION DE INGENIERIA
"MODERNIZACION INTEGRAL DEL PROCESO DE PRODUCCION Y COMERCIALIZACION DEL
GAS LP" VOLUMEN I Y II
INSTITUTO MEXICANO DEL PETROLEO, PETROLEOS MEXICANOS
MEXICO D.F., SEPTIEMBRE, 1990



30. CARLOS GABRIEL COLIN FLORES
"ALMACENAMIENTO DE PETROLEO CRUDO EN CAVERNAS MINADAS EN DOMOS SALINOS EN TUZANDEPETL. VERACRUZ"
FACULTAD DE QUIMICA, UNAM
MEXICO, D.F., 1990

31. RAYBUNY MARTINEZ RUIZ
"DOS HERRAMIENTAS PARA DETERMINAR CARACTERISTICAS FISICAS EN DOMOS SALINOS"
GACETA IMP, ORGANO INFORMATIVO INTERNO
MEXICO, D.F. AÑO I, NUM. 27, JUNIO, 1998

32. PAREDES GALEANO F.
"ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO EN FLUENCIA DE LA ROCA SAL GEMA PARA DISEÑO DE CAVIDADES ALMACENADORAS DE COMBUSTIBLES"
TESIS. SEDENA
MEXICO D.F. 1996

33. NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION
"NATIONAL FIRE CODES, STANDARS, RECOMMENDED, PRACTICAS AND GUIDES"
VOLUMEN 3, No. 58
QUINCY, MASSACHUSETTS, USA. 1994



ANEXOS

NORMAS INTERNACIONALES PARA EL MANEJO DE LPG

NFPA 58. **The National Fire Protection Association publication NFPA/ANSI 58, Standard for the Storage and Handling of Liquefied Petroleum Gases.**

LISTADO DE OTROS STANDARES QUE SE CONSIDERAN PARA LOS MATERIALES DE CONSTRUCCION, INSTALACION Y OPERACIÓN.

NFPA	National Fire Protection Association
ANSI	American National Standards Institute
API	American Petroleum Institute
ASME	American Society for Mechanical Engineers
ASTM	American Society for Testing and Materials
AWS	American Welding Society
CGA	Compressed Gas Association, Inc.
FEDERAL REGULATION	U.S. Government Printing Office
ICBO	International Conference of Building Officials
UL	Underwriters Laboratories, Inc.

2-2 Containers.

2-2.1 General.

2-2.1.1 This section includes design, fabrication, and marking provisions for containers, and features normally associated with container fabrication, such as container openings, appurtenances required for these openings to make the containers gastight entities, physical damage protecting devices, and container supports attached to, or furnished with, the container by the manufacturer.

2-2.1.2 Refrigerated containers shall comply with Chapter 9.

2-2.1.3* Containers shall be designed, fabricated, tested, and marked (or stamped) in accordance with the Regulations of the U.S. Department of Transportation (DOT), the "Rules for the Construction of Unfired Pressure Vessels," Section VIII, Division 1, ASME Boiler and Pressure Vessel Code, or the API-ASME Code for Unfired Pressure Vessels for Petroleum Liquids and Gases applicable at the date of manufacture; and as follows: (See Appendices C and D.)

(a) Adherence to applicable ASME Code Case Interpretations and Addenda shall be considered as compliance with the ASME Code.

(b) Containers fabricated to earlier editions of regulations, rules, or codes listed in 2-2.1.3 and the ICC Rules for Construction of Unfired Pressure Vessels, prior to April 1, 1967, shall be permitted to be continued in use in accordance with 1-2.4.

2-2.1.4 Containers complying with 2-2.1.3 shall be permitted to be reused, reinstalled, or continued in use as follows:

(a) A container shall not be filled if it is not suitable for continued service.

(b) DOT cylinders shall not be refilled, continued in service, or transported unless they are properly qualified or requalified for LP-Gas service in accordance with DOT regulations.

(c) Containers that have been involved in a fire and show no distortion shall be requalified for continued service before being used or reinstalled as follows:

(1) DOT containers shall be requalified by a manufacturer of the type of cylinder to be requalified or by a repair facility approved by DOT.

Exception: DOT 4E specification (aluminum) cylinders shall be permanently removed from service.

(2) ASME or API-ASME containers shall be retested, using the hydrostatic test procedure applicable at the time of original fabrication.

2-2.1.5 Containers showing serious denting, bulging, gouging, or excessive corrosion shall be removed from service.

2-2.1.6 Repair or alteration of containers shall comply with the regulations, rules, or code under which the container was fabricated. Other welding is permitted only on saddle plates, lugs, or brackets attached to the container by the container manufacturer.

2-2.1.7 Containers for general use shall not have individual water capacities greater than 120,000 gal (454 m³). Containers in dispensing stations shall have an agree-

gate water capacity not greater than 30,000 gal (114 m³). This capacity restriction shall not apply to LP-Gas bulk plants, industrial plants, or industrial applications.

2-2.1.8 Heating or cooling coils shall not be installed inside storage containers.

2-2.2 Container Design or Service Pressure.

2-2.2.1 The minimum design or service pressure of DOT specification containers shall be in accordance with the appropriate regulations published under Title 49, Code of Federal Regulations.

2-2.2.2 The minimum design pressure for ASME containers shall be in accordance with Table 2-2.2.2.

Table 2-2.2.2

For Gases with Vapor Pressure in psig (MPa gauge) at 100°F (37.8°C) Not to Exceed	Minimum Design Pressure in psig (MPa gauge) ASME Code, Section VIII, Division 1, 1991 Edition (Note 1)
80 (0.6)	100 (0.7) (Note 2)
100 (0.7)	125 (0.9)
125 (0.9)	156 (1.1)
150 (1.0)	187 (1.3)
175 (1.2)	219 (1.5)
215 (1.5)	250 (1.7)
215 (1.5)	312.5 (2.2) (Note 3)

Note 1: See Appendix D for information on earlier ASME or API-ASME Code.

Note 2: New container for 100 psig (0.7 MPa gauge) design pressure (or equivalent under earlier codes) not authorized after December 31, 1947.

Note 3: See 8-2.2 for certain service conditions that require a higher pressure relief valve start-to-leak setting.

2-2.2.3 In addition to the applicable provisions for horizontal ASME storage containers, vertical ASME storage containers over 125 gal (0.5 m³) water capacity shall comply with the following:

(a) Containers shall be designed to be self-supporting without the use of guy wires and shall satisfy proper design criteria taking into account wind, seismic (earthquake) forces, and hydrostatic test loads.

(b) Design pressure (see Table 2-2.2.2) shall be interpreted as the pressure at the top head with allowance made for increased pressure on lower shell sections and bottom head due to the static pressure of the product.

(c) Wind loading on containers shall be based on wind pressures on the projected area at various height zones above ground in accordance with Design Loads for Buildings and Other Structures, ANSI A58.1. Wind speeds shall be based on a Mean Occurrence Interval of 100 years.

(d) Seismic loading on containers shall be based on forces recommended in the ICBO Uniform Building Code. In those areas identified as zones 3 and 4 on the Seismic Risk Map of the United States, Figures 1, 2, and 3 of Chapter 23 of the UBC, a seismic analysis of the proposed installation shall be made that meets the approval of the authority having jurisdiction.

Table F-3.1.3 Liquid Volume Correction Factors

Observed Temperature Degrees Fahrenheit	SPECIFIC GRAVITIES AT 60°F/60°F												
	0.500	Propane 0.5079	0.516	0.520	0.530	0.540	0.550	0.560	iso- Butane 0.5637	0.570	0.580	n-Butane 0.5644	0.590
	VOLUME CORRECTION FACTORS												
-30	1.160	1.155	1.155	1.146	1.140	1.135	1.127	1.122	1.117	1.116	1.111	1.108	1.106
-25	1.155	1.148	1.146	1.140	1.134	1.128	1.122	1.117	1.113	1.111	1.106	1.105	1.101
-20	1.147	1.142	1.140	1.134	1.128	1.122	1.117	1.113	1.111	1.106	1.101	1.099	1.097
-15	1.140	1.135	1.134	1.128	1.122	1.116	1.112	1.106	1.103	1.101	1.096	1.094	1.092
-10	1.134	1.129	1.126	1.122	1.115	1.111	1.106	1.101	1.100	1.096	1.092	1.090	1.088
-5	1.127	1.122	1.121	1.115	1.110	1.105	1.100	1.095	1.094	1.091	1.087	1.085	1.083
0	1.120	1.115	1.114	1.109	1.104	1.099	1.095	1.090	1.089	1.086	1.082	1.080	1.079
5	1.117	1.109	1.107	1.102	1.097	1.093	1.089	1.084	1.083	1.080	1.077	1.075	1.074
10	1.105	1.102	1.100	1.093	1.090	1.087	1.083	1.079	1.078	1.075	1.072	1.071	1.069
15	1.098	1.094	1.094	1.089	1.085	1.081	1.077	1.074	1.073	1.070	1.067	1.066	1.065
20	1.092	1.088	1.088	1.084	1.080	1.076	1.073	1.070	1.068	1.066	1.063	1.062	1.061
25	1.089	1.086	1.083	1.081	1.077	1.074	1.070	1.067	1.066	1.064	1.061	1.060	1.059
30	1.086	1.083	1.082	1.079	1.075	1.071	1.068	1.065	1.064	1.062	1.059	1.058	1.057
35	1.084	1.080	1.080	1.076	1.073	1.069	1.065	1.062	1.061	1.059	1.057	1.055	1.054
40	1.081	1.078	1.077	1.074	1.070	1.066	1.063	1.060	1.059	1.057	1.055	1.053	1.052
45	1.078	1.075	1.074	1.071	1.067	1.064	1.061	1.058	1.057	1.055	1.053	1.051	1.050
50	1.075	1.072	1.071	1.068	1.064	1.061	1.059	1.056	1.055	1.053	1.051	1.049	1.048
55	1.072	1.070	1.069	1.066	1.062	1.059	1.056	1.053	1.053	1.051	1.049	1.047	1.046
60	1.070	1.067	1.066	1.063	1.060	1.056	1.054	1.051	1.050	1.048	1.046	1.045	1.044
65	1.067	1.063	1.064	1.061	1.057	1.054	1.051	1.049	1.048	1.046	1.044	1.043	1.042
70	1.064	1.062	1.061	1.058	1.054	1.051	1.049	1.046	1.046	1.044	1.042	1.041	1.040
75	1.061	1.059	1.058	1.055	1.052	1.049	1.046	1.044	1.044	1.042	1.040	1.039	1.038
80	1.058	1.056	1.055	1.052	1.049	1.046	1.044	1.042	1.042	1.040	1.038	1.037	1.036
85	1.055	1.053	1.052	1.049	1.047	1.044	1.042	1.039	1.039	1.037	1.036	1.034	1.034
90	1.052	1.050	1.049	1.047	1.044	1.041	1.039	1.037	1.037	1.035	1.034	1.032	1.032
95	1.049	1.047	1.046	1.044	1.041	1.039	1.037	1.035	1.035	1.033	1.032	1.030	1.030
100	1.046	1.044	1.044	1.041	1.038	1.036	1.034	1.033	1.033	1.031	1.030	1.028	1.028
105	1.043	1.041	1.040	1.038	1.036	1.034	1.032	1.031	1.031	1.029	1.028	1.026	1.026
110	1.039	1.038	1.037	1.035	1.033	1.031	1.030	1.028	1.028	1.027	1.025	1.024	1.024
115	1.036	1.035	1.034	1.032	1.031	1.029	1.027	1.026	1.026	1.025	1.023	1.022	1.022
120	1.033	1.032	1.031	1.029	1.029	1.026	1.025	1.024	1.024	1.023	1.021	1.020	1.020
125	1.030	1.029	1.028	1.027	1.025	1.024	1.023	1.022	1.022	1.021	1.019	1.019	1.018
130	1.027	1.026	1.025	1.023	1.022	1.021	1.020	1.019	1.019	1.018	1.017	1.017	1.016
135	1.024	1.022	1.022	1.021	1.020	1.018	1.018	1.017	1.017	1.016	1.015	1.015	1.014
140	1.020	1.019	1.019	1.018	1.017	1.016	1.015	1.014	1.014	1.013	1.013	1.013	1.012
145	1.017	1.016	1.016	1.015	1.014	1.013	1.013	1.012	1.012	1.011	1.011	1.011	1.010
150	1.014	1.013	1.012	1.012	1.011	1.010	1.010	1.009	1.009	1.009	1.009	1.008	1.008
155	1.010	1.010	1.009	1.009	1.008	1.008	1.007	1.007	1.007	1.007	1.006	1.006	1.006
160	1.007	1.007	1.006	1.006	1.005	1.005	1.005	1.005	1.005	1.005	1.004	1.004	1.004
165	1.003	1.003	1.003	1.003	1.003	1.003	1.002	1.002	1.002	1.002	1.002	1.002	1.002
170	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
175	0.997	0.997	0.997	0.997	0.997	0.997	0.997	0.997	0.998	0.998	0.998	0.998	0.998
180	0.993	0.993	0.994	0.994	0.994	0.994	0.995	0.995	0.995	0.995	0.996	0.996	0.996
185	0.990	0.990	0.990	0.990	0.991	0.992	0.992	0.993	0.993	0.993	0.993	0.993	0.993
190	0.986	0.986	0.987	0.987	0.988	0.989	0.990	0.990	0.990	0.990	0.991	0.991	0.991
195	0.983	0.983	0.984	0.984	0.985	0.986	0.987	0.988	0.988	0.988	0.989	0.989	0.989
200	0.979	0.980	0.981	0.981	0.982	0.983	0.984	0.985	0.985	0.986	0.987	0.987	0.987
205	0.976	0.976	0.977	0.978	0.980	0.980	0.982	0.983	0.983	0.984	0.985	0.985	0.985
210	0.972	0.973	0.974	0.975	0.977	0.978	0.979	0.980	0.981	0.981	0.982	0.982	0.983
215	0.969	0.970	0.970	0.972	0.974	0.975	0.977	0.978	0.978	0.979	0.980	0.980	0.981
220	0.963	0.967	0.967	0.969	0.971	0.972	0.974	0.975	0.976	0.977	0.978	0.978	0.979
225	0.961	0.963	0.963	0.966	0.968	0.969	0.971	0.972	0.973	0.974	0.976	0.976	0.977
230	0.957	0.959	0.960	0.963	0.965	0.966	0.968	0.969	0.971	0.972	0.974	0.974	0.975
235	0.954	0.956	0.956	0.959	0.961	0.964	0.966	0.967	0.968	0.969	0.971	0.971	0.972
240	0.950	0.952	0.953	0.955	0.958	0.961	0.963	0.965	0.966	0.967	0.969	0.969	0.970
245	0.946	0.949	0.949	0.952	0.953	0.958	0.960	0.962	0.963	0.964	0.967	0.967	0.968
250	0.942	0.945	0.946	0.949	0.952	0.953	0.957	0.959	0.960	0.962	0.964	0.965	0.966
255	0.938	0.941	0.942	0.946	0.949	0.952	0.954	0.957	0.958	0.959	0.962	0.962	0.964
260	0.933	0.934	0.939	0.942	0.946	0.949	0.952	0.954	0.955	0.957	0.959	0.960	0.961
265	0.931	0.934	0.935	0.939	0.943	0.946	0.949	0.952	0.953	0.954	0.957	0.957	0.959
270	0.927	0.930	0.932	0.936	0.940	0.943	0.946	0.949	0.950	0.952	0.954	0.955	0.957
275	0.917	0.920	0.923	0.927	0.931	0.935	0.939	0.943	0.945	0.946	0.949	0.949	0.951
280	0.907	0.911	0.913	0.918	0.923	0.927	0.932	0.936	0.938	0.939	0.943	0.944	0.946
285	0.897	0.899	0.904	0.909	0.913	0.920	0.923	0.926	0.927	0.929	0.932	0.933	0.934
290	0.887	0.892	0.894	0.900	0.907	0.912	0.918	0.923	0.924	0.927	0.931	0.932	0.934
295	0.876	0.881	0.884	0.890	0.898	0.903	0.909	0.916	0.916	0.920	0.923	0.924	0.926
300	0.865	0.871	0.873	0.880	0.888	0.895	0.901	0.908	0.909	0.913	0.918	0.921	0.923
305	0.854	0.861	0.863	0.871	0.879	0.887	0.894	0.901	0.902	0.907	0.912	0.914	0.916
310	0.842	0.850	0.852	0.861	0.870	0.879	0.886	0.893	0.893	0.900	0.903	0.907	0.910

(1.6 MPa gauge) service pressure is 480 psig (3.2 MPa gauge); 75 percent of this is 360 psig (2.5 MPa gauge). In practice, such valves are set at 375 psig (2.6 MPa gauge).

E-2 Pressure Relief Devices for ASME Containers.

E-2.1 Source of Provisions for Relief Devices.

E-2.1.1 Capacity requirements for relief devices are in accordance with the applicable provisions of Compressed Gas Association (CGA) Publication S-1.2, Pressure-Relief Device Standards, Part 2—*Cargo and Portable Tanks for Compressed Gases*; or with CGA Publication S-1.3, Safety Relief Device Standards, Part 3—*Compressed Gas Storage Containers*.

E-2.2 Spring-Loaded Pressure Relief Valves for Above-ground and Cargo Containers.

E-2.2.1 The minimum rate of discharge for spring-loaded pressure relief valves is based on the outside surface of the containers on which the valves are installed. Paragraph 2-2.6.5(h) provides that new containers shall be marked with the surface area in sq ft. The surface area of containers not so marked (or not legibly marked) may be computed by use of the applicable formula:

(a) Cylindrical container with hemispherical heads:

Surface area = overall length \times outside diameter \times 3.1416.

(b) Cylindrical container with other than hemispherical heads:

Surface area = (overall length + 0.3 outside diameter) \times outside diameter \times 3.1416.

NOTE: This formula is not precise, but will give results with limits of practical accuracy in sizing relief valves.

(c) Spherical containers:

Surface area = outside diameter squared \times 3.1416.

E-2.2.2 The minimum required relieving capacity in cu ft per minute of air at 120 percent of the maximum permitted start-to-leak pressure (or Flow Rate CFM Air), under standard conditions of 60°F (16°C) and atmospheric pressure [14.7 psia (0.1 MPa absolute)], shall be as shown in Table E-2.2.2 for the surface area in sq ft of the container on which the pressure relief valve is to be installed. The flow rate may be interpolated for intermediate values of surface area. For containers with a total outside surface area exceeding 2,000 sq ft, the required flow rate shall be calculated using the formula:

Flow Rate CFM Air = 53.632 \times A^{0.82} where A = total outside surface area of container in sq ft.

E-2.3 Spring-Loaded Pressure Relief Valves for Underground or Mounded Containers.

E-2.3.1 In the case of containers installed underground or mounded, the pressure relief valve relieving capacities may be as small as 30 percent of those specified in Table D-2.2.2 provided the container is empty of liquid when

Table E-2.2.2

Surface Area Sq Ft	Flow Rate		Surface Area Sq Ft	Flow Rate		Surface Area Sq Ft	Flow Rate	
	CFM	Air		CFM	Air		CFM	Air
20 or less	626		170	3620		600	10170	
25	751		175	3700		650	10860	
30	872		180	3790		700	11550	
35	990		185	3880		750	12220	
40	1100		190	3960		800	12880	
45	1220		195	4050		850	13540	
50	1330		200	4130		900	14190	
55	1430		210	4300		950	14830	
60	1540		220	4470		1000	15470	
65	1640		230	4630		1050	16100	
70	1750		240	4800		1100	16720	
75	1850		250	4960		1150	17350	
80	1950		260	5130		1200	17960	
85	2050		270	5290		1250	18570	
90	2150		280	5450		1300	19180	
95	2240		290	5610		1350	19780	
100	2340		300	5760		1400	20380	
105	2440		310	5920		1450	20980	
110	2530		320	6080		1500	21570	
115	2630		330	6230		1550	22160	
120	2720		340	6390		1600	22740	
125	2810		350	6540		1650	23320	
130	2900		360	6690		1700	23900	
135	2990		370	6840		1750	24470	
140	3080		380	7000		1800	25050	
145	3170		390	7150		1850	25620	
150	3260		400	7300		1900	26180	
155	3350		450	8040		1950	26750	
160	3440		500	8760		2000	27310	
165	3530		550	9470				

installed, that no liquid is placed in it until it is completely covered with earth, and that it is not uncovered for removal until all liquid has been removed.

E-2.3.2 Containers partially underground must have pressure relief valve relieving capacities in accordance with 2-3.2.4.

E-2.4 Provisions for Fusible Plugs.

E-2.4.1 Fusible plugs, supplementing spring-loaded pressure relief valves and complying with 2-3.2.4(c), are permitted only with aboveground stationary containers of 1,200 gal (4.5 m³) or less water capacity. They shall not be used on larger containers or on portable or cargo containers of ASME construction. The total fusible plug discharge area is limited to 0.25 sq in. (1.6 cm²) per container.

E-2.5 Pressure Relief Valve Testing.

E-2.5.1 Frequent testing of pressure relief valves on LP-Gas containers is not considered necessary for the following reasons:

(a) The LP-Gases are so-called "sweet gases" having no corrosive or other deleterious effect on the metal of the containers or relief valves.

(b) The relief valves are constructed of corrosion-resistant materials and are installed so as to be protected