



UNIVERSIDAD DE JAÉN

Escuela Politécnica Superior de Jaén

**DISEÑO DE UN SISTEMA CON TÉCNICAS DE
REFRIGERACIÓN PARA LA OBTENCIÓN DE GAS
NATURAL LICUADO. APLICACIONES EN
ESPAÑA.**

Alumno: Antonio Martínez Cavanillas

Tutor: Prof. D. Nabih Khanafer Bassam

Dpto: Motores y Máquinas Térmicas



Universidad de Jaén
Escuela Politécnica Superior de Jaén
Departamento de Motores y Máquinas Térmicas

Don Nabih Khanafer Bassam , tutor del Proyecto Fin de Grado titulado:

Diseño de un sistema con técnicas de Refrigeración para la obtención de Gas Natural Licuado. Aplicaciones en España.

que presenta Antonio Martínez Cavanillas, autoriza su presentación para defensa y evaluación en la Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Jaén, septiembre de 2023

El alumno:

Los tutores:

Antonio Martínez Cavanillas

Nabih Khanafer Bassam

Índice

1. Introducción.....	7
1.1. Historia del gas natural.....	8
1.1.1 El Gas Natural en España.....	9
1.2. Explotación mundial de gas natural.....	11
1.2.1. Gaseoducto.....	11
1.2.2. Gas natural licuado (GNL).....	13
1.3. Usos del gas natural.....	15
1.4. Necesidad del gas natural licuado (GNL)	19
1.4.1. Necesidades en España	19
1.5. Enfoque del estudio.....	21
2. Estudio procesos y tecnologías de licuación	22
2.1 Refrigeración	22
2.1.1 Fundamentos de la termodinámica.....	22
Primer principio de la termodinámica	23
Segundo principio de la termodinámica.....	24
2.1.2 Teoría de la refrigeración.....	25
2.1.3 Ciclos de refrigeración.....	28
2.1.3.1 Elementos del ciclo	29
Compresor:	29
Condensador:	31
Evaporador:	34
Elementos de regulación y capacidad:	36
2.2. Criogenia.....	37
2.2.1. Propiedades de materiales a bajas temperaturas.....	38
2.2.1.1. Calor específico.....	39
2.2.1.2. Conductividad Térmica (k)	40
2.2.1.3. Dilatación térmica (ΔL).....	42
2.2.1.4. Metales superconductores	44
2.2.2. Procesos de criogenia.....	44
2.2.2.1. Criolíquidos	44
2.2.2.2. Refrigeración mecánica.....	45
2.2.2.2.1. Intercambiadores en la criogenia.....	46
2.2.2.2.2. Ciclo Linde	48
2.2.2.2.3. Ciclo Claude	50
2.2.2.2.4. Ciclo Kleemenko	51

2.2.2.2.5. Ciclo Philips Stirling	53
2.2.2.2.6. Ciclos con turbinas de expansión	54
2.2.2.3. Refrigerador por tubos de pulso (pulse tube refrigerator, PTR):	54
2.3. Tecnologías de licuación de Gas Natural	55
2.3.1. Propiedades del gas natural.....	55
2.3.2. Bases de la tecnología de licuefacción.....	56
2.3.2.1. Selección de refrigerante para procesos de licuación de gas natural	56
2.3.2.2. Mezcla de refrigerantes.....	57
2.3.2.3. Procesos bases de licuación	58
2.3.2.3.1. Ciclos en cascada	58
2.3.2.3.2. Ciclos con mezcla de refrigerantes (CMR)	59
2.3.2.3.3. Mezcla de refrigerantes Única y Dual	59
2.3.2.3.4. Ciclos de expansión de gas.....	60
2.3.2.4. Criterio de selección de un proceso	60
2.3.3. Sistemas y Tecnologías reales de licuefacción de GN	61
2.3.3.1. Phillips optimized cascade GNL process.....	61
2.3.3.2. PRICO (Black and Veatch Pritchard process)	62
2.3.3.3. Statoil/Linde mixed fluid cascade process	64
2.3.3.4. Proceso de licuefacción IFP/Axens	65
2.3.3.5. Shell dual mixed refrigerant proceess	67
2.3.3.6. APCI Propano pre-refrigerado con mezcla de refrigerante	68
2.3.4. Proceso de selección	68
3. Aplicación en una planta: Análisis de la planta de Snøhvit, Noruega.....	72
3.1. Planta de GNL de Snøhvit, Hammerfest, Noruega	73
3.1.1. Ubicación y contexto	73
3.2. Procesado del Gas natural	74
3.2.1. Tratamientos pre-licuación	74
3.2.2. Ciclo de criogenia del GN.....	75
Datos de diseño:.....	76
Cálculo de entalpías	78
Balance de energía en los intercambiadores	84
Potencia de compresión:	89
Eficiencia	92
3.2.3. Tratamientos post-licuación.....	93
3.3. Balance de la Planta	93
4. Conclusiones: Implementación en España.....	94

ANEXOS	99
Anexo 1: Diagramas P-H	99
Nitrógeno (N ₂).....	99
Metano (C ₁)	100
Etileno (C ₂ , R1150).....	101
Propano (C ₃ , R290)	102
Anexo 2: Proceso de cálculo con ayuda de MATLAB	103
Cálculo de propiedades GN	103
Cálculo de las MR según proporción e intercambiadores	104
Cálculo de h y s de un punto para una MR.....	105
Bibliografía	105

Índice de ilustraciones

Ilustración 1.1: Tabla de composición molecular del gas natural	7
Ilustración 1.2: Extracción manual de pozos de gas	9
Ilustración 1.3: Planta e regasificación de Barcelona.....	10
Ilustración 1.4: Mapa de gaseoductos Europeos	12
Ilustración 1.5: Mapa de red rusa de gaseoductos con Asia.....	13
Ilustración 1.6: Mapa de Comercio mundial de GNL.....	14
Ilustración 1.7: Mapa de producción mundial de Gas Natural	15
Ilustración 1.8: Fogón regulable de cocina de gas.....	16
Ilustración 1.9: Calderas industriales de gas	17
Ilustración 1.10: Esquema de una central térmica de ciclo combinado	18
Ilustración 1.11: Tabla de descargas por orígenes y plantas de regasificación.....	20
Ilustración 1.12: Gráfico de descarga de buques en los últimos años.....	20
Ilustración 2.13: Ciclo de Carnot inverso.	26
Ilustración 2.14: Ciclo de refrigeración sobre curvas de estado de un refrigerante.	27
Ilustración 2.15: Esquema de instalación de refrigeración	29
Ilustración 2.16: Esquema de compresor Scroll.....	30
Ilustración 2.17: Esquema de turbocompresor con turbina.	30
Ilustración 2.18: Tablas de selección según relaciones de presión y caudal.....	31
Ilustración 2.19: Diagrama de fase de un intercambiador/condensador.....	32
Ilustración 2.20: Diagrama de fases evaporador.....	35
Ilustración 2.21: Esquema de válvula de expansión.	36
Ilustración 2.22: Desarrollo histórico de la criogenia.....	38
Ilustración 2.23: Tabla de Calor específico (C _p) de distintos materiales para bajas temperaturas.....	40
Ilustración 2.24: Conductividad térmica (k) para distintas temperaturas en varios elementos	42
Ilustración 2.25: Tabla de dilatación lineal de materiales a distintas temperaturas	43
Ilustración 2.26: Propiedades del helio líquido.....	45
Ilustración 2.27: Intercambiador de calor tipo Hampson	47
Ilustración 2.28: Intercambiador de Placas.....	47

Ilustración 2.29: Ciclo Linde Simple	48
Ilustración 2.30: Ciclo Linde dual	50
Ilustración 2.31: Ciclo Claude	51
Ilustración 2.32: Esquema instalación de ciclo Kleemenko	52
Ilustración 3.33: Fases ciclo Stirling de refrigeración	53
Ilustración 2.34: Diferencia entre el Stirling y Stirling-PTR	55
Ilustración 2.35: Curva de refrigeración del gas natural	58
Ilustración 2.36: Esquema ciclo en cascada optimizado Phillips	62
Ilustración 2.37: Ciclo MR PRICO	63
Ilustración 2.38; Ciclo Statoil/Linde	65
Ilustración 2.39: Ciclo IFP/Axens	66
Ilustración 2.40: Tabla de comparación de turbinas	70
Ilustración 3.41: Planta de GNL, isla Melkøya.	73
Ilustración 3.42: Esquema de la instalación de licuefacción	77
Ilustración 3.43: Esquema simplificado por puntos de la instalación	79
Ilustración 3.44: Esquema de fase de compresión de la instalación	89

Índice de Tablas:

Tabla 1: Propiedades Nitrogeno (N2)	80
Tabla 2: Propiedades Metano (C1)	80
Tabla 3: Propiedades Etileno (C2)	81
Tabla 4: Propiedades Propano (C3)	82
Tabla 5: Propiedades del Gas Natural (GN)	82
Tabla 6: Propiedades Mezcla refrigerante ciclo sub-enfriamiento (MR1)	83
Tabla 7: Propiedades Mezcla refrigerante ciclo licuefacción (MR2)	83
Tabla 8: Propiedades Mezcla refrigerante ciclo pre-enfriamiento (MR3)	84
Tabla 9: Propiedades refrigerantes puros (Fase Compresión)	90
Tabla 10: Fase compresión Sub-enfriado	91
Tabla 11: Fase compresión Licuefacción	91
Tabla 12: Fase compresión pre-enfriado	91

1. Introducción

Para hablar de gas natural licuado (GNL) deberemos primero comentar los orígenes del gas natural y su importancia en la sociedad actual.

Como definición de gas natural podremos decir que se trata de una mezcla de gases principalmente hidrocarburos, específicamente constituida por Metano y por Etano junto con otros componentes en proporciones más insignificantes. La composición dependerá de la zona en la que se extraiga, es decir, no siempre cumple con esos porcentajes. En la ilustración 1.1 podemos ver la composición típica del gas natural, estas composiciones varían pudiendo aumentar las fracciones de compuestos inorgánicos como el CO₂ que disminuirá la capacidad energética del gas.

Compound	Mole Fraction
Methane	0.8407
Ethane	0.0586
Propane	0.0220
i-Butane	0.0035
n-Butane	0.0058
i-Pentane	0.0027
n-Pentane	0.0025
Hexane	0.0028
Heptanes and Heavier	0.0076
Carbon Dioxide	0.0130
Hydrogen Sulfide	0.0063
Nitrogen	0.0345
Total	1.0000

Ilustración 1.1: Tabla de composición molecular del gas natural

Este gas proviene de formaciones geológicas lo que implica que no es renovable. La principal obtención de este gas se realiza a través de yacimientos fósiles, aunque puede obtenerse a través de descomposición de restos orgánicos, a esto último se le

llama biogás y puede ser una forma sostenible y renovable de obtención de gas natural.

Sabiendo lo básico del gas natural seremos capaces de analizar las implicaciones de este gas durante la historia de nuestro mundo y como repercute ahora mismo en nuestra sociedad, y así entender bien la función del GNL y del proceso que conlleva licuar el gas natural.

1.1. Historia del gas natural

El descubrimiento del gas natural no se realizó en paralelo en todo el mundo, en las distintas civilizaciones se datan usos del gas natural en distintas épocas de la historia. De hecho, el descubrimiento del gas natural se atribuye a la Edad Antigua en Oriente Medio.

Aún su temprano descubrimiento, el gas natural no recibió un uso hasta edades más avanzadas puesto que había un desentendimiento general sobre su naturaleza. En las civilizaciones antiguas los pozos de gas natural recibían un gran misticismo puesto que estos pozos podían llegar a arder haciendo que salieran llamas de los pozos, es decir, de fisuras del suelo, esto era resultado de algún impacto de un rayo sobre el pozo. Para las antiguas civilizaciones como la de la antigua Grecia, estas deflagraciones salidas del suelo eran consideradas expresiones divinas y por lo tanto no eran explotadas como uso energético. En la civilización helénica se data una quema accidental del gas en el Monte Parnasso, el sitio donde ocurrió se declaró divino y se construyó un templo, lo que actualmente es el oráculo de Delfos.

Este tipo de fenómenos se adoraban mucho en religiones de India, Grecia y Persia que no podían explicar la procedencia de las llamas. En China aprovecharon el carácter energético del gas a partir del 900 A.C y en el 211 A.C se empezó a extraer excavando los pozos. La sociedad china utilizaba el gas para calentar agua marina y hacer potable la misma, el gas lo guiaban a través de tuberías de bambú.

En el mundo occidental no se empieza a usar el gas natural hasta principios del siglo XVII donde se descubre gases filtrados cerca del Lago Erie en América. En Europa tardó un poco más hasta que se descubrió en Gran Bretaña en 1659. El gas

no se empezará a comercializar hasta 1790 donde sustituirá al gas obtenido del carbón.



Ilustración 1.2: Extracción manual de pozos de gas

A partir de ahí se encuentran distintos pozos alrededor del mundo y el uso del gas natural era casi siempre como fuente de luz, no es hasta que las estructuras de transporte se hicieron más eficientes que el gas no llega a las casas para utilización en energía térmica. Al inicio de la Segunda Guerra Mundial será cuando los sistemas de transporte y almacenamiento de gas se desarrollan, también se investiga en los procesos de explotación de pozos.

A día de hoy el gas natural está implantado directamente en nuestras vidas como algo normal, además las técnicas de almacenaje y transporte del mismo han avanzado de forma gigantesca, hasta el punto de poder licuar el gas natural para facilitar su exportación. Gracias a la demanda europea de gas natural, Estados Unidos ha estado exportando GNL, usando las técnicas que describiremos en el estudio. Este movimiento de recursos es hoy en día un tema de controversia y un punto estratégico en la guerra comercial entre las potencias mundiales.

1.1.1 El Gas Natural en España

La historia del gas natural en España es más reducida, debido a nuestra inestabilidad social y económica en el siglo XIX y XX España no avanza al mismo

ritmo que las capitales europeas y por lo tanto el uso del gas se queda más atrás, no es hasta finales de los años 60 donde en Barcelona se empieza a regasificar el GNL, el cual procede de Libia, con ese gas se empieza a abastecer a la ciudad de Barcelona.

De 1985 a 1993 se utilizará el GNL de exportación, que se regasifica en plantas como la de Barcelona, Huelva y Cartagena y a esto complementaban dos pozos de gas situados en España: el yacimiento de Serrablo y Gaviota, que contaban con una producción limitada. En 1993 se activa la primera conexión por gasoducto con Europa, el cual proviene de Noruega.



Ilustración 1.3: Planta e regasificación de Barcelona

Más adelante, en 1996, se conectará el gasoducto proveniente de Argelia por la península de Tarifa, y se conectan a esta red nuestros yacimientos de gas. Este gasoducto cruza por Marruecos y es necesario un acuerdo sobre consumo del gas. En 2011 por Almería se conecta directamente con el gasoducto argelino evitando así el país de tránsito.

Hoy en día el 60% de nuestro gas viene de GNL exportado y un 40% de los gasoductos, los países de donde procede el gas son bastantes diversos. El país que más contribuye es Argelia. Vemos como la falta de yacimientos nacionales hacen que

el gas natural sea principalmente de importación y para ello el GNL será una tecnología importante para España.

1.2. Explotación mundial de gas natural

Como hemos visto, actualmente la industria del gas natural esta en auge, al ser una de las fuentes energéticas más usadas en el mundo y a su vez estar en pleno desarrollo debido a lo relativamente nueva que es la industria.

En todo el mundo se requiere un volumen de este gas para diferentes usos, sin embargo, no todos los países tienen un acceso natural, es decir, un yacimiento disponible. Los países que tiene más disponibilidad de gas natural se encargan de exportarlo al resto.

Nuestro elemento es un gas, por lo que la forma de distribución se complica. Hay dos formas principales de transporte de gas natural, por gaseoducto en su forma natural o licuándolo para su previo transporte en barriles. El máximo problema de estos métodos es que no son simples y conllevan grandes gastos de distribución.

1.2.1. Gaseoducto

El gaseoducto consiste en el transporte del gas a través de tuberías en su estado natural, gaseoso. Este tipo de transporte tiene sus limitaciones debido a que se necesita una gran infraestructura para transportar el gas grandes distancias.

En Europa se ha desarrollado una red de gaseoductos que abastecen a todos los países desde los exportadores de gas natural. La idea principal es que los principales yacimientos de gas natural sean explotados para el máximo número de población posible.

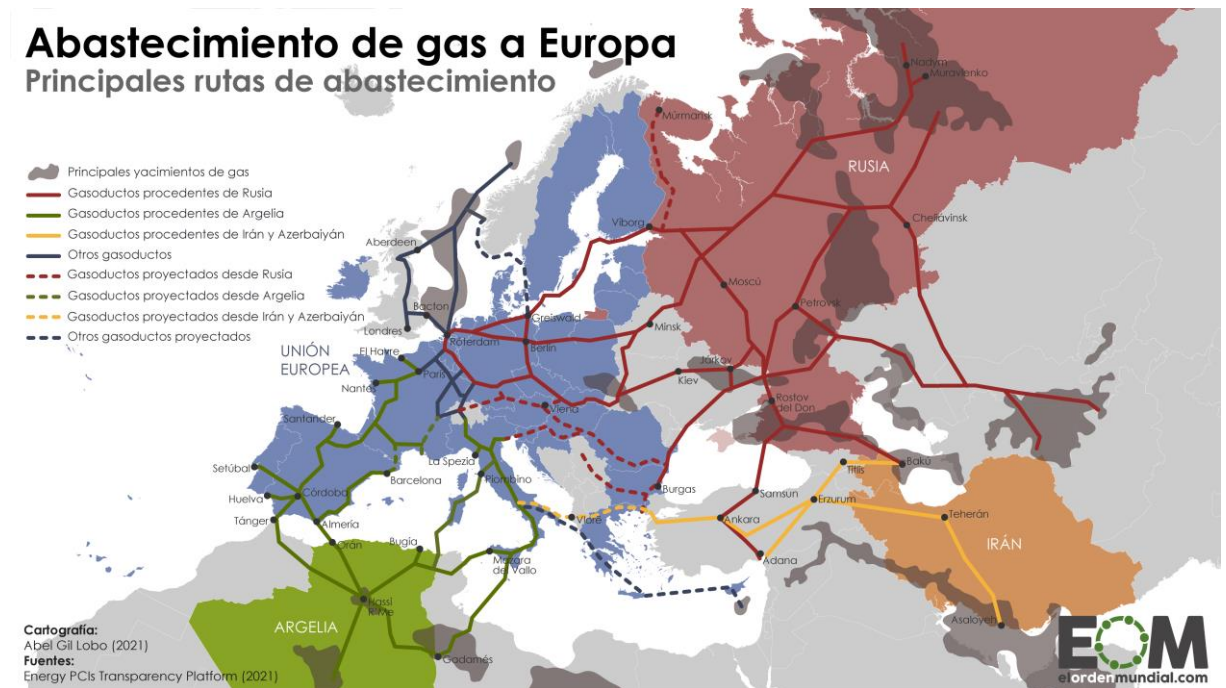


Ilustración 1.4: Mapa de gaseoductos Europeos

Vemos que los principales distribuidores de gas en Europa son Rusia, Argelia e Irán, estos países establecen unas tarifas para su distribución por Europa.

Rusia posee la reserva de gas natural más grande del mundo con alrededor de 1.3 billones de pies cúbicos. Los tres yacimientos más importantes de este país son Yamburg, Urengoy y Medvezh'ye que representan el 45% de las reservas del país, estos yacimientos se encuentran en la región de Nadym-Pur-Taz al norte de Siberia occidental. La empresa rusa que controla hasta el 80% de producción de gas de Rusia es Gazprom, a su vez controla más del 65% de las reservas.

Argelia es el productor de gas natural más grande de África, sus reservas se estiman en 159.1 billones de pies cúbicos, su yacimiento más representativo es Hassi R'Mel. Sonatrach es la empresa dominante en la producción de gas, aun así, muchas otras empresas como Repsol o BP están involucradas en la producción.

Por detrás de Rusia se encuentra Irán, con una de las reservas de gas más grande del mundo, la cantidad estimada es de 1187 billones de pies cúbicos. El 60% de las reservas de Irán se encuentran en alta mar, aparte los yacimientos no están muy desarrollados debido a sanciones internacionales. South Pars es el yacimiento que supone el 27% de las reservas, los otros puntos de extracción importantes del

país son North Pars, Kish y Kangan. National Iranian Oil Company (NIOC) controla el desarrollo y la producción del país.

Estos países son los principales abastecedores de gas natural en Europa a través de gasoducto. En América y Asia tienen sus propias redes de gas, aprovechándose también de los yacimientos anteriormente nombrados. Cabe destacar a Venezuela como país distribuidor, junto con Turkmenistán.

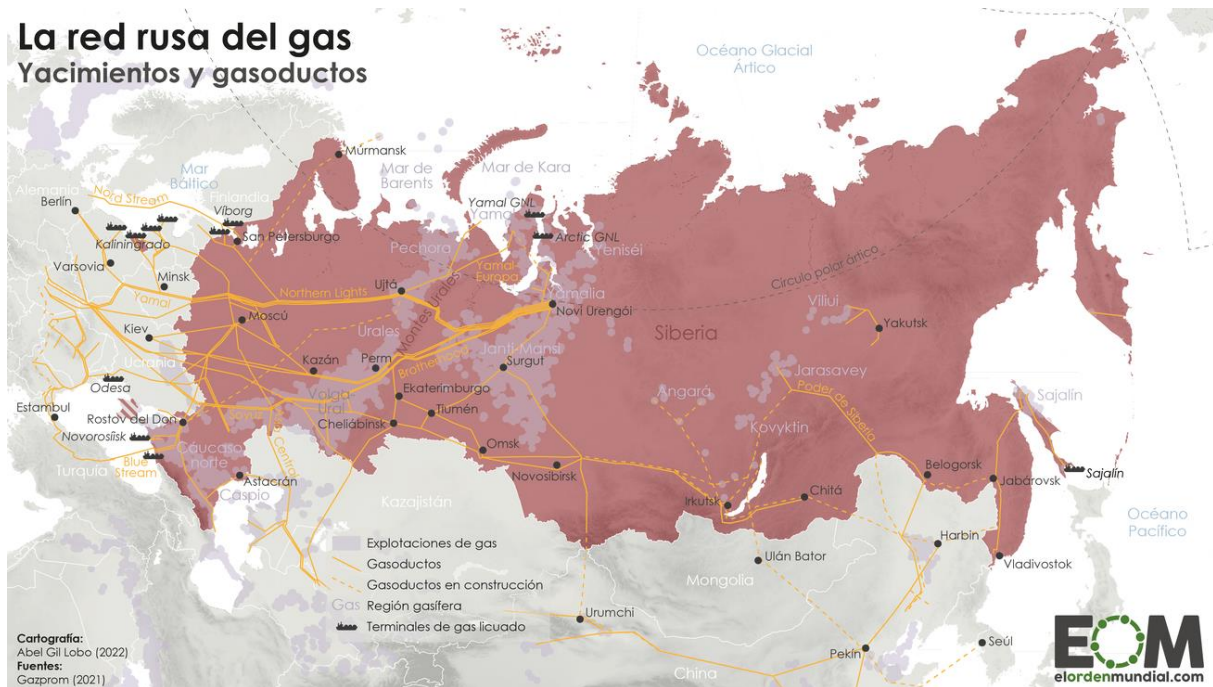


Ilustración 1.5: Mapa de red rusa de gasoductos con Asia

1.2.2. Gas natural licuado (GNL)

El gas natural licuado consiste en cambiar de estado físico del gas, transformar de estado gaseoso a estado líquido y así transportarlo mediante recipientes, pudiendo así transportar el gas grandes distancias en medios de transporte convencionales.

Las potencias mundiales en explotación de gas natural utilizan esta tecnología para llegar así a todas las partes del mundo y poder abastecer a más personas. Al contrario que con los gasoductos, debido a esta tecnología los países encuentran un gran abanico de posibilidades a la hora de explotar sus yacimientos y exportar su gas.

Cuando hablamos de GNL, el principal exponente y el país que más depende de esta tecnología será Estados Unidos. Estados Unidos exporta un 84.2% de su comercio de gas natural en estado líquido, en específico 91.7 bcm/a (mil millones de metros cúbicos al año), concretamente en el año 2021. Y junto con Australia que su comercio es casi 100% en GNL.

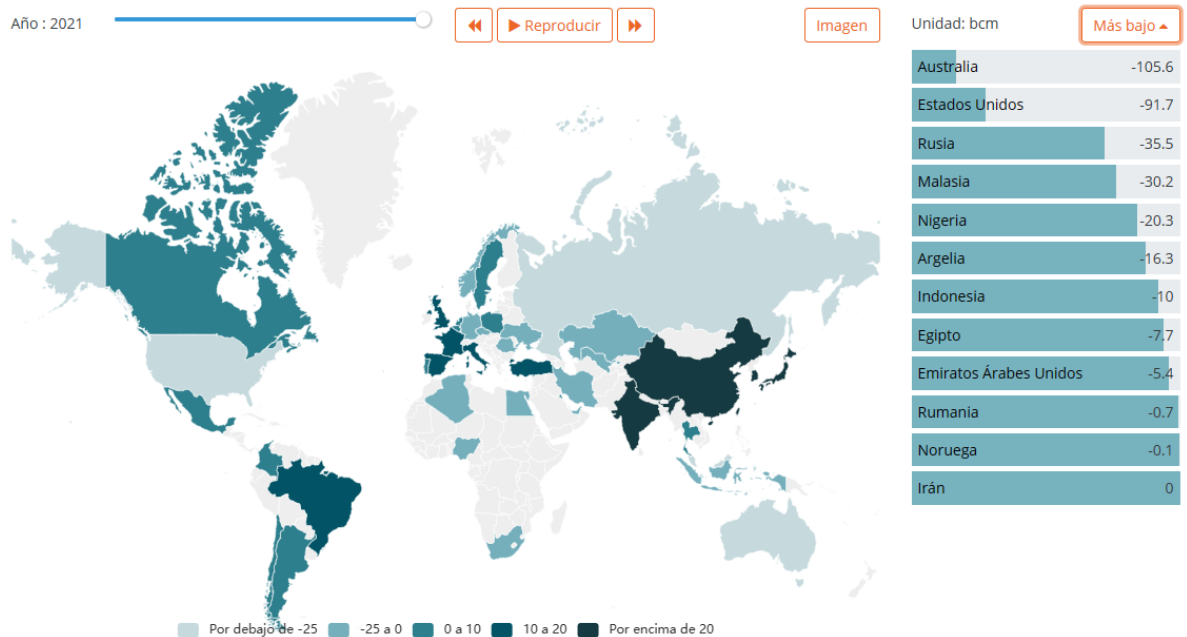


Ilustración 1.6: Mapa de Comercio mundial de GNL

Estados Unidos, gracias a la técnica de extracción del fracking paso de ser importadora de gas a exportar gas y ahora convertirse en el mayor productor de gas natural del mundo con 975 bcm/a, es a partir de 2017 cuando este país empieza a exportar hasta los niveles actuales.

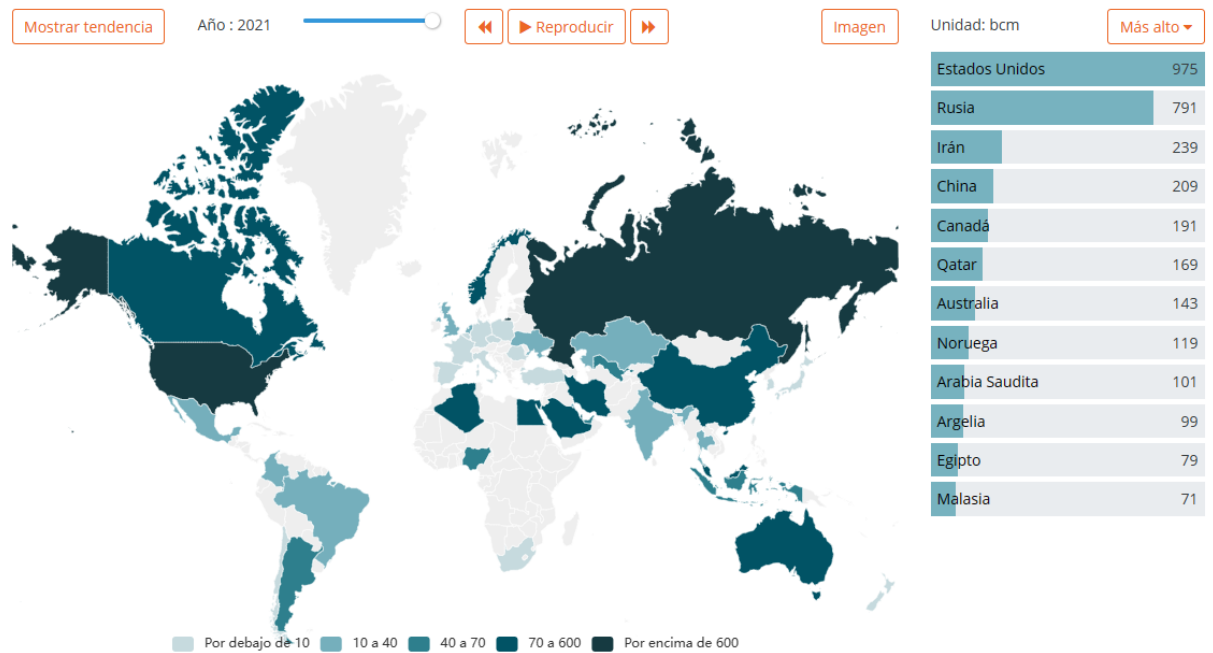


Ilustración 1.7: Mapa de producción mundial de Gas Natural

1.3. Usos del gas natural

En la actualidad el gas natural es una de las fuentes de energía más utilizada en el mundo, aun así, como hemos visto en su historia es muy reciente. El aprovechamiento real del gas empieza a producirse una vez que tenemos formas de guiar y controlar el gas, conforme las tecnologías avanzan los usos del gas natural aumentan.

Por ejemplo, no es hasta que se encuentra una forma de guiar gas a través de tuberías, que el gas es usado como fuente de calefacción; o hasta que Robert Bunsen inventa el mechero Bunsen (que logra una combustión controlada del gas) que el humano usa el gas para la cocina o para laboratorios de forma segura.

Actualmente tenemos miles de usos para el gas debido a las distintas tecnologías desarrolladas durante los últimos años. Una forma correcta de clasificar los usos del gas sería según su función general. Aquí clasificaremos los mismos según la siguiente lista:

- **Calefacción**

El uso en calefacción viene dado principalmente en usos domésticos o en pequeños negocios sustituye a la calefacción eléctrica, al propano y butano.

La principal forma de obtención de calefacción es a partir de calderas usando la quema del gas. Hay otras formas tales como el suelo radiante.

- **Agua caliente sanitaria (ACS)**

El ACS permite obtener agua caliente para uso doméstico, al igual que en la calefacción se obtiene a partir de la quema del gas, esto transfiere energía al agua.

- **Cocina**

Uno de los usos más cotidianos del gas, se basa en la combustión controlada del gas, a través de los fogones que distribuyen la llama para calentar el aparato de cocina. El gas también es usado en hornos.



Ilustración 1.8: Fogón regulable de cocina de gas

- **Gasodomésticos**

Los gasodomésticos son aparatos dedicados a la mejora de la vida a través del gas natural. Por ejemplo, frigoríficos de gas que realizan un ciclo de absorción o incluso lavavajillas a gas.

- **Climatización**

Para climatización el gas natural es usado para realizar ciclos frigoríficos, pueden a ver dos formas de aprovechamiento del gas. El gas puede realizar un ciclo de absorción calentando la mezcla de gases, también se usa para alimentar los compresores que aumentan la presión del refrigerante que realiza el ciclo.

- **Aplicaciones industriales**

Es el campo principal de los usos del gas natural, supone un 54 % de los usos, el gas se usa en distintas industrias como materia prima siendo esta una fuente de calor primaria. Dependiendo de la industria se aprovechará esa energía térmica de distintas maneras.



Ilustración 1.9: Calderas industriales de gas

- Generación de electricidad

Es el segundo uso más utilizado, a través de las centrales de ciclo combinado son capaces de generar electricidad a través de dos turbinas, una para el gas y otra para vapor de agua, calentado con los gases de escape de la turbina de gas.

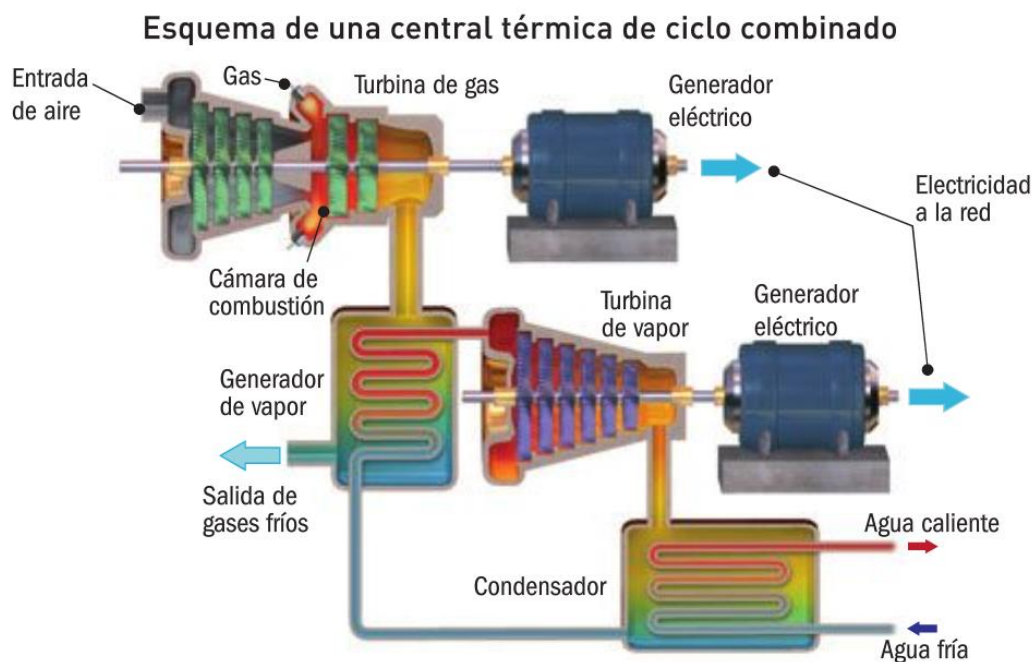


Ilustración 1.10: Esquema de una central térmica de ciclo combinado

- Vehículos

Otro uso del gas puede ser la automoción, se puede usar el mismo como combustible. Cabe destacar que para tenerlo en combustible líquido será necesario mantenerlo a una alta presión (200-250 bares), esto puede implicar un peligro en caso de accidente del vehículo. También es cierto que la quema del gas como combustible es mucho más limpia que la quema de otro combustible fósil como el gasóleo.

1.4. Necesidad del gas natural licuado (GNL)

Como hemos visto, el gas natural está implementado en nuestra vida cotidiana de una manera asombrosa. Conforme las tecnologías y la vida científica avanza, la necesidad de gas aumenta y sabiendo que este gas no es una fuente renovable de energía necesitamos un control y abastecimiento controlado de manera mundial.

Gracias a las técnicas de refrigeración que profundizaremos en este estudio somos capaces de licuar el gas natural. Este proceso nos permite ayudar a cubrir la necesidad de gas mundial, nos ayuda a que nuestras casas estén siempre abastecidas y no sea tan caro el gas, es decir, que sea un recurso habitual y asequible para todos. Esto implica que el control mencionado antes se pueda llevar a cabo.

Junto a los gaseoductos, el gas natural licuado es la forma de que los países que no tienen yacimientos naturales de gas puedan acceder a este privilegio. La forma de transporte por gaseoducto implica una gran inversión en instalaciones, aparte de que hay una gran barrera física que limita las exportaciones. Es por eso que el gas natural licuado nace, con estas técnicas somos capaces de superar las barreras físicas y abaratar el precio del gas debido a que no conlleva tanto el transporte.

El estudio y avance de las técnicas de licuación de gas natural ayudarán a que las empresas productoras y comercializadoras de gas natural puedan producir y exportar de manera más sencilla y más barata, esto repercutirá en la asequibilidad del gas para las personas y empresas de los países importadores.

1.4.1. Necesidades en España

En España se consumió en el año 2022 unos 364.3 TWh (teravatios hora), una potencia significativa con la cual vemos la importancia del gas en un país el cual no tiene recursos naturales del mismo. Dentro de la necesidad de la importación de gas natural, España recurre en 54.5% a la obtención de gas natural a través de GNL. Esto nos dice la dependencia que tenemos de este método de transporte y lo que significa el avance en las tecnologías de refrigeración de gas.

Nuestras centrales de regasificación de Barcelona y Huelva son las plantas que más aportan a la red de gas española. En 2021 se descargaron un total de 254 buques cargados de GNL, donde en Barcelona se descargaron 47. En los últimos años ha subido la demanda española de gas natural licuado, aun así, desde 2012 hay una alta carga de descarga de buques.

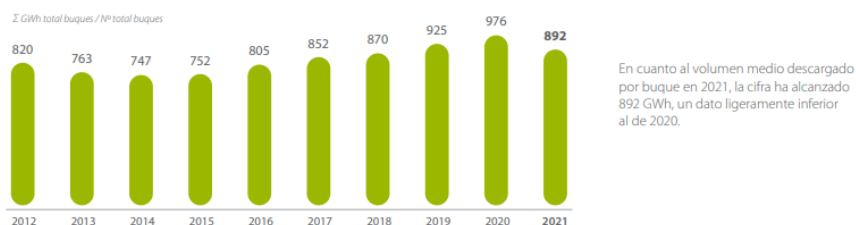
Descargas por orígenes y plantas de regasificación

Nº descargas	Argelia	Nigeria	Bélgica	EE.UU.	Noruega	Perú	Qatar	T&T	Francia	Angola	Rusia	Egipto	Argentina	Guinea Ecuatorial	Papúa Nueva Guinea	Australia	España	Total	Tamaño medio descargado (GWh)
Barcelona	6	5	-	11	-	-	18	2	-	3	-	-	-	-	1	-	-	47	817
Huelva	3	23	-	20	-	-	-	2	1	1	1	-	-	1	-	-	-	52	953
Cartagena	10	13	-	6	-	-	8	3	-	-	-	2	-	1	-	1	-	44	838
Bilbao	-	3	-	12	-	-	2	5	-	-	21	-	-	5	-	-	1	49	982
Sagunto	19	3	-	9	-	1	2	1	-	-	1	1	-	1	-	-	-	38	753
Mugardos	-	4	-	6	-	-	-	2	-	-	10	1	-	1	-	-	-	24	1.042
Total	38	51	-	64	-	1	30	15	1	4	33	4	-	9	1	2	1	254	898
Tamaño medio descargado (GWh)	616	950	-	925	-	865	872	865	1.059	1.031	1.077	976	-	987	168	421	926	898	

Ilustración 1.11: Tabla de descargas por orígenes y plantas de regasificación



Evolución del volumen medio: GNL descargado



Evolución del número de buques descargados

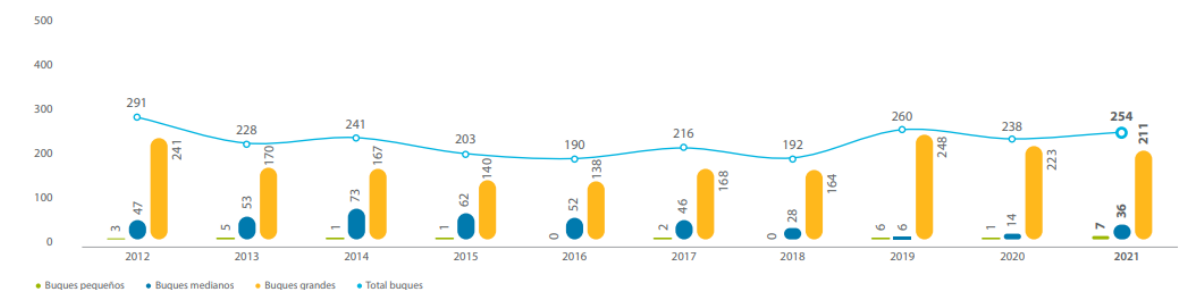


Ilustración 1.12: Gráfico de descarga de buques en los últimos años

1.5. Enfoque del estudio

Una vez tenemos información necesaria sobre nuestro campo de estudio, en este caso el gas natural, seremos capaces de entender la importancia de este en nuestra sociedad.

A partir de la investigación y datos de los apartados anteriores nos damos cuenta de la importancia específica del gas natural licuado (GNL), aparte de ser una forma más económica y práctica de transportar el gas, en España dependemos de este producto para una utilización habitual del gas en nuestras vidas. Es por eso que en este estudio nos centraremos en la producción de GNL.

Nos centraremos en una profundización teórica de los ciclos de refrigeración que siguen estos procesos de licuación de gases. Trataremos distintos métodos con los cuales se llevan acabo y evaluaremos las diferencias entre ellos.

Para la finalización del trabajo escogeremos uno de los métodos teorizados ya aplicado a una planta real y realizaremos un análisis del funcionamiento del proceso utilizado y los sistemas que esta planta utiliza para el tratamiento del GN para convertirlo en GNL y en otros recursos aprovechables por la población.

Con esto seremos capaces de discernir costes y dificultades de la producción de GNL pudiendo así encontrar soluciones y mejoras a las formas de producción actuales y así en un futuro con el avance de las tecnologías estar preparados para la optimización de estos métodos que tan importantes son en nuestra comunidad.

2. Estudio procesos y tecnologías de licuación

2.1 Refrigeración

2.1.1 Fundamentos de la termodinámica

Para entender bien los conceptos y procesos que se describirán a lo largo del estudio será necesario una descripción básica de los fundamentos en los que se basan las técnicas que se analizarán más adelante.

Para empezar a entender la refrigeración repasaremos la idea de termodinámica y como es en general la base de todo. La termodinámica es el estudio de la fuerza (dinámico) del calor (termo), hoy en día en general es el estudio de la energía de procesos, sistemas y relaciones de las propiedades de la materia. El desarrollo técnico de este campo empezó a partir del siglo XIX, donde los avances de la rama de la física que es la termodinámica fueron destinados a la mejora de la vida para el ser humano.

Para empezar a hablar de termodinámica deberemos centrarnos en la definición de sistema. Este lo definiremos como el lugar o espacio donde estudiaremos la transferencias y procesos de transformación de energía que encontramos y su comportamiento con el entorno, según sea nuestro sistema a estudiar tendremos que considerar o no distintas causas que podrían afectar a nuestro balance energético del sistema. El concepto de balance de energía lo utilizaremos como parte fundamental de la termodinámica, ya que será nuestra forma de conocer los cambios en los distintos procesos. Definiremos como entorno cualquier cosa externa a nuestro sistema elegido delimitado por una frontera.

Se pueden distinguir dos tipos básicos de sistemas: el sistema cerrado y los volúmenes de control. El sistema cerrado implica que no hay transferencia de materia a través de la frontera, consiste en una cantidad de materia fija; y un volumen de control o sistema abierto, es un espacio donde puede fluir la masa.

Dependiendo del campo u objeto a estudiar consideraremos distintos tipos de sistemas según las definiciones dadas. Cada uno deberá ser tratado de la forma correspondiente. Para estudiar un sistema será necesario conocer las propiedades y como se relacionan entre sí. Estas propiedades son macroscópicas como la presión,

la masa, energía, etc. Algunas de estas son relación de otras propiedades más básicas.

Primer principio de la termodinámica

La energía es un concepto básico y fundamental en la termodinámica y es muy importante su análisis, por lo tanto, aplicar el principio de conservación de la energía será esencial para describir la energía de nuestro sistema.

Debemos estar familiarizados con el concepto de trabajo, ya que afectará a nuestro sistema. Ser conscientes de lo que genera trabajo y de la forma que lo hace, desde el trabajo mecánico producido por el movimiento de un cuerpo hasta el trabajo eléctrico que se produce en una corriente eléctrica.

También deberemos de entender la importancia de un proceso adiabático, un proceso en el cual cambia su estado manteniendo la energía, por lo tanto, sólo importa el inicio y el final, a su vez hay procesos no adiabáticos en los cuales hay trabajos y calores a lo largo del proceso que se añaden o se ceden.

Sabiendo esto, el primer principio de la termodinámica no es más que el análisis energético del sistema, conociendo como se comporta la materia en cada una de sus fases. Si analizamos un sistema donde hay un cambio de energía más un trabajo y un calor aportado tendremos

$$Q = (E_2 - E_1) + W$$

Ese incremento de energía entre el estado 1 y el 2 será la suma de la energía de la materia, es decir, su energía cinética (E_c), potencial (E_p) y energía interna (U).

En la mayoría de casos a estudiar, la energía cinética y potencial no se tendrá en cuenta, por lo tanto escribiremos el primer principio de un sistema cerrado de la siguiente forma:

$$Q = (U_2 - U_1) + W \rightarrow Q = \Delta U + W$$

A partir de esta expresión seremos capaces de estudiar la energía en los sistemas que nos interesen. Para nuestros intereses en refrigeración deberemos reescribir el primer principio con otras propiedades tales que la entalpía (h) (kJ/kg) y la forma de expresar el trabajo que realizará la materia en la mayoría de casos, siendo una variación de presión y volumen que indicaremos de la siguiente forma:

$$W = \int P dv$$

Sabiendo esto podemos expresar el primer principio de distintas formas según nos convenga.

$$h = u + W$$

$$dh = du + v dP + P dv \rightarrow du = dh - v dP - P dv$$

$$Q = \Delta U + W \rightarrow \text{en formato diferencial} \rightarrow dQ = du + P dv$$

$$\text{Primer principio} \rightarrow \begin{cases} Q = \Delta h - \int v dP \\ Q = \Delta u + \int P dv \end{cases}$$

Segundo principio de la termodinámica

El segundo principio resulta algo más difícil de entender puesto que se introducen nuevos términos para su descripción. Como sabemos, no es posible enviar calor de un foco frío a uno caliente sin tener que aportar energía de por medio. En un ciclo, los procesos que se llevan a cabo no son ideales, es decir, sus procesos no son reversibles, no puedes pasar a un estado sin pérdidas, sería como pagar un peaje por decirlo así. No siempre consideramos procesos irreversibles, hay casos específicos que consideramos procesos reversibles por el hecho de simplificar nuestros cálculos, sabiendo que no difiere mucho de la realidad.

Todo esto lo caracterizamos a través de un nuevo termino, la entropía (S), esto nos define el desorden desde un estado de referencia, un diferencial de entropía entre

dos estados nos concreta el desorden que se ha producido en la transformación estudiada.

El desorden, para entenderlo mejor, es el porcentaje de energía que se perderá con respecto al ambiente en el proceso. Matemáticamente hablaremos de entropía con la siguiente expresión.

$$\Delta S = \int \frac{dQ}{T}$$

Sabiendo lo que es la entropía podemos enunciar el segundo principio de la termodinámica, el cual nos dice:

$$\Delta S_{universo} = \Delta S_{sistema} - \Delta S_{alrededores} \geq 0$$

Esto significa que la entropía del universo siempre crece o se mantiene (en procesos reversibles). La entropía del universo no es más que un análisis global de todos los procesos al mismo tiempo. En nuestro caso simplemente aplicaremos este concepto a nuestro proceso de refrigeración de gas natural. Así podremos analizar en profundidad nuestro sistema y entenderlo, y como consecuente mejorarlo.

2.1.2 Teoría de la refrigeración

La refrigeración consistirá básicamente en enfriar, es decir, reducir la temperatura de una sustancia, en nuestro caso el gas natural. Para conseguir que nuestra materia ceda calor, que la transferencia de calor sea negativa, necesitamos una segunda materia a más temperatura que lo reciba, para quitar calor y energía requerimos un receptor hacia donde el calor fluirá.

Teniendo en cuenta este principio, podemos aplicarlo a un ciclo y hacer las diferentes modificaciones necesarias para que esto funcione. Partiremos del ciclo de Carnot, el cual es el ciclo ideal de máximo rendimiento.

El ciclo de Carnot es un ciclo en el cual todas sus transformaciones son equivalentes, y está propuesto para obtener energía transmitiendo calor del foco caliente al foco frío. Sin embargo, esto no es lo que nos interesa, nosotros

necesitamos que la transferencia vaya del foco frío al caliente, a esto lo llamaremos ciclo de Carnot inverso.

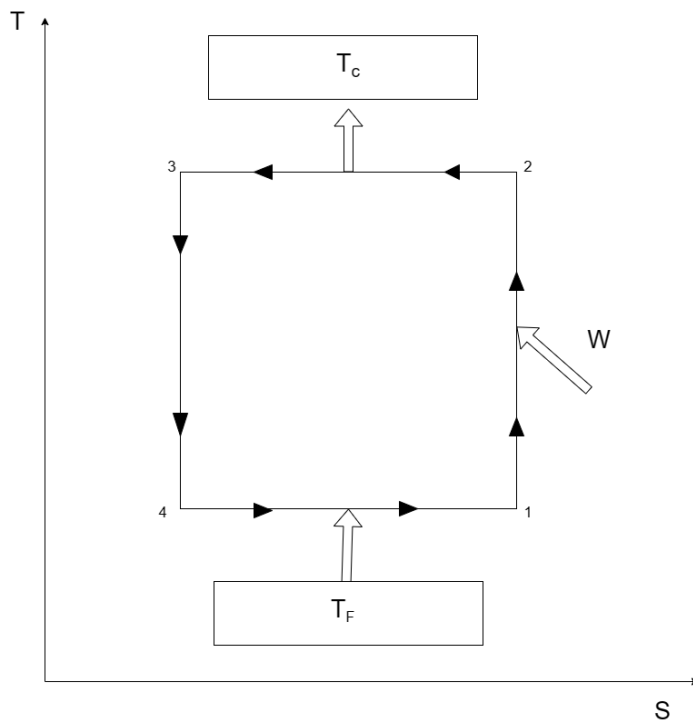


Ilustración 2.13: Ciclo de Carnot inverso.

El proceso de 1 a 2: absorberá energía del foco frío (T_f), esto sucede ya que lo que circula por el ciclo estará a menor temperatura que el foco frío.

De 2 a 3: se le aporta energía al ciclo para conseguir las propiedades del punto 3

De 3 a 4: se cede calor al foco caliente (T_c) con el mismo principio de transmisión de calor equivalente al intercambio de 1 a 2.

De 4 a 1: reducimos la energía del estado 4 produciendo trabajo equivalente al trabajo de 2 a 1.

Esto sería en el caso de máximo rendimiento, es decir, aquí todos los procesos son reversibles. Esto no se cumple en la vida real, pero es nuestro ejemplo a seguir. Debemos intentar replicar este ciclo para alcanzar el máximo rendimiento.

En casos de ciclos de refrigeración reales representaremos el ciclo sobre la campana de cambio de estado del fluido de intercambio/refrigerante usado. La representación más común es de presión (P) sobre la entalpía (h).

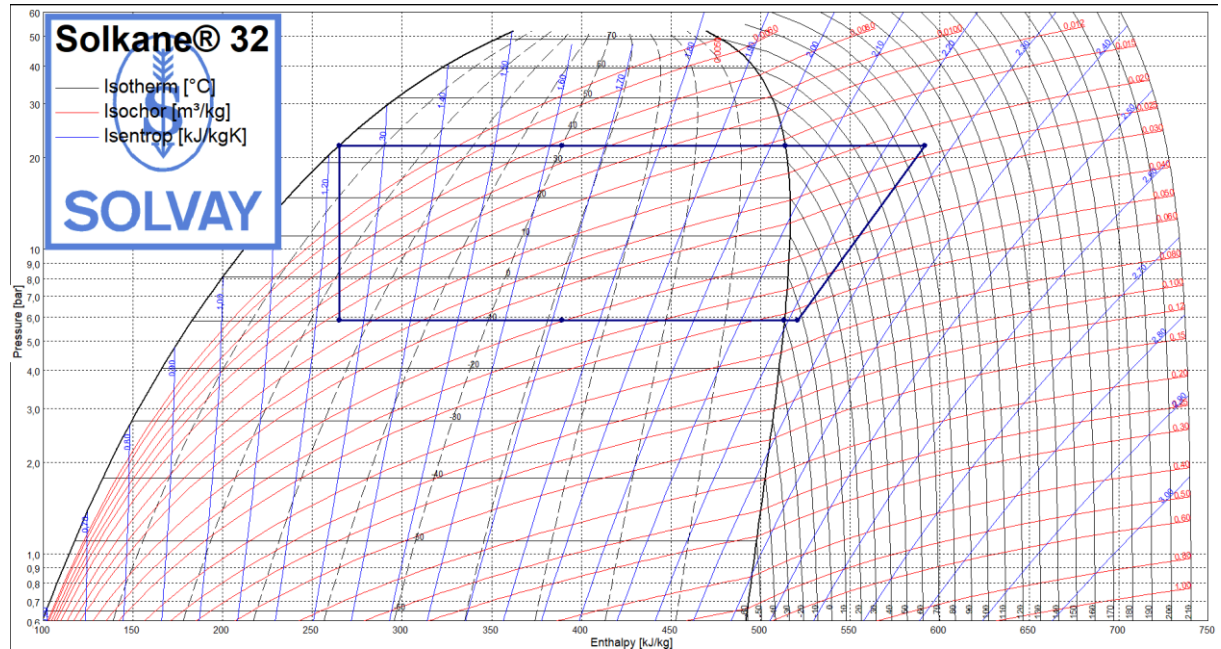


Ilustración 2.14: Ciclo de refrigeración sobre curvas de estado de un refrigerante.

El ciclo mostrado es un ciclo básico, en cual se distingue una compresión en vapor recalentado, la parte de la derecha del gráfico, dos cambios de estado, de vapor a líquido (condensación) y de líquido a vapor (evaporación) principales procesos de intercambio de calor. Y por último una estrangulación del líquido saturado a entalpía constante.

Siguiendo estas transformaciones somos capaces de extraer calor del sistema que queramos a través del intercambio en el evaporador.

En ciclos de refrigeración no se habla del rendimiento como tal, si no que hablamos de eficiencia, esto es por que nos fijamos en procesos distintos a la hora de hacer balance de rendimiento. En un ciclo de generador de potencia comparamos la energía que sacamos en la turbina con la aportada al ciclo a través de un calentador, sin embargo, para refrigeración hay distintos puntos de comparación.

El COP (coeficiente de rendimiento): Indica en porcentaje la capacidad calorífica del condensador con respecto al proceso de compresión que realizamos.

$$COP = \frac{W_{condensador}}{W_{compresor}}$$

El EER (factor de eficiencia energética): Indica en porcentaje la capacidad frigorífica del evaporador con respecto a la compresión que realizamos.

$$EER = \frac{W_{evaporador}}{W_{compresor}}$$

El factor en el cual nos fijaremos para nuestros ciclos será el EER ya que nos compara la capacidad de absorción de calor de nuestro evaporador en comparación de la energía que suministramos al compresor. Este factor puede ser mayor que 1, no tiene porque estar en tanto por uno.

Se pueden relacionar estos dos coeficientes de la siguiente manera:

$$COP = 1 + EER$$

El EER será mayor siempre que el COP, se debe a que el ciclo actúa mejor para refrigerar que para calentar debido a que el “producto malgastado” de la compresión es calor el cual afecta al trabajo del condensador y no al del evaporador.

2.1.3 Ciclos de refrigeración

Cuando ya sabemos las distintas transformaciones necesarias para extraer calor podemos empezar a diseñar distintas maneras de hacerlo según nos convenga y también buscando la fórmula para obtener máximo rendimiento.

Debemos conocer el equipo del que disponemos para hacer posible estas transformaciones y llevar a cabo nuestro diseño. En un ciclo básico de refrigeración son necesarios 4 componentes esenciales.

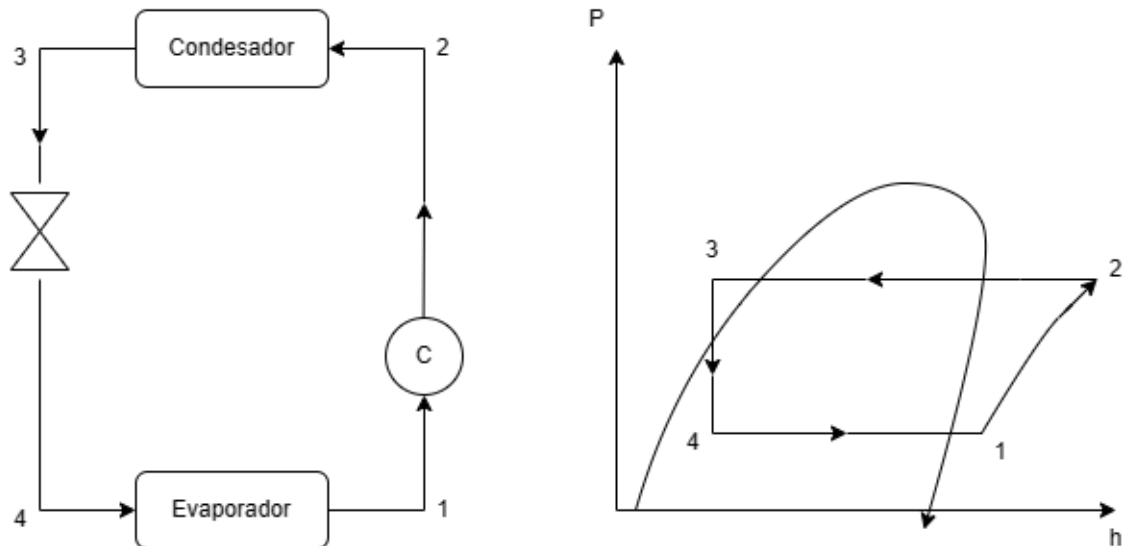


Ilustración 2.15: Esquema de instalación de refrigeración

2.1.3.1 Elementos del ciclo

COMPRESOR: Es el aparato utilizado para elevar la presión de nuestra sustancia/fluido refrigerante. En nuestro ciclo el compresor aumentará la presión desde el punto de salida del evaporador.

Funciona principalmente con la materia en estado de gas. Según el principio que use el compresor para elevar la presión se distinguen en varios tipos. Los dos grandes grupos son volumétricos y dinámicos

-**Volumétricos:** basa el proceso de compresión en reducir el volumen del gas o vapor que ocupa el recipiente. Este proceso reduce casi a cero las pérdidas residuales por fricción $W_r = 0$, pero la pérdida de calor no es nula $Q \neq 0$

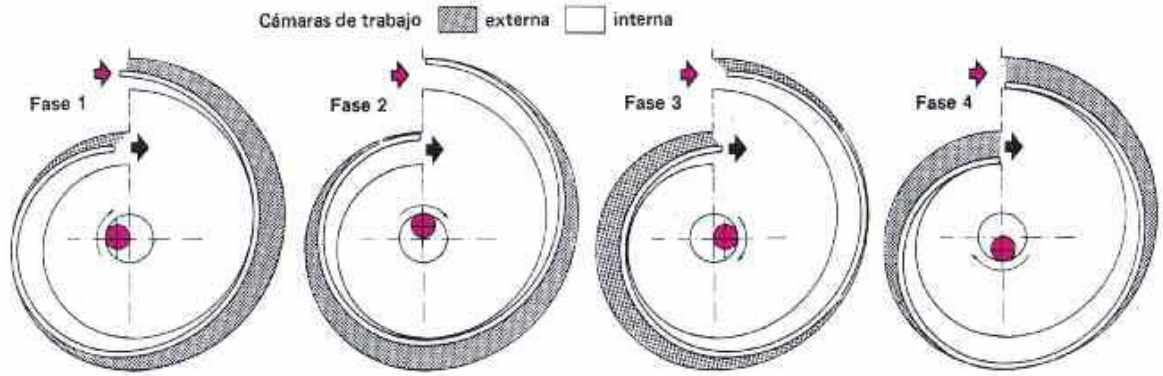


Ilustración 2.16: Esquema de compresor Scroll.

-**Dinámicos**: también llamados turbocompresores, estos usan la variación del momento cinético del flujo constante para cambiar las características del gas, en este caso aumentar la presión.

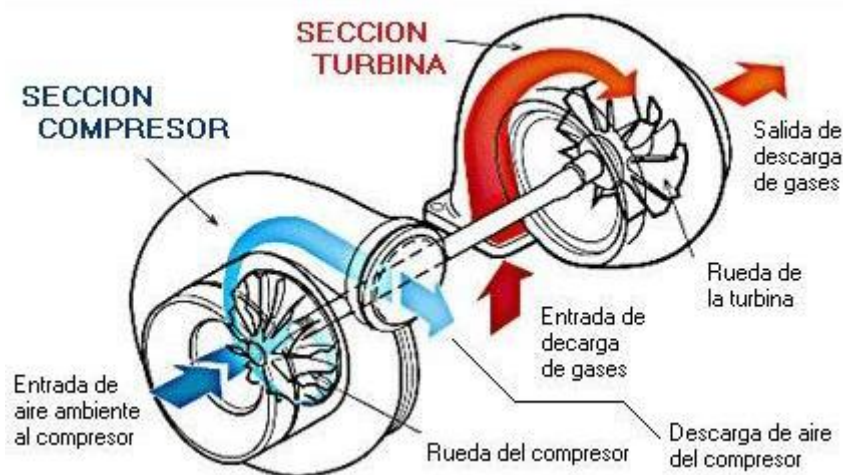


Ilustración 2.17: Esquema de turbocompresor con turbina.

Según la relación de presiones $r = P_2/P_1$ y el caudal Q (m^3/s) que necesitemos en nuestro sistema escogeremos un tipo u otro. En el siguiente gráfico se ve los intervalos de funcionamiento de cada tipo.

				Q (m ³ / min)	r = p ₂ / p ₁
COMPRESORES	VOLUMÉTRICOS	Alternativos	Bombas vacío	0 a 100	1 a 50
			Compresores	0 a 500	2,5 a 1000
		Rotativos	Bombas vacío	0 a 100	1 a 50
			Soplantes	0 a 500	1,1 a 1,5
			Compresores	0 a 500	1,5 a 12
	DINÁMICOS	Centrifugos	Ventiladores	0 a 6000	1 a 1,15
			Soplantes	0 a 5000	1,15 a 3
			Compresores	100 a 4000	3 a 20
		Axiales	Ventiladores	50 a 10000	1 a 1,04
			Compresores	100 a 15000	2 a 20

Ilustración 2.18: Tablas de selección según relaciones de presión y caudal.

En el caso de refrigeración, el campo de trabajo dependerá del ciclo que tendremos que llevar a cabo y el refrigerante utilizado ya que estos marcarán los límites de la relación de presión, es decir la presión a la que opera el condensador.

CONDENSADOR: Componente encargado de licuar nuestro refrigerante, el cual, es aspirado de la salida del compresor. El lugar donde se produce la reducción de calor del sistema, sumidero final de la energía introducida en el sistema, por lo que la transferencia en el condensador será siempre mayor a la del evaporador, por una diferencia igual al trabajo de compresión.

En resumen, es un intercambiador de calor dedicado a enfriar el refrigerante a la salida del compresor. El enfriamiento del refrigerante incluye un cambio de fase, de gas a líquido, por lo que podemos diferenciar tres fases en un condensador, enfriamiento hasta saturación, cambio de fase y subenfriamiento.

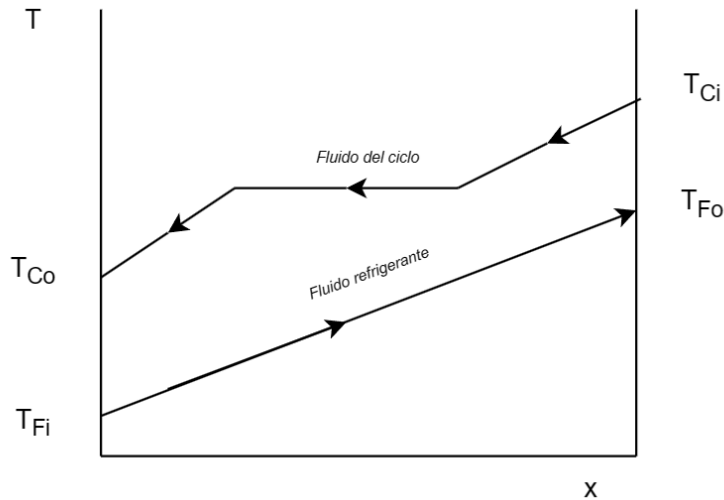
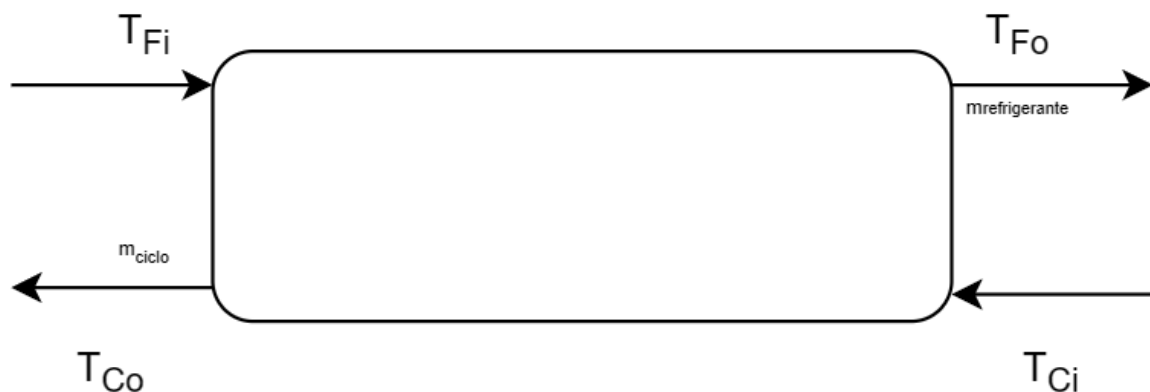


Ilustración 2.19: Diagrama de fase de un intercambiador/condensador.

Los principios de los cálculos para el diseño de condensadores, son los mismos que los intercambiadores. Se realiza un balance de energía sobre el volumen de control que ocupa el intercambiador, y simplemente se desarrolla en función de la energía y la masa.

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



Haciendo el balance $\rightarrow$

$$\dot{Q} \text{ (kW)} = \dot{m}_{ref} C_{p,ref} (T_{Fo} - T_{Fi}) = \dot{m}_{ciclo} C_{p,ciclo} (T_{Co} - T_{Ci})$$

Ademas necesitamos conocer la capacidad de transferencia de calor del material y los fluidos para caraterizar bien el condensador.

$$Q = U A \Delta T_{ml}$$

$$\frac{1}{U_{ext} A_{ext}} = \frac{1}{h_{ext} A_{ext}} + \frac{e}{k} + \frac{1}{h_{int} A_{int}}$$

siendo:

$$U = \text{coeficiente global de transmisión de calor} \left(\frac{W}{m^2 K} \right)$$

$$h = \text{coeficiente de convección} \left(\frac{W}{m^2 K} \right)$$

$$k = \text{Conductividad térmica del material} \left(\frac{W}{m K} \right)$$

$$e = \text{espesor del material (m)} \quad A = \text{Área (m}^2\text{)}$$

Con estas formulas somos capaces de diseñar el condensador según las especificaciones, y dependiendo del diseño podemos elegir el tipo que se nos adaptara mejor.

La clasificación de los tipos de condensadores se hará respecto a la proporción de calor intercambiado o respecto al medio refrigerante utilizado.

Según el primer criterio ordenamos de la siguiente forma:

- **De calor sensible:**

a) De aire:

1. Circulación natural
2. Circulación forzada

b) De agua:

1. De inmersión
2. De doble tubo a contracorriente
3. Multi tubulares

- **De calor latente:**

a) Atmosféricos

1. Multitubulares verticales

2. De lluvia
3. De lluvia a contracorriente

b) De evaporación forzada

1. Condensadores evaporativos

Según el otro criterio más simple, diferenciamos de la siguiente manera.

- **Condensadores enfriados por agua**
- **Condensadores enfriados por aire**
- **Condensadores enfriados por evaporativos (mezcla de ambas)**

No nos extenderemos mucho en la diferenciación de estos puesto que cada uno es un mundo y el principio de todos ellos es el mismo.

Erigiremos nuestro condensador en función de la necesidad de enfriamiento que requiera nuestro líquido refrigerante que sale del compresor.

EVAPORADOR: Intercambiador de calor en el cual se vaporiza un refrigerante con intención de eliminar calor de un sistema. El equipo encargado de producir frío en la instalación, su misión es absorber calor del sistema para evaporar el refrigerante que proviene de la válvula de expansión.

El funcionamiento de este se basa en las mismas premisas que el condensador, solo que trabaja en presiones más bajas y con menos temperatura, factores importantes a tener en cuenta a la hora del diseño. A diferencia con el condensador, sigue un diagrama de fases distinto, ya que este solo consta de 2 fases, el cambio de estado y el sobrecalentamiento al refrigerante.

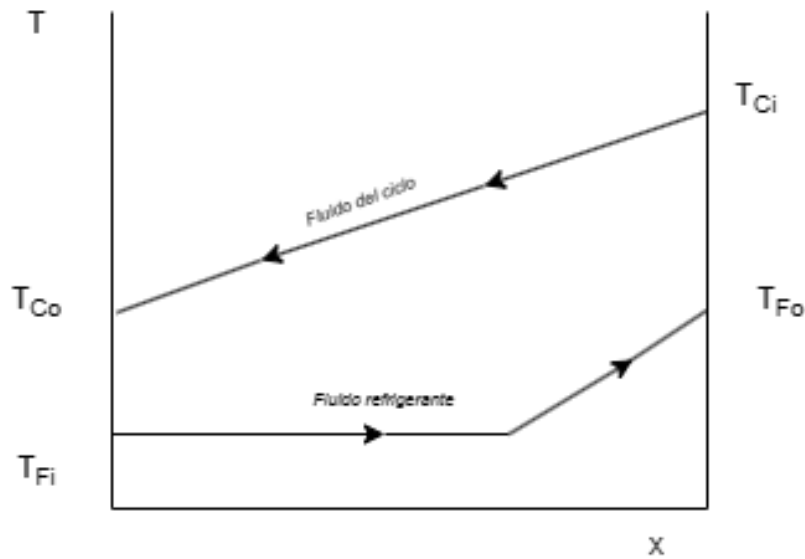


Ilustración 2.20: Diagrama de fases evaporador

Por sus extensas aplicaciones los evaporadores se clasifican según varios criterios:

- **Método de alimentación del refrigerante**
 1. Evaporador de expansión seca
 2. Evaporador inundado
- **Tipo de construcción**
 1. Evaporadores de tubos lisos
 2. Evaporadores de placas
 3. Evaporadores de superficie ampliada o con aletas
- **Procedimiento de circulación del aire**
 1. Evaporadores de convección natural
 2. Evaporadores de convección forzada

ELEMENTOS DE REGULACIÓN Y CAPACIDAD: Elementos en los que se incluyen la válvula de expansión, los cuales sirven y tienen como función establecer y controlar propiedades del refrigerante para adaptarlo a las condiciones óptimas de trabajo de los elementos principales descritos antes.

Las válvulas son elementos de control por excelencia y necesarias para adaptar el flujo de salida del condensador a la entrada del evaporador. Hay distintos tipos de válvulas según sus accionamientos o construcción, aun así esta tienen todas la misma función, regular el caudal de flujo de refrigerante para hacer la velocidad de este compatible con el evaporador, y mantener la diferencia de presiones entre condensador y evaporador y que estos trabajen en condiciones óptimas.

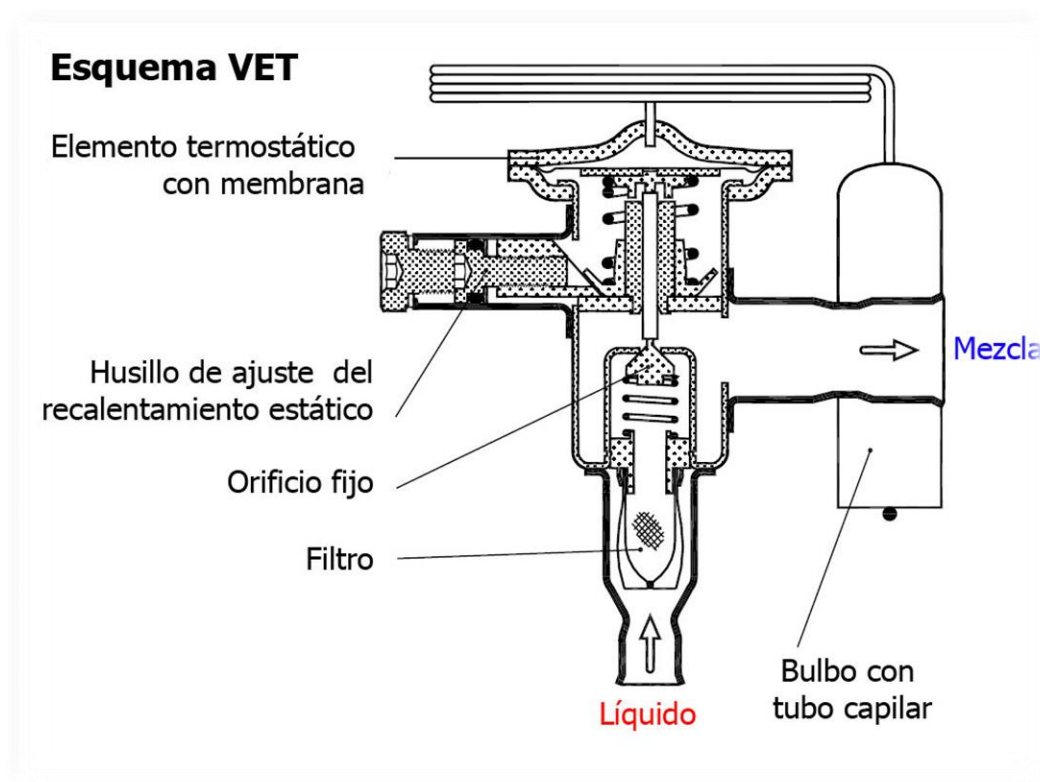


Ilustración 2.21: Esquema de válvula de expansión.

Aparte de las válvulas hay muchos dispositivos que ayudan al control y mejora de los ciclos, algunos de ellos nos los encontraremos en distintos ciclos que usemos y se explicará su función en esos casos específicos. Algunos ejemplos son:

- Bombas de circulación
- Separación de líquido
- Deposito de líquido
- Purgadores de aire

Gracias a estos elementos somos capaces de constituir ciclos de distinto carácter según nuestra necesidad. Para volver al tema que nos ocupa, nos centramos en el enfriamiento del gas natural. Extraer calor de esta materia se realiza siguiendo los mismos procesos que hemos descrito para una refrigeración ordinaria, sin embargo, el propósito de enfriar el gas natural, es cambiarlo de fase. Es decir, tener gas natural en estado líquido. Para ello tienes que enfriar el gas natural hasta temperaturas de $-161\text{ }^{\circ}\text{C}$, lo cual requiere que repasemos los métodos básicos de refrigeración para conseguir este tipo de temperaturas. Esto pertenece a un subcampo de estudio de la refrigeración, la criogenia.

2.2. Criogenia

La criogenia es la rama de la física que estudia los métodos de obtener temperaturas muy bajas y las maneras de controlarlas. Esta tecnología es hoy en día usada en diferentes áreas, desde la congelación de comida hasta avances científicos. Unos de los primeros experimentos realizados en este campo de criogenia fueron llevados a cabo por Michael Faraday en 1825, quien usó refrigerantes para licuar CO_2 y NH_3 , sin embargo, con su método no consiguió licuar el oxígeno, el hidrogeno o el nitrógeno. No fue hasta que llego Thomas Andrews en 1860, que se descubrió las temperaturas críticas de algunos elementos, a partir de estos avances distintos científicos han ido aportando innovaciones a este campo haciendo avanzar el campo de estudio de esta rama de la física. Cabe destacar el nombre del Linde, Joule y Thomson, los cuales hicieron grandes aportaciones en este campo, siendo Linde quien instalado la primera planta de licuación de aire y Joule y Thomson quienes descubrieron distintos procesos de expansión. En la continuación de la historia se fueron cada vez alcanzando temperaturas más bajas, a día de hoy usando la combinación del método de Dilution Refrigerator junto con la refrigeración nuclear

usando superconductores magnéticos se han alcanzado temperaturas en metales de alrededor de $1\ \mu K$.

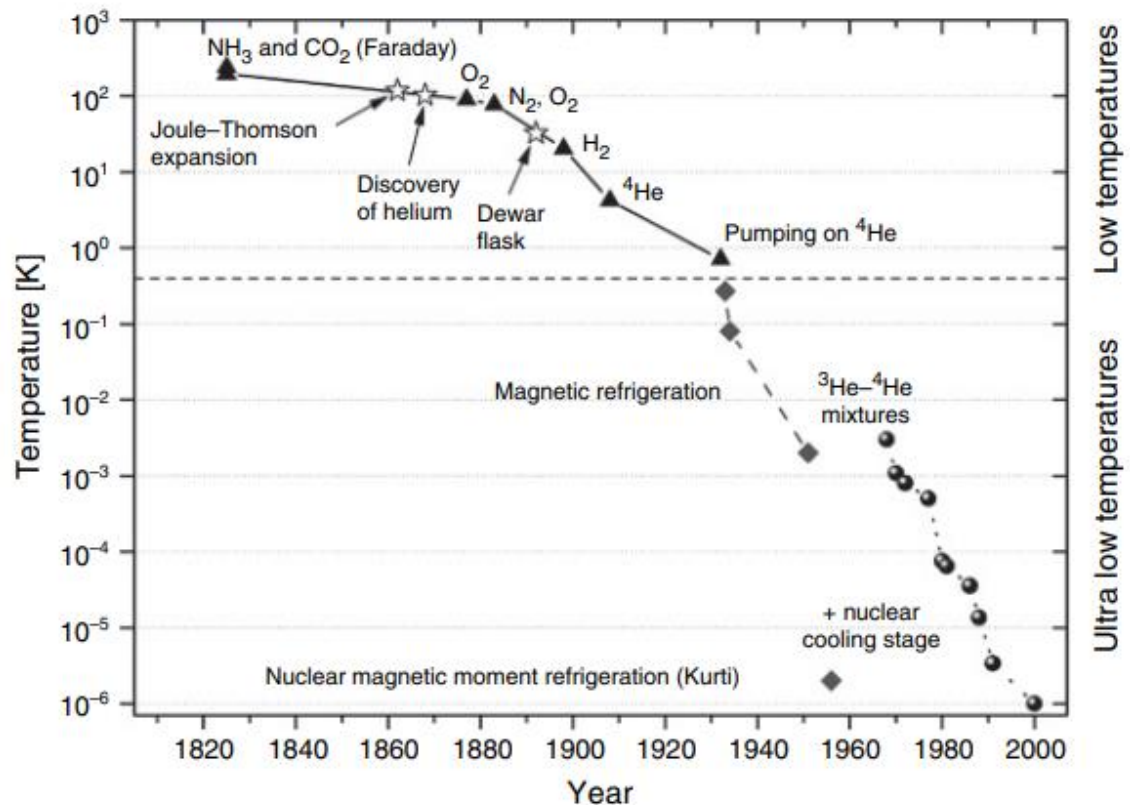


Ilustración 2.22: Desarrollo histórico de la criogenia

2.2.1. Propiedades de materiales a bajas temperaturas

Se puede afirmar que cuando se trabaja bajo condiciones de temperatura extrema, los materiales normalmente usados no son factibles o se deben de usar teniendo este factor en cuenta. Principalmente esto afectara a los elementos encargados de producir la potencia frigorífica necesaria.

En concreto deberemos de hablar de los materiales utilizados en los intercambiadores de calor, y materiales que mantengan la resistencia suficiente para soportar presiones en temperaturas bajas.

Describiremos cuatro propiedades a la hora del diseño de elementos en bajas temperaturas. Tendremos que considerar la conductividad térmica, la dilatación térmica, el calor específico y la superconductividad de los metales

2.2.1.1. Calor específico

El calor específico (C_p en presión cte o C_v en volumen cte) es la cantidad de calor necesaria para incrementar la temperatura en un grado de una cantidad.

$$C_v = \frac{1}{n} \left(\frac{dQ}{dT} \right)_v \quad C_p = \frac{1}{n} \left(\frac{dQ}{dT} \right)_p$$

Esta propiedad depende de la temperatura a la que este, sus valores se obtienen a través de modelos teóricos, en los cuales se estudia comportamientos en distintos campos para poder hacer un modelo consistente de como varia esta propiedad según la temperatura. Estos campos incluyen el magnetismo del material, la electricidad y la la red molecular de los materiales, con ellas somos capaces de intuir las variaciones de calores específicos.

Sabiendo las variaciones de calor específico en el elemento a estudiar sabremos como se comporta a la temperatura que trabajamos, podremos conocer la transferencia de calor/ energía necesaria para alcanzar la temperatura que nos interesa.

Specific heat c_p [J/g/K] of technical solids: various solids [56]; metals, alloy and non-metals [58]; metals [71]; polymers [47]

Material	25 K	50 K	75 K	100 K	150 K	200 K	293 K
<i>Metals</i>							
Al	0.0175	0.142	0.322	0.481	0.683	0.797	0.897
Cu	0.015	0.097	0.187	0.252	0.322	0.355	0.383
Fe	0.0080	0.051	0.136	0.216	0.324	0.384	0.444
Nb	0.020	0.085	0.147	0.188	0.230	0.248	0.262
Ni	0.0098	0.069	0.156	0.232	0.329	0.383	0.435
Si	0.0085	0.078	0.170	0.260	0.425	0.557	0.694
Ti	0.0137	0.098	0.210	0.300	0.408	0.466	0.518
W	0.0041	0.032	0.064	0.087	0.112	0.123	0.133
<i>Alloys</i>							
Al2024	—	—	—	0.46	0.65	0.73	0.84
CuZn (65/35)	0.022	0.118	0.21	0.27	0.33	0.36	0.377
Constantan	0.013	0.08	0.17	0.24	0.32	0.36	0.41
Inconel 718	—	0.07	0.16	0.27	0.36	0.40	0.43
Nb-38Ti	0.03	0.11	0.24	—	—	—	—
SnPb (50/50)	0.062	0.116	0.140	0.152	0.163	0.170	0.178
S.S. 304/316	0.019	0.092	0.19	0.28	0.35	0.42	0.47
Ti-6Al-4V	—	—	0.21	—	0.40	0.49	0.55
<i>Non-metals</i>							
Sapphire	0.0014	0.0148	0.0558	0.126	0.313	0.501	0.763
MgO	0.0019	0.0207	0.085	0.195	0.0449	0.661	0.916
Pyrex	0.043	—	—	0.28	0.406	0.533	0.72
Silica	0.038	0.111	0.188	0.268	0.420	0.546	0.728
ZrO ₂	0.009	0.041	0.095	0.15	0.26	0.35	0.45
<i>Polymers</i>							
Epoxy	0.13	0.27	0.39	0.48	—	1.0	1.3
G10 (GFRP)	—	0.3	0.4	0.5	—	1.0	1.5
Nylon 6	—	—	0.47	—	0.81	1.01	1.5
Stycast	0.032	0.088	0.15	0.22	—	—	—
Teflon	0.10	0.21	0.29	0.39	0.56	0.72	1.0

Ilustración 2.23: Tabla de Calor específico (Cp) de distintos materiales para bajas temperaturas

2.2.1.2. Conductividad Térmica (k)

Propiedad que mide la capacidad de transporte de calor de un material, es decir que resistencia impone el material en la transferencia de calor a través del mismo. Las magnitudes de esta propiedad vendrán dadas por comportamientos moleculares de los elementos.

$$k = \frac{1}{3} \frac{c}{V_m} \cdot v \lambda$$

Donde, c es el calor específico, V_m es el volumen molar, v es la velocidad de las moléculas y λ es la distancia que puede recorrer la molécula sin colisionar. La conductividad será la suma de distintas combinaciones de transportadores de energía, es decir, la conductividad de protón a electrón, más la protón a protón, etc.

La mayor parte del calor es transportada por los electrones si son metales puros, sin embargo, en metales impuros, semiconductores y aleaciones, una proporción de la conductividad térmica depende de la red molecular, (intervienen los protones como portadores de calor).

Por ello en metales puros podremos trabajar con la siguiente expresión;

$$\frac{1}{k_e} = R_{ei} + R_{ep}$$

Donde R_{ei} a bajas temperaturas es la constante de resistencia térmica típica de los metales y R_{ep} será la resistencia producida por los protones. Para la dispersión de electrones $\lambda = cte$ y por lo tanto $R_{ei} \propto \frac{1}{c} \rightarrow R_{ei} = a/T$, respecto a R_{ep} , esta disminuye conforme la temperatura cae, ya que los protones disminuyen, con una aproximación de la solución de la ecuación de transporte de Boltzman nos dice que $R_{ep} = b \cdot T^2$

$$\frac{1}{k_e} = R_{ei} + R_{ep} = \frac{a}{T} + b \cdot T^2 \rightarrow k(T) = \frac{T}{(a + b \cdot T^3)}$$

Esta expresión responde a los materiales los cuales su transporte de calor sea principalmente por los electrones (metales puros, y algunas aleaciones).

Esta propiedad será la indicadora de la resistencia que opondrá nuestro material en temperaturas bajas para el intercambio de calor en un medio, por lo tanto, es muy importante a la hora del diseño de los componentes.

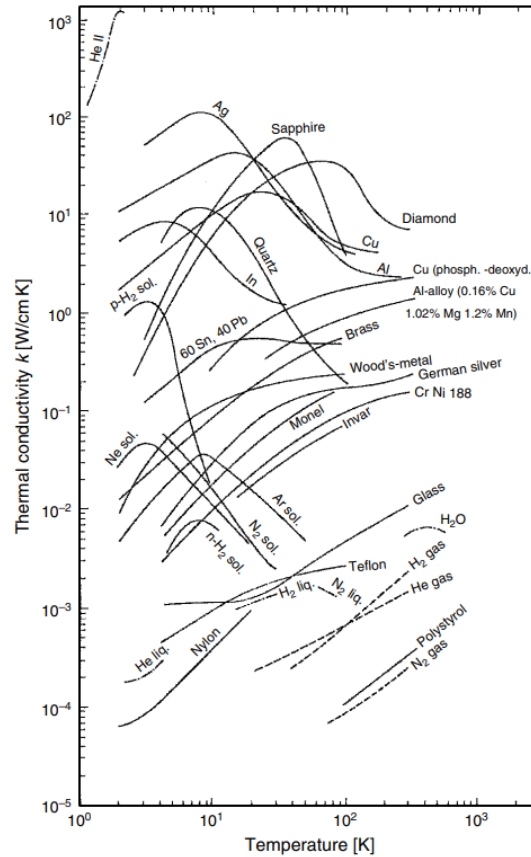


Ilustración 2.24: Conductividad térmica (k) para distintas temperaturas en varios elementos

2.2.1.3. Dilatación térmica (ΔL)

Variación de longitud superficie o volumen debido a un efecto de la temperatura, en este caso al trabajar en temperaturas bajas nuestros materiales se contraerán, habrá una disminución.

La magnitud de la variación viene dada por un coeficiente de dilatación térmica, para un material isótropo será

$$\alpha = \frac{1}{L} \left(\frac{dL}{dT} \right)$$

En caso volumétrico $\beta = 3\alpha$

Los materiales se dividen en 4 grupos

- Aleaciones comerciales y vidrios con un coeficiente muy pequeño
- Metales de intervalo de contracción 0.2-0.4% en intervalos de temperaturas de 300 K a 4 K
- Materiales orgánicos con 1-2% de contracción
- El resto, que incluye materiales compuestos como la fibra de carbono o el Kevlar que tiene un coeficiente ínfimo.

Linear thermal contraction $\Delta L/L$ (%) from 293 K, and α at 293 K (10^{-6} K^{-1}) [79,81–85]

Material	$\Delta L/L$ (%)						$\alpha(10^{-6} \text{ K}^{-1})$
	4 K	40 K	80 K	100 K	150 K	200 K	293 K
<i>Metals</i>							
Al	0.414	0.412	0.390	0.369	0.294	0.201	22.9
Cu	0.326	0.323	0.302	0.283	0.221	0.149	16.65
Fe	0.204	0.202	0.195	0.185	0.149	0.102	11.8
Ni	0.229	0.227	0.217	0.206	0.165	0.112	12.8
Si	0.022	0.022	0.023	0.024	0.024	0.019	2.56
Ti (pc)	0.151	0.150	0.142	0.134	0.107	0.073	8.6
W	0.088	0.087	0.081	0.076	0.059	0.040	4.42
<i>Alloys</i>							
Al2024	0.396	0.394	0.372	0.351	0.278	0.190	21.2
Al5083	0.415	0.413	0.390	0.368	0.294	0.201	22.8
Berylco 25	0.316	0.315	0.296	0.277	0.218	0.151	17.9
Brass (65/35)	0.384	0.380	0.350	0.326	0.253	0.169	19.6
Fe ₆₄ Ni ₃₆	0.045	0.048	0.048	0.045	0.030	0.020	~1
Hastelloy C	0.218	0.216	0.204	0.193	0.154	0.105	12.8
Inconel X	0.229	0.228	0.217	0.205	0.164	0.112	13.0
Nb-45Ti	0.188	0.184	0.167	0.156	0.117	0.078	≈10
Cu/NbTi	0.265	0.262	0.245	0.231	0.178	0.117	≈12
S.S. 304/316	0.296	0.296	0.278	0.260	0.203	0.138	15.8
S.S. 310	0.273	0.270	0.252	0.237	0.187	0.127	14.5
Ti-6Al-4V	0.173	0.171	0.162	0.154	0.118	0.078	8
<i>Non-metals</i>							
Sapphire ()	0.0715	0.0715	0.0705	0.069	0.061	0.045	5.80
Sapphire (⊥)	0.0605	0.0605	0.0595	0.0585	0.052	0.039	5.06
MgO	0.139	0.0139	0.137	0.133	0.114	0.083	10.3
Pyrex	0.056	0.057	0.054	0.050	0.0395	0.027	3.0
Silica	-0.0005	-0.0003	0.0001	0.0013	0.0030	0.0031	0.45
ZrO ₂ (stab)	0.131	0.130	0.124	0.118	0.098	0.068	8.0
YBCO-123(ab)	0.15	0.15	—	0.14	0.115	0.08	10
YBCO-123(c)	0.36	0.35	0.33	0.31	0.25	0.17	17
<i>Polymers</i>							
Torlon	0.448	0.434	0.387	0.358	0.279	0.191	~24
Araldite	1.06	1.02	0.935	0.88	0.71	0.505	~60
Nylon	1.39	1.35	1.25	1.17	0.95	0.67	~80
Stycast	0.44	0.43	0.40	0.38	0.32	0.225	30
Teflon	2.14	2.06	1.93	1.85	1.60	1.25	~200
G10 ()	0.705	0.69	0.64	0.60	0.49	0.35	~40
G10 (⊥)	0.24	0.235	0.21	0.20	0.155	0.11	~12

Ilustración 2.25: Tabla de dilatación lineal de materiales a distintas temperaturas

2.2.1.4. Metales superconductores

En estos metales se produce un efecto por el cual dos electrones están emparejados y no transportan calor por lo tanto solo los desparejados serán portadores. Esto implica un cambio en la conductividad térmica, que a baja temperatura estos materiales superconductores asemejan su conductividad a la de un aislante.

2.2.2. Procesos de criogenia

Para conseguir temperaturas bajas hasta un rango cerca de 1K son fácilmente obtenibles a través de enfriadores mecánicos aun así para obtener más potencia frigorífica somos capaces de meter en paralelo distintos refrigeradores, También con tecnologías como 'Dry dilution refrigerators' somos capaces de obtener estas temperaturas. Más simple es el uso de Criolíquidos siendo esto más baratos que las otras tecnologías.

En este apartado veremos las capacidades de los métodos de criogenia más usados y las aplicaciones que estos tienen.

2.2.2.1. Criolíquidos

Los criolíquidos son considerados la mejor forma de obtener bajas temperaturas ya que la mayoría de los equipos de laboratorio están adaptados para estos y no los nuevos medios, y por lo tanto hacer el cambio supondría un gran gasto.

Dependiendo del tipo de criolíquido usado, tendrán distintas propiedades, algunos líquidos usados son el helio, el oxígeno, el hidrógeno o el nitrógeno.

Uno de los más usado debido a que es inerte, sin color, sin olor, no corrosivo y no inflamable. Además, no reacciona con ningún elemento en condiciones ordinarias, es el Helio líquido. Dos isótopos estables usados en estos casos son el ^3He y ^4He los cuales se encuentran en la atmósfera con baja concentración.

Las formas de refrigerar a través de criolíquidos se basan simplemente en dar baños térmicos con estos elementos. Esta forma de criogenia es usada en laboratorios para investigaciones y para distintas aplicaciones químicas.

Estos elementos son también usados como fluido refrigerante para ciclos en enfriadores mecánicos, los cuales veremos a continuación. Las capacidades y propiedades de estos elementos los hacen idóneos para trabajar a bajas temperaturas y por tanto son los principales a la hora de criogenizar un medio.

Properties	³ He	⁴ He
Density ρ [g/cm ³] ($T = 0$ K)	0.0823	0.146
Boiling point T_b [K]	3.191	4.215
Critical temperature T_c [K]	3.324	5.20
Critical pressure p_c [bar]	1.165	2.289
Critical density ρ_c [g/cm ³]	0.0413	0.0693
Melting pressure p_m [bar] ($T = 0$ K)	34.39	25.36
Minimum melting pressure p_m [bar]	29.31	25.32
Maximum superfluid transition temperature T_c [K]	0.0025	2.177
Gas-to-liquid volume ratio (liquid at 1 K, gas at 300 K and 1 bar)	662	866
Classical molar volume V_m [cm ³ /mol] (at saturated vapour pressure and $T = 0$ K)	12	12
Molar volume V_m [cm ³ /mol] (at saturated vapour pressure and $T = 0$ K)	36.84	27.58

Ilustración 2.26: Propiedades del helio líquido

2.2.2.2. Refrigeración mecánica

Los crioenfriadores mecánicos basan su capacidad de licuar o enfriar en los procesos de compresión y expansión de los ciclos básicos, aquí destacan el proceso de los intercambiadores de calor y por lo tanto de la existencia de regeneradores para aumentar la eficiencia de estos.

Antes de entrar en los tipos de enfriadores debemos tener en cuenta el cambio de las propiedades de los componentes (intercambiadores, compresores ...). Ya que estos trabajarán a muy bajas temperaturas por lo tanto provoca un cambio en el diseño.

Hay distintos tipos de crioenfriadores que utilizan distintas técnicas y sus modificaciones, basadas en la compresión-expansión. A continuación, describiremos los tipos más destacables.

2.2.2.2.1. Intercambiadores en la criogenia

Antes de eso es necesario hablar sobre los intercambiadores de calor (evaporador o condensador) de nuestros sistemas. Es necesario analizar cómo cambia su comportamiento en bajas temperaturas. Hablaremos de los intercambiadores continuos los cuales nos permiten un uso en temperaturas hasta 1 K.

Para estos intercambiadores actuaremos con las propiedades de los fluidos a la temperatura que corresponda, y así definir la transferencia de calor (a través de coeficientes de convección en correlaciones), la pérdida de presión (a través de la fórmula de pérdida de carga), y la eficiencia. Estos parámetros cumplen con las ecuaciones tradicionales a bajas temperaturas, por lo que se calculan de la misma manera que en un intercambiador normal.

Lo que más varia es en la construcción, tendremos distintos tipos. El tipo Linde, tipo Hampson o en forma espiral, y los intercambiadores de placas, donde se encuentran los de placa fina y placa soldada.

El tipo Linde se basa en dos tubos concéntricos, son intercambiadores sencillos de calcular, el tubo interior usualmente llevará el vapor a presión alta y por la sección anular el de presión baja, puede tener distintas distribuciones a la hora de la colocación de los tubos.

Otro caso será el tipo Hampson el cual basa su intercambio en el tubo que contiene la mezcla a alta presión circula en espiral a través del tubo de baja presión.

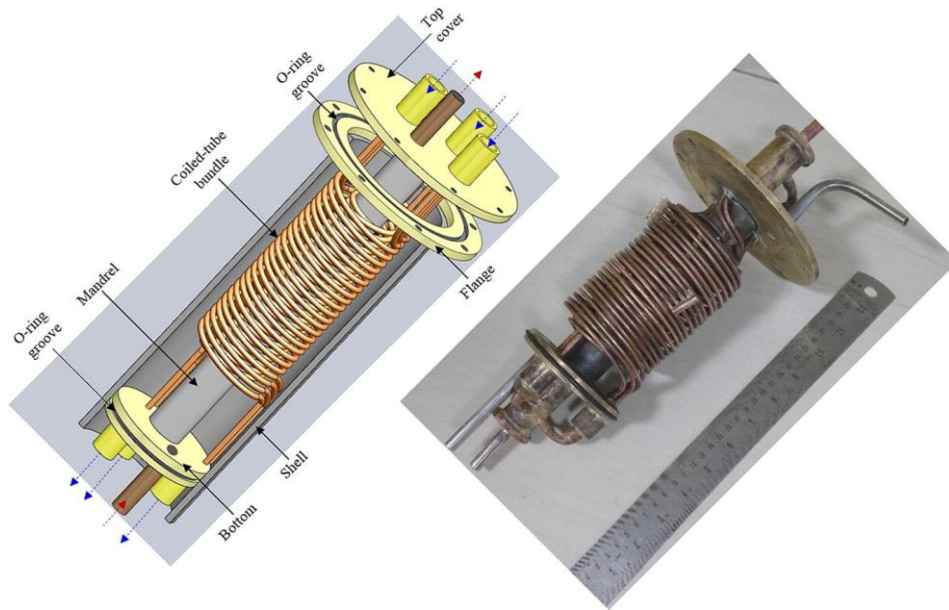


Ilustración 2.27: Intercambiador de calor tipo Hampson

Los intercambiadores de placas se definen por el uso de diferentes placas planas con una distribución paralela, a través de un circuito contracorriente de fluidos de intercambio, se procederá al intercambio a través de las placas, unas destinadas a llevar fluido caliente y otras destinadas a transportar fluido frío.

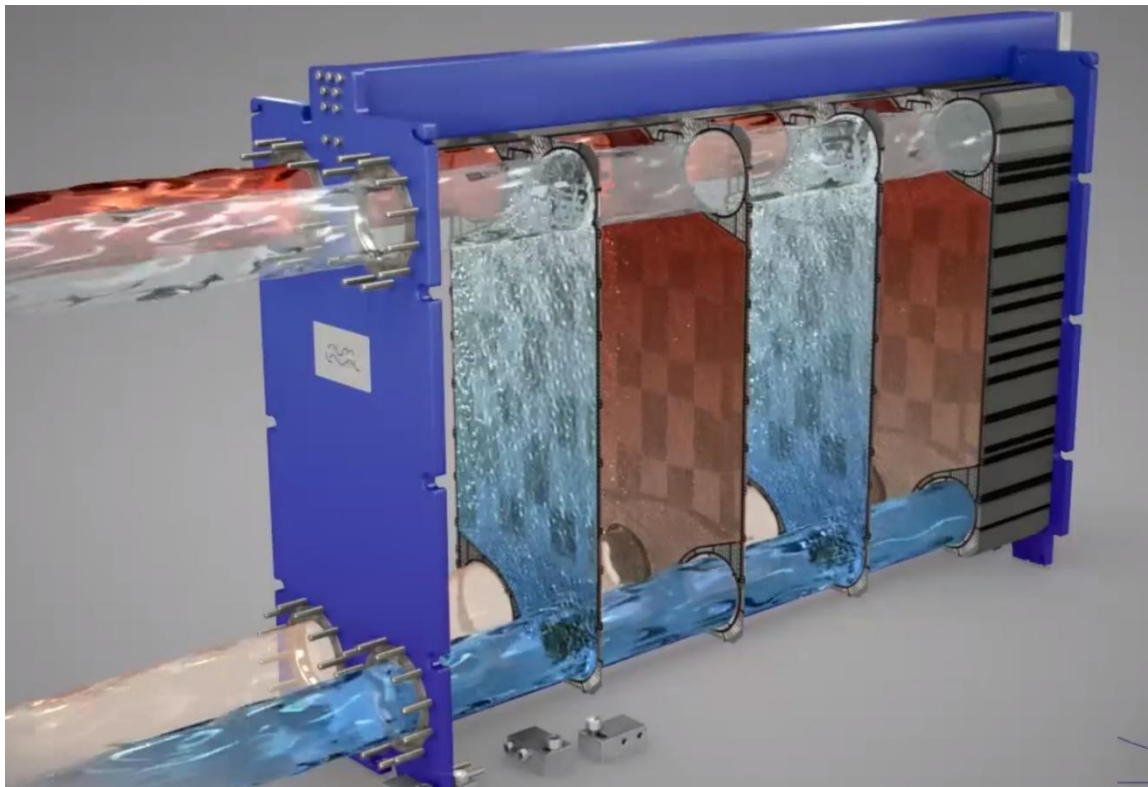


Ilustración 2.28: Intercambiador de Placas

Dependiendo de la construcción de las placas planas diferenciamos entre placa fina y placa soldada. Para el uso en criogenia es común que la construcción de las placas sea de aluminio, esto dependerá hasta que temperatura se quiera llegar. Para la licuefacción de GN el aluminio es un material competente.

2.2.2.2. Ciclo Linde

Es el ciclo de criogenia más simple, basa su tecnología en el efecto Joule-Thomson, se distinguen una fase de compresión, la condensación del gas refrigerante y la entrada a una cámara separadora donde obtendremos líquido saturado. Este es un método directo, es decir el fluido refrigerante será la materia que queremos licuar ya que el ciclo Linde extrae un flujo líquido del refrigerante. Será necesario reponer la cantidad de líquido que se extrae ya que solo la parte de vapor en la cámara separadora es la que continua el ciclo.

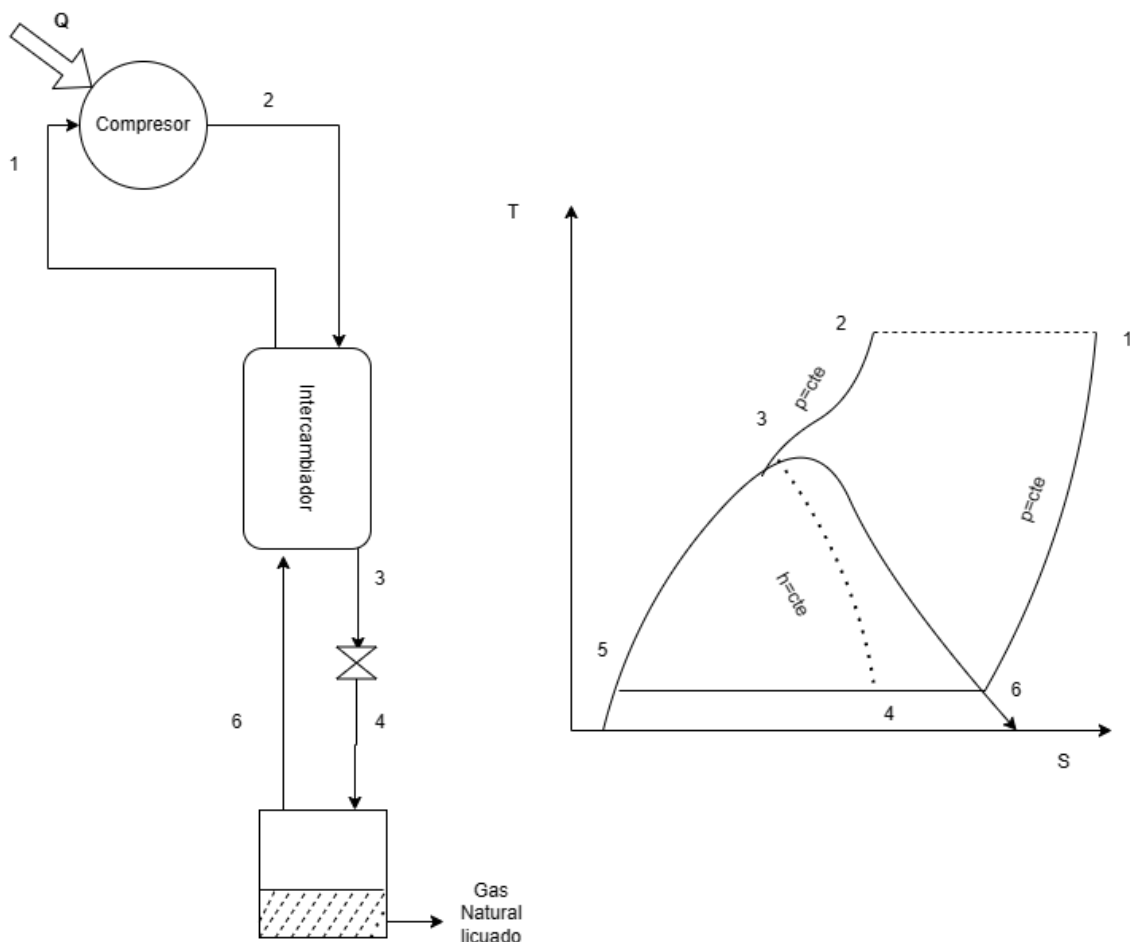


Ilustración 2.29: Ciclo Linde Simple

Este ciclo puede sufrir distintas modificaciones para mejorar su rendimiento, la mejora consiste en conseguir la mayor cantidad de líquido en el separador. Para ello cuanto más se refrigere a presión ambiente, es decir de 2 a 3 en el ciclo, más líquido obtendremos.

-. Ciclo Linde con enfriamiento previo

Se basa simplemente en enfriar el gas a la salida del compresor por debajo del ambiente incrementando la fracción de líquido en el separador y así reduciendo el aumento de presión por lo tanto el compresor necesitara menos trabajo para producir la misma cantidad de líquido.

El enfriamiento se hace a través de otros gases licuados con una temperatura de cambio de fase más alta, haciendo así ciclos en cascada.

-. Ciclo Linde dual

Esta modificación se basa en realizar una nueva fase a una presión intermedia, es decir, después de enfriar a la salida del compresor usamos el efecto J-T pero hasta una presión intermedia, esto nos permitirá reducir el trabajo de compresión.

Se realizarán dos etapas de compresión una que comprima a presión intermedia y otra a la presión más alta, a su vez también habrá dos fases de expansión J-T. El ciclo empieza comprimiendo a baja presión hasta la intermedia el flujo de retorno de la segunda etapa de expansión es decir comprime el flujo de vapor del separador a baja presión. A continuación el flujo a presión intermedia se junta con el flujo de vapor del separador a presión intermedia y se comprime a la presión alta del ciclo, este vapor calienta los flujos de retorno, el de baja y presión intermedia, por lo tanto este se enfría y se expande por primera vez en la válvula J-T, a continuación entra en el separador donde el vapor el cual se encuentra a presión intermedia vuelve como flujo de retorno a la segunda fase de compresión, por el otro lado la fracción licuada en el separador se expande por segunda vez y entra en el segundo separador donde el vapor vuelve siendo el retorno a baja presión y se obtiene la fracción licuada requerida.

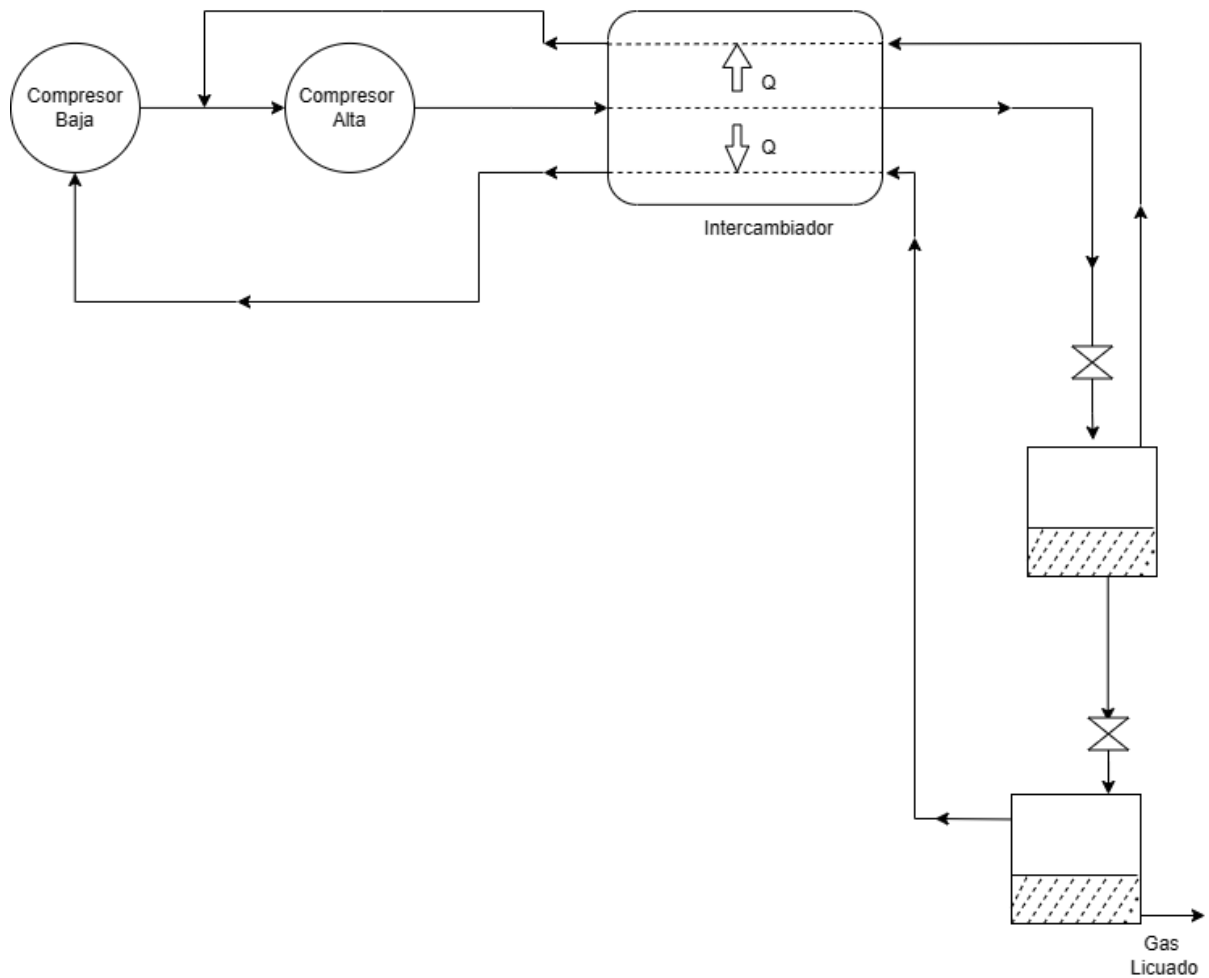


Ilustración 2.30: Ciclo Linde dual

El ciclo necesita al igual que el ciclo básico reposición del gas.

2.2.2.2.3. Ciclo Claude

El ciclo Claude se basa en la misma composición que el ciclo Linde, solo que no realiza una expansión isoentálpica aprovechando el efecto J-T, si no que realiza una expansión isoentrópica.

La expansión isoentrópica es debida a un trabajo externo realizado por un émbolo -cilindro. Esto permite un sistema termodinámico más rentable, pero tiene inconvenientes a bajas temperaturas, como el enfriamiento de los lubricantes del sistema, además de que no es ideal debido a pérdidas mecánicas.

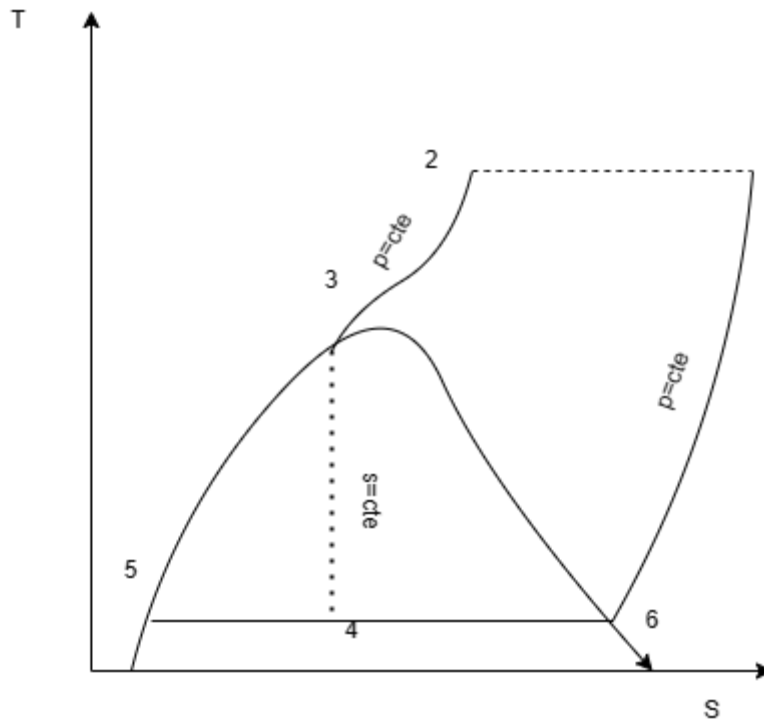


Ilustración 2.31: Ciclo Claude

Comparte una gran similitud con el ciclo Brayton quien usa una turbina para la expansión, simplemente se realiza un ciclo Brayton invertido

2.2.2.2.4. Ciclo Kleemenko

El ciclo este basado en el efecto expansión compresión de Joule-Thomson, solo que usa una mezcla de refrigerantes en vez de uno solo. Esto se usa para ajustar las capacidades de los intercambiadores para aumentar la eficiencia del intercambiador. Este ciclo se considera indirecto ya que el fluido a licuar, como por ejemplo el GN, será independiente de las expansiones y compresiones del sistema, solo se enfriará a su paso por los intercambiadores.

En este ciclo hay varias etapas de evaporación de la mezcla refrigerante. Gracias a los separadores de vapor se realizan extracciones de vapor-prerrefrigerado. Los separadores nos permiten la pre-refrigeración del vapor, el líquido del separador refrigera el vapor y a su vez el vapor cede calor al circuito de retorno. Este proceso se repite hasta 5 veces.

Los intercambiadores de recuperación funcionaran con tres flujos más el flujo del medio/ gas natural, por ejemplo, el siguiente esquema explica el flujo de intercambio junto con la secuencia de fases que se realizan en el ciclo.

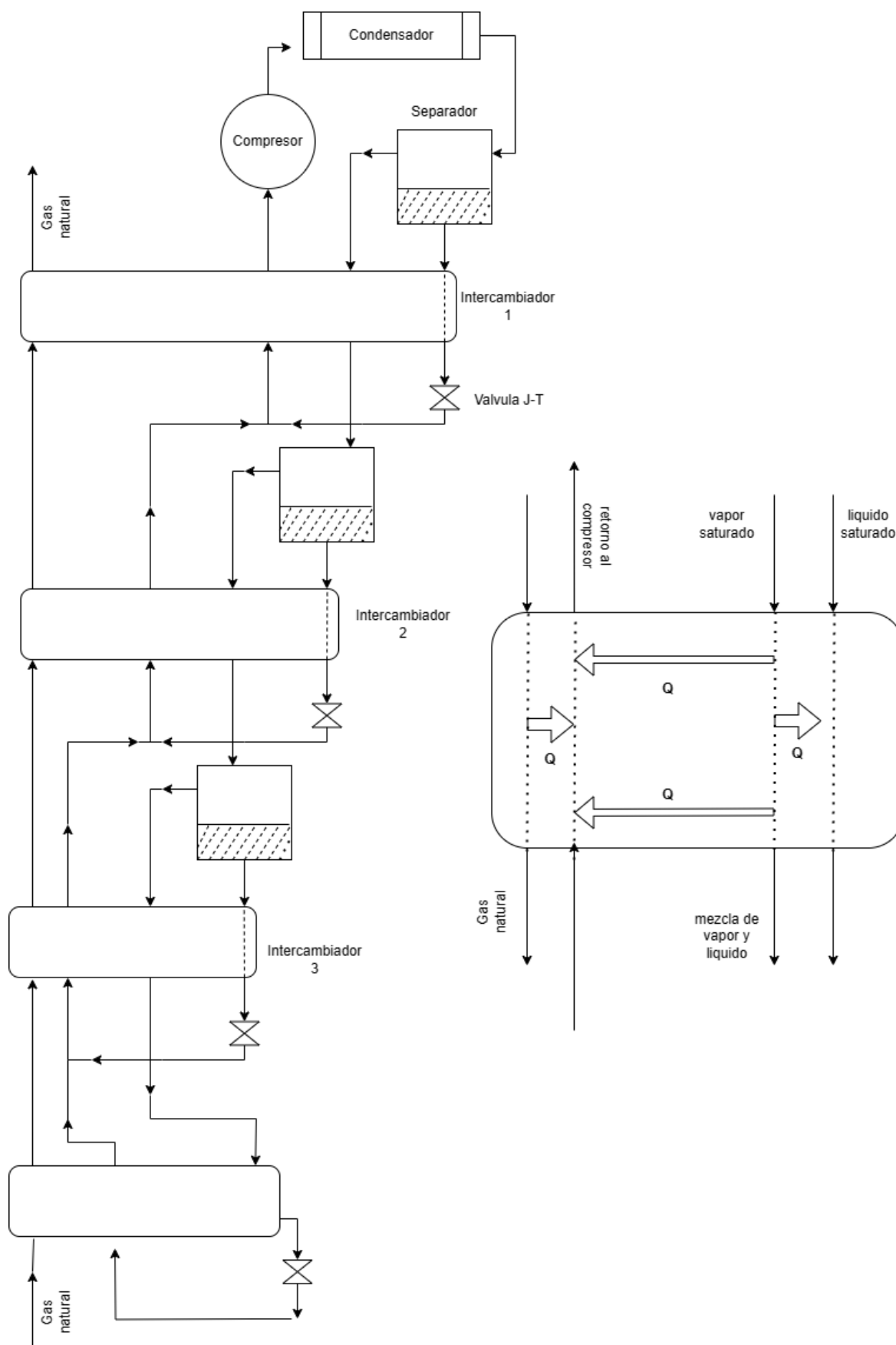


Ilustración 2.32: Esquema instalación de ciclo Kleemenko

2.2.2.2.5. Ciclo Philips Stirling

Esta tecnología está fundamentada en el principio de Stirling, el cual nos dice que en una expansión se genera frío y en una compresión calor, si el motor desarrollado por Stirling es analizado de forma inversa podemos llegar a tener una máquina frigorífica de grandes capacidades. En este caso no solo es la inversión del ciclo si no que se le añade una regeneración para convertirlo así en un ciclo competitivo.

Para invertir el ciclo será necesario aplicar un trabajo al pistón de compresión y junto con unos intercambiadores que funcionaran como regeneradores y conductos para que el flujo de gas cambie de cámara/ espacio en el cilindro. Permitiendo así que se produzca un estado cíclico.

El ciclo comienza con una compresión del primer espacio D por el pistón B, este se refrigera por agentes externos como el agua, y es guiado hasta el regenerador donde se refrigera aún más ya que cede calor al flujo de retorno. A continuación, el gas entra en el segundo espacio E donde se expande y se enfría mucho, este gas ahora enfriado se introduce de nuevo el regenerador por el retorno y obtenemos un flujo de gas frío para la utilización que queramos. Después se devolverá a la primera cámara. El flujo usado suele ser Helio, debido a sus grandes capacidades físicas y su pasividad con el medio.

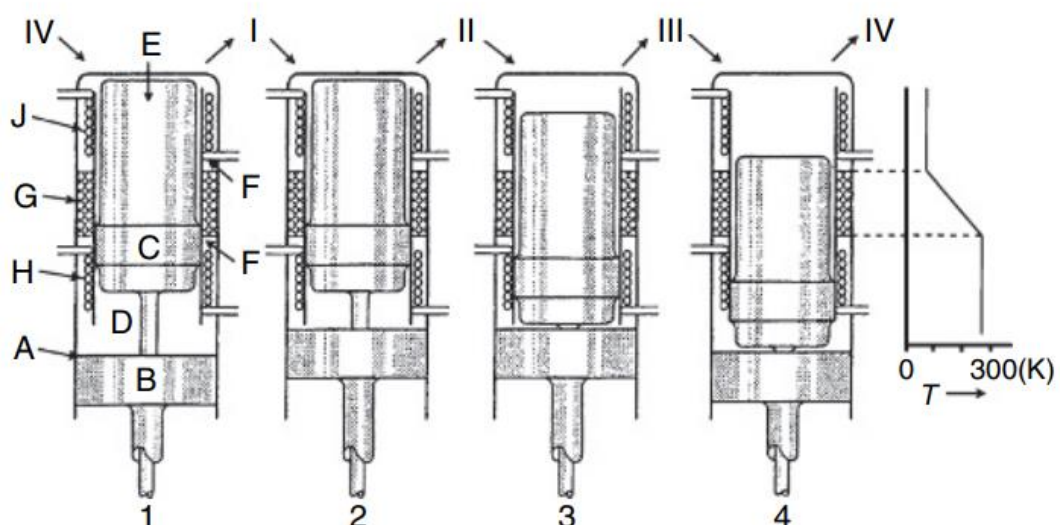


Ilustración 3.33: Fases ciclo Stirling de refrigeración

Cabe destacar el sistema de Gifford-McMahon el cual se basa en los mismos fundamentos que el Stirling solo que este es accionado y controlado a través de dos válvulas, una para dejar salir el gas expandido, y otra para introducir gas comprimido.

2.2.2.2.6. Ciclos con turbinas de expansión

Esta tecnología basa su funcionamiento en que la expansión del fluido refrigerante o fluido a licuar se hace a través de turbinas en vez por válvulas de expansión J-T. Generalmente este proceso es más eficiente pero más sofisticado para su implementación. Las turbinas de expansión pueden complementar nuestro grupo compresor, además son equipamiento muy desarrollado y estudiado por lo cual hay una gran variedad de ellas. Tienes una gran oferta para que adaptes tu sistema a la perfección. El éxito de la implementación de las turbinas reside en el acople al sistema, el cual debe ser coordinado con los otros elementos del sistema.

Hay muchos otros tipos de ciclos y tecnologías creadas y adaptadas para la criogenia, muchas son adaptaciones de las básicas ya vistas o simplemente tecnologías más desfasadas a día de hoy, o por el contrario técnicas aún en desarrollo. Las más destacables y que además nos servirán a la hora de entender mejor las técnicas aplicadas al GNL están descritas anteriormente.

2.2.2.3. Refrigerador por tubos de pulso (pulse tube refrigerator, PTR):

Estos no se alejan demasiado de los refrigeradores mecánicos, aun así, ocupan secciones diferentes debido a una importante diferencia. Los PTR son un ciclo cerrado regenerativo mecánico, la diferencia entre por ejemplo un refrigerador Stirling, es que no tiene partes en movimiento a bajas temperaturas, es decir, los PTR no disponen de partes mecánicas para mover el flujo, y por tanto alargan así la vida útil del refrigerador.

Lo importante en este tipo de enfriadores será la forma con la cual creamos las oscilaciones de presiones necesarias para que nuestro gas fluya y realice el ciclo, por ejemplo, en un ciclo Stirling-PTR usamos los pulso tubos en sustitución de los pistones, este pulso tubo ira alimentado por un motor desde el exterior, este aporte de energía provocará las diferencias de presiones que buscamos.

Esta tecnología no deja de ser una modificación de los enfriadores mecánicos que implica la mejora de ellos. Su estudio se basa en la adaptación de este nuevo componente a los ciclos antiguos.

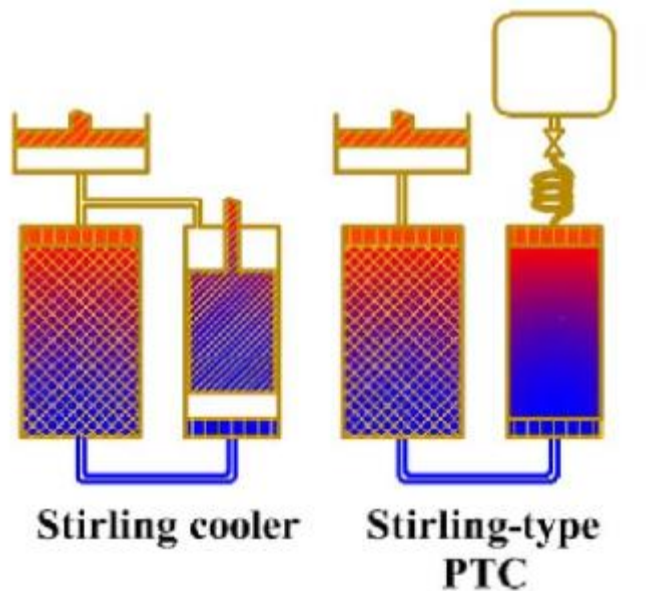


Ilustración 2.34: Diferencia entre el Stirling y Stirling-PTC

2.3. Tecnologías de licuación de Gas Natural

Nos adentramos ahora en las tecnologías referidas solamente al gas natural, nuestra materia de estudio, muchos de los procesos e ideas desarrolladas en el apartado anterior serán ahora mencionadas y enfocadas sobre lo que es la licuación del gas natural.

2.3.1. Propiedades del gas natural

Deberemos identificar las características de nuestro compuesto para conocer a lo que nos enfrentamos a la hora de criogenizar el mismo. Como ya dispusimos en la introducción, el gas natural es un conjunto de distintos compuestos en varias fracciones, siendo el metano (CH_4) el compuesto principal. Esta composición varía según el lugar de extracción o su pureza, el metano compone alrededor de un 92% en masa el gas natural. Por lo tanto, sus propiedades serán parecidas a las del metano puro.

Debido a la necesidad de licuación del mismo para llevar a cabo nuestro objetivo, tenemos en cuenta las siguientes características:

- Es inflamable
- Es inodoro e incoloro
- No es corrosivo
- Su temperatura de condensado a presiones atmosféricas es a -160°C
- Cuenta con una densidad de entre 0.41 y 0.58 kg/m³.

En su extracción, el gas natural va acompañado por diversos componentes, los cuales son dañinos o inconvenientes en el proceso de licuación, por lo que muchas veces es necesario un tratamiento previo del gas para su correcta manipulación.

2.3.2. Bases de la tecnología de licuefacción

Las tecnologías de licuación del gas natural están basadas principalmente en la criogenia, es decir, reducir la temperatura hasta valores muy bajos, en este caso de -162°C (111.15 K). Para esto es necesario en primer lugar, el uso de líquidos refrigerantes que nos ayuden a conseguir nuestro objetivo desarrollándose en un ciclo. Estos refrigerantes tienen características especiales para el frío que nos ayudaran a conseguir un material de trabajo confiable.

Estos ya han sido comentados antes, denominados criolíquidos o refrigerantes criogénicos, los más representativos son el helio, el nitrógeno, el oxígeno o el hidrógeno, y por lo tanto el aire.

2.3.2.1. Selección de refrigerante para procesos de licuación de gas natural

Tenemos una gran variedad de rangos de temperatura para elegir desde 4 °K con el helio licuado hasta una temperatura ambiente de 300°K. A parte de la temperatura, la capacidad de refrigeración obtiene un papel significativo a la hora de escoger el refrigerante o método ideal. Como hemos comentado hay dos tipos de refrigerantes, los refrigerantes que trabajan cerca de temperaturas ambiente, los cuales tienen como característica principal el hecho de que se licuan a temperaturas cercanas a la ambiental. Y por el otro lado los ya comentados Criorefrigerantes los cuales tienen el punto crítico de ebullición por debajo de los 120 °K.

Estos últimos serán los más utilizados para trabajar con temperaturas muy bajas y prácticamente cualquiera de ellos será potencialmente utilizado para el proceso de licuación de gas natural.

2.3.2.2. Mezcla de refrigerantes

Conocemos los tipos de refrigerantes como sustancia pura, pero también cabe la posibilidad de mezclar distintos de estos refrigerantes y así obtener las propiedades idóneas para nuestro proceso.

Hay dos tipos de mezclas, las mezclas zeotrópicas y las azeotrópicas. Las zeotrópicas son las mezclas de refrigerantes puros con distinta volatilidad, es decir, los procesos de evaporación y condensación no se realiza de forma homogénea en toda la composición de la mezcla, si no que hay partes que se evaporan antes y se condensan después, o viceversa.

Para entenderlo mejor debemos saber que, el punto de rocío es la temperatura a la cual un líquido se condensa por completo. También que el punto de burbuja es la temperatura a la cual el vapor evapora completamente. En productos puros estos dos puntos coinciden, y se considera punto de ebullición. En mezclas de refrigerantes zeotrópicas estos dos puntos no coinciden y el punto de burbuja ocurre a una temperatura menor que la del punto de rocío.

Por lo tanto, las mezclas azeotrópicas son mezclas que asemejan un comportamiento de un refrigerante puro, mezclas donde los puntos de burbuja y rocío coinciden.

Las mezclas zeotrópicas nos permiten reducir la relación de compresión, incrementar la capacidad del refrigerador y reduce el COP, ya que la temperatura de condensación disminuye y la de evaporación aumenta, lo que por tanto reduce el trabajo del compresor.

Las mezclas azeotrópicas nos facilitan que, en las mismas condiciones de trabajo la temperatura de evaporación se reduce a si usamos solo un componente de la mezcla, esto hace que la temperatura de descarga del compresor disminuya e incrementa la capacidad frigorífica.

Las mezclas varían sus propiedades según el porcentaje de su composición. Las más usadas para la criogenia son las zeotrópicas, la elección se suele hacer según

rangos de temperaturas requeridos en los procesos. Suelen mezclarse refrigerantes de bajas temperaturas junto con criorefrigerantes, por ejemplo, una mezcla utilizada será el nitrógeno con el refrigerante R14.

2.3.2.3. Procesos bases de licuación

Para hablar de los procesos usados en la licuación analizamos las fases del gas natural a la hora de licuarse. Para ello visualizamos la curva de enfriamiento del gas natural, distinguimos una zona preenfriamiento, seguido de la zona de licuación y completado por un subenfriamiento. El sistema o proceso más eficiente, termodinámicamente hablando, será el que logre replicar esa curva.

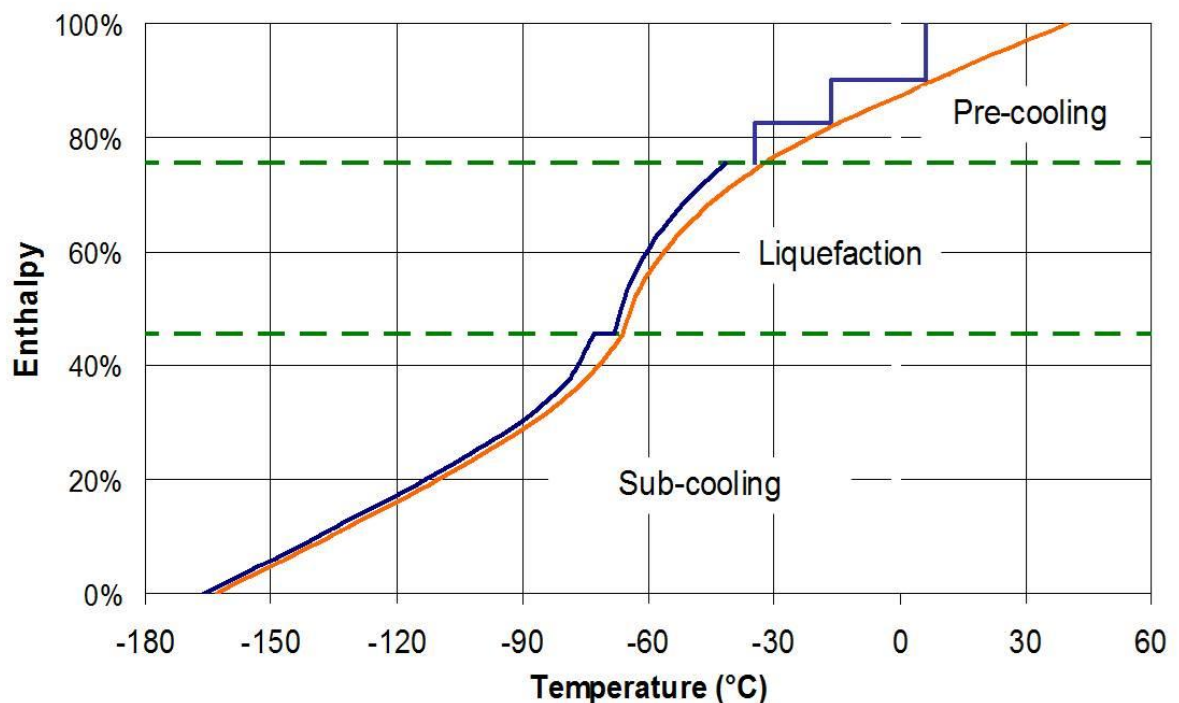


Ilustración 2.35: Curva de refrigeración del gas natural

Esta curva será la referencia que se seguirá para el diseño de un sistema. Podemos observar las distintas pendientes en la curva, que deberemos imitar utilizando procesos y refrigerantes adecuados para cada etapa. De este modo conseguiremos un método de licuación eficiente. A continuación, veremos los métodos que se usan para duplicar la curva de enfriamiento.

2.3.2.3.1. Ciclos en cascada

El clásico sistema en cascada ya mencionado anteriormente se basa en usar ciclos de refrigeración/criogenia uno seguido de otro consiguiendo así un avance

progresivo en la licuación del gas natural. Se trata de un proceso flexible y que puede ser controlado por separado. Sus varios ciclos de refrigeración independientes, con temperaturas constantes en su vaporización, reducen las irreversibilidades en el intercambio de calor. Es un proceso simple y que tiene poco riesgo técnico, aun así, este proceso puede suponer un gasto de inversión alto y no se adapta muy bien a los cambios de composición del gas natural. Más adelante estudiaremos optimizaciones reales y competitivas de este sistema.

2.3.2.3.2. Ciclos con mezcla de refrigerantes (CMR)

Los CMR se basan en la refrigeración continua del gas natural, usando una mezcla cuidadosamente escogida, que replica la curva de enfriamiento desde temperatura ambiente hasta temperaturas criogénicas, usualmente se usan mezclas de hidrocarburos y nitrógeno.

Los CMR, en comparación con los ciclos en cascada, consiguen una mejor adaptación al cambio de la composición del gas; simplemente adaptando la mezcla de refrigerante. Tiene menos compresores y menos intercambios de calor. De todas formas, este método tiene una eficiencia peor que en cascada ya que es difícil que la mezcla de refrigerante opere a la perfección en todo el rango de temperaturas del proceso, además debe ser una mezcla muy precisa y requiere más tiempo para arrancar el proceso.

2.3.2.3.3. Mezcla de refrigerantes Única y Dual

La mezcla única (CMRU) se basa en el uso de un único ciclo de Rankine invertido, un ciclo básico de refrigeración que se compone de 4 procesos básicos, compresión condensación expansión y evaporación, de un fluido refrigerante. Este fluido refrigerante en un ciclo Rankine suele ser agua o hidrocarburos. En una planta de GNL es usado el propano o una mezcla de refrigerantes. Este proceso tiene una eficiencia térmica muy baja y debido a esto se suele usar en plantas de pequeña escala.

La mezcla dual (CMRD) consigue su objetivo de licuar el gas natural a través de dos CMR independientes, donde en el primer ciclo se prerefrigera el gas natural con una mezcla de refrigerante más pesada y, a continuación, el gas se condensa en un segundo intercambiador con un refrigerante más ligero. Un ejemplo de este ciclo es el CMRD con propano como prerefrigerante y una mezcla de refrigerante para el ciclo

de intercambio final. Bastante más eficiente y se adaptan mejor que los CMRU. El tamaño de los intercambiadores disminuye en comparación debido a que se reparte el trabajo entre dos intercambiadores, aun así, aumenta la complejidad de los equipos y por lo tanto el precio.

2.3.2.3.4. Ciclos de expansión de gas

Estos ciclos se basan en la utilización de turbinas de expansión sobre un fluido para generar frío que refrigerara nuestro gas natural. Su funcionamiento es simple, se basa en expandir y comprimir el fluido. Las turbinas tienen un gran rendimiento y pueden ser usadas en distintas distribuciones, desde una sola hasta un conjunto de ellas. Este método permite trabajar en un rango de temperaturas más amplio, el método trabaja bien con refrigerantes únicos que son volátiles y a temperaturas ambiente están en estado de gas. Se adapta bien a las diferencias de composición del gas natural y no requiere un control de temperatura tan estricto, aun así, los otros métodos consiguen más eficiencia, y por eso es más apropiado para plantas de GNL a pequeña escala.

2.3.2.4. Criterio de selección de un proceso

Estos son los procesos básicos a la hora de licuar gas natural, pero una vez conocemos procedimientos, tendremos que pensar cual es el que se debe elegir para conseguir la mayor rentabilidad en todos los campos.

Normalmente, un criterio de selección suele ser la potencia específica necesaria de la planta (kW/ton de GNL), además nos fijaremos en el trabajo de compresión, el área de intercambio de calor y la aproximación del intercambiador primario a la curva de enfriamiento del gas natural. También se debe tener en cuenta la vida útil del ciclo y los equipos. A través de estos factores poder realizar una comparación competitiva entre las distintas tecnologías que son válidas para la licuefacción del gas natural.

Realmente la solución no es un único proceso, si no la mezcla de estos, es la que hace que podamos obtener la resolución idónea. Las empresas que se dedican a la licuación de gas natural combinan estas tecnologías y aplican modificaciones propias.

A continuación, estudiaremos algunas de las propuestas que implantan algunas empresas en sus plantas con la intención de entender como se aplican a casos reales y como adaptan según los distintos factores.

2.3.3. Sistemas y Tecnologías reales de licuefacción de GN

Estos procesos también cambian continuamente conforme las tecnologías mejoran y avanzan, los procesos que estudiaremos los encontraremos con muchas modificaciones. Aquí se estudiara de manera general las tecnologías patentadas por las distintas empresas.

2.3.3.1. Phillips optimized cascade GNL process

La empresa de Phillips Petroleum Company desarrolla un proceso en cascada descrito anteriormente, para ello usa etapas de propano etileno y metano. El aporte de gas natural será continuo y dirigido a través de las distintas etapas de refrigeración constituidas por el propano y el etileno. Los ciclos de propano usaran aire o agua en los condensadores para el intercambio, y el propano a su vez eliminará el calor de la compresión en el condensador del ciclo del etileno. El flujo de gas natural licuado al pasar por estos pre-refrigeradores divide los componentes pesados del gas natural y los elimina del flujo principal, el GN, el cual ahora tiene una composición más rica en metano, continua su bajada de temperatura con el ciclo de metano. El GNL resultante será llevado aun depósito donde se almacenará a 70 mbar por encima de la presión atmosférica y a una temperatura de -161°C

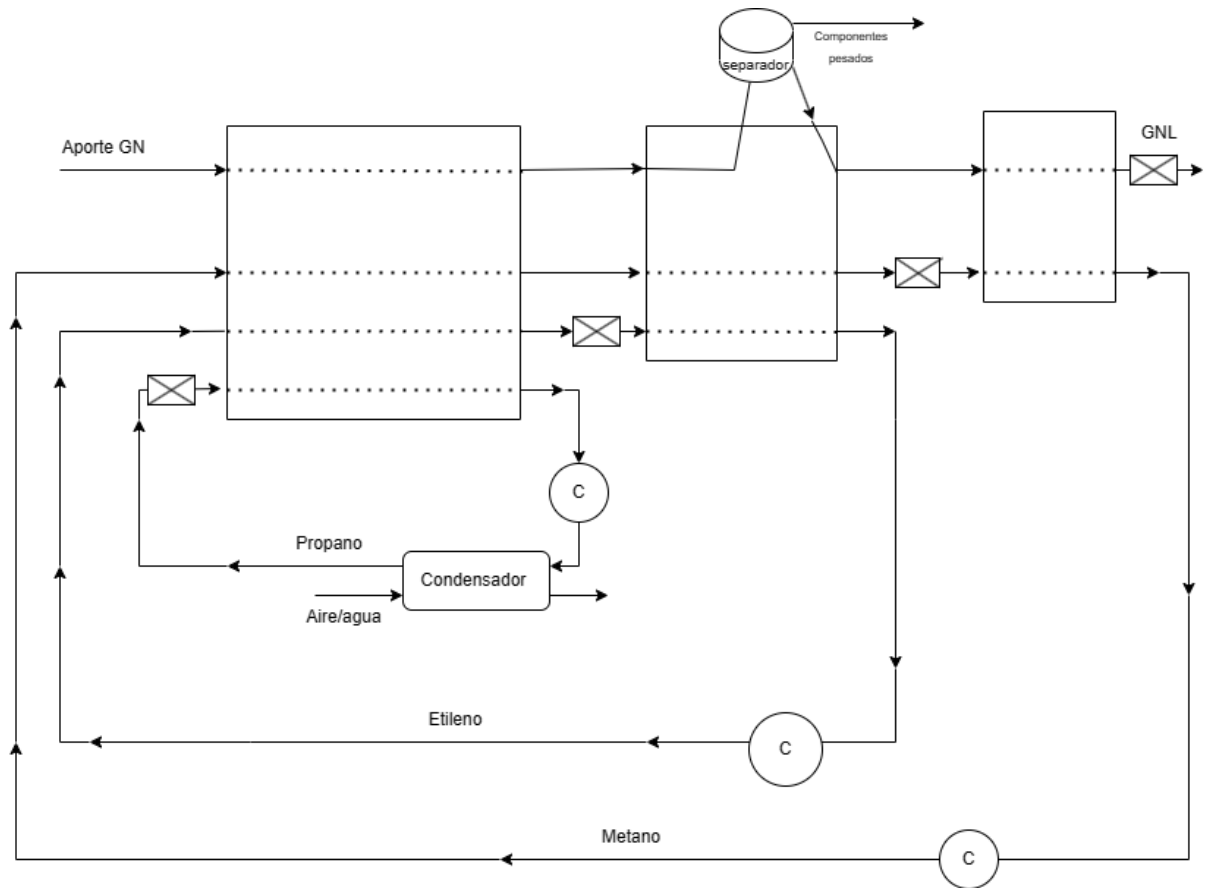


Ilustración 2.36: Esquema ciclo en cascada optimizado Phillips

Este proceso es aplicable a plantas de tamaños determinados, en este caso la máxima capacidad de plantas con este sistema es de menos de 5 MTPA (millones de toneladas por año). Estos procesos tienen una gran eficiencia térmica, por encima del 93%. Como ejemplo mostramos la planta de Darwin, Australia 2006 que consigue un rango de 90-93 % de eficiencia.

2.3.3.2. PRICO (Black and Veatch Pritchard process)

PRICO nos propone una solución a través de una tecnología de CMR, que ha sido satisfactoriamente usada en cargas de gas natural. Como ya hemos visto, en este tipo de sistemas lo más importante es definir la mezcla de refrigerantes que realizará el ciclo y enfriará el GN.

La mezcla se constituye de nitrógeno metano, etano, propano y isopentano, la composición de cada componente esta elegida con mucha precisión para cuadrar

perfectamente con la curva de enfriamiento, esta composición se podrá variar según el gas natural que llegue a la planta, es decir, de la composición de GN que tengamos.

La mezcla de refrigerante (MR) sigue los procesos típicos de compresión y condensación que se realizan en ciclos de refrigeración. La MR se condensará del todo cuando entre en la caja fría y entrara en la válvula de expansión que hará que la temperatura caiga, y este fluido refrigerará entonces el GN aportado.

En el proceso PRICO, el gas natural es pre-refrigerado a -35°C , lo cual hace que los componentes pesados del gas se condensan y podemos eliminarlos. Este después vuelve a la caja fría y obtenemos el GNL.

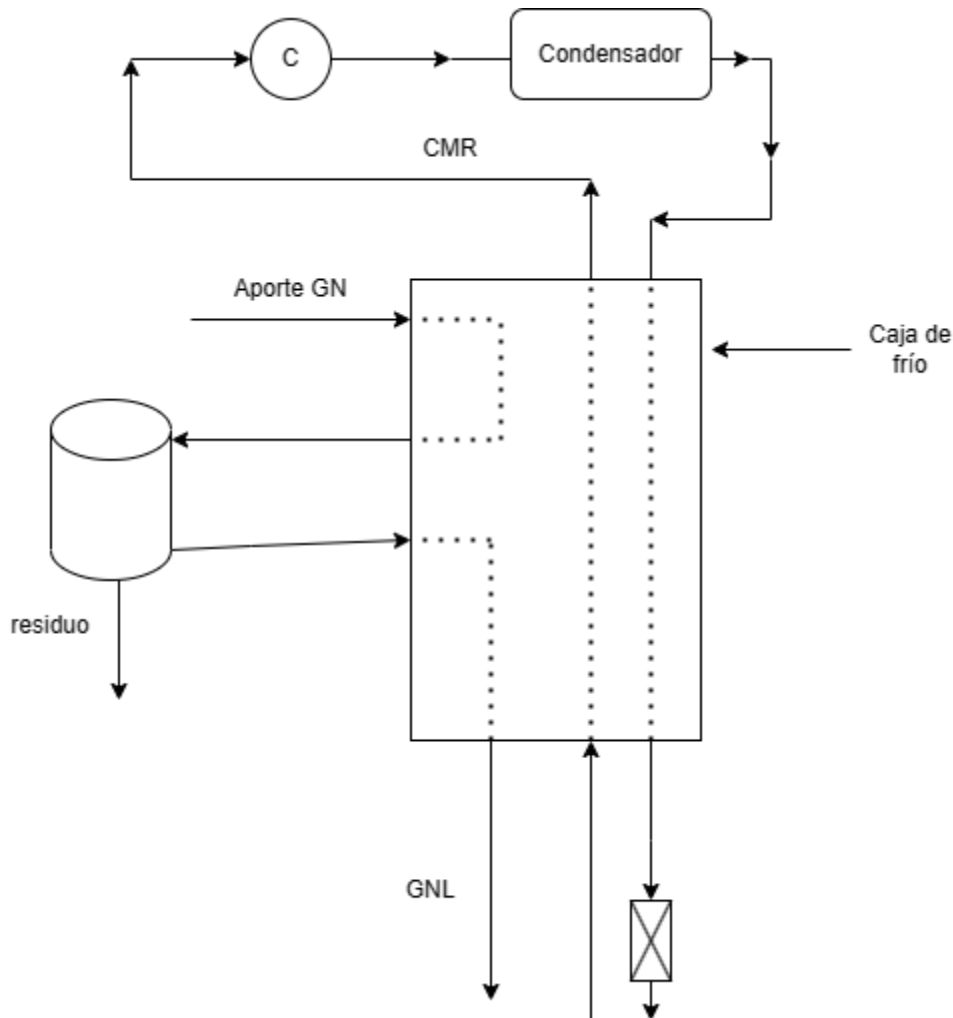


Ilustración 2.37: Ciclo MR PRICO

Este proceso es más simple que los procesos de cascada, pero consigue un rendimiento menor. Este tipo de tecnología no se ajusta bien a las plantas de GNL con mucha carga, por lo que se reserva para plantas a pequeña escala, puede ser usado para combustibles de vehículos y peak shaving.

2.3.3.3. Statoil/Linde mixed fluid cascade process

Este proceso mezcla, la mezcla de refrigerantes (MR) con los ciclos en cascada. Desarrollada para que funcione en condiciones ambiente más problemáticas, como por ejemplo, este proceso se ha aplicado en noruega en la costa norteña donde encontramos factores de entorno problematicos.

La MR sustituye a los elementos puros de los sub-cilcos que se usan en los procesos de cascada. El ciclo completo se divide en tres etapas de refrigeración, es decir, tres ciclos distintos. El primero, pre-refrigera el GN, el segundo lo licua y el tercero realiza el subenfriamiento.

La MR está compuesta por propano, etano o etileno, metano y nitrógeno, las etapas de compresión pueden ser compartidas para la simplificación de la instalación. La planta de Snohvit noruega utiliza este sistema con una producción de alrededor de 4.3 MTPA.

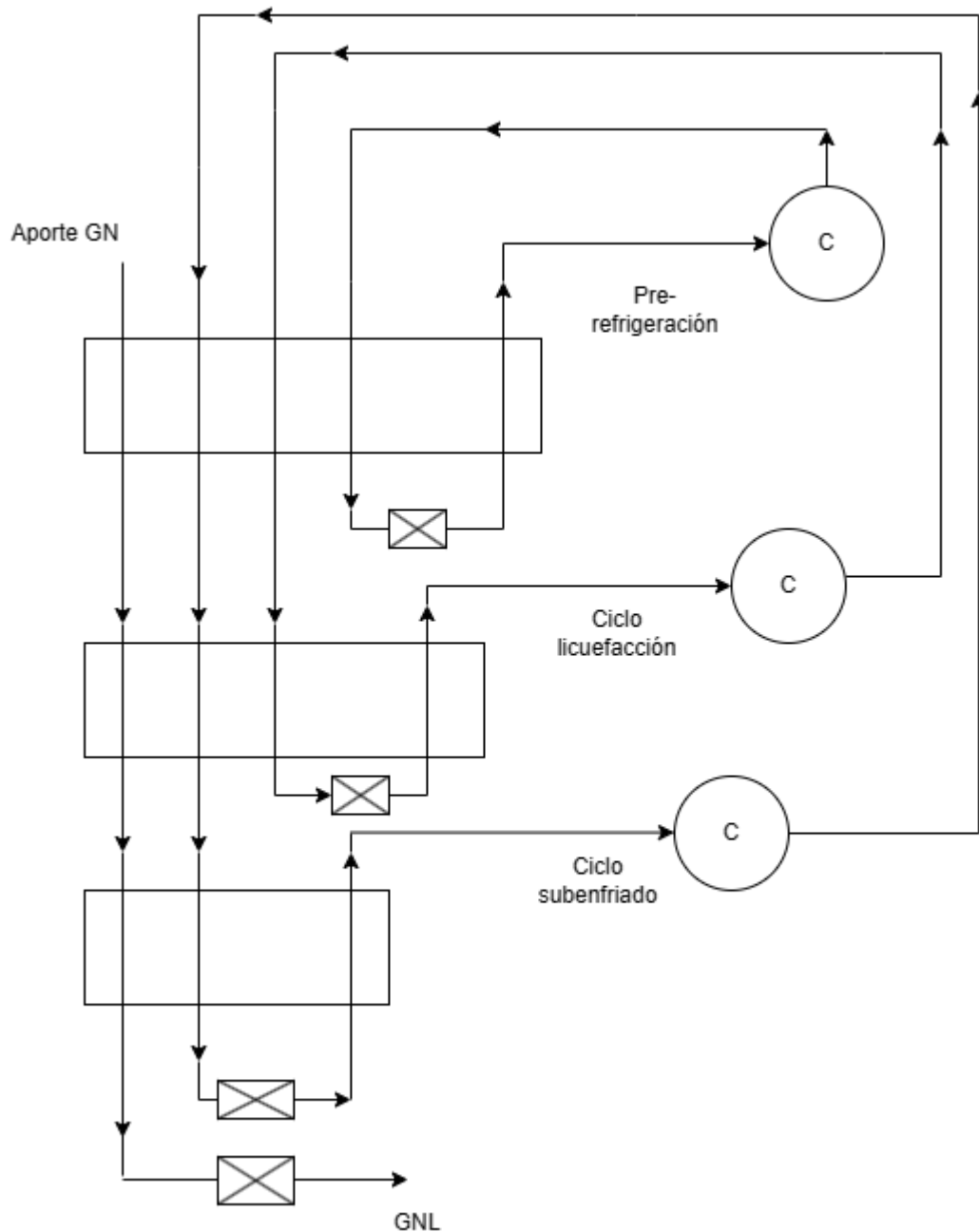


Ilustración 2.38; Ciclo Statoi/Linde

2.3.3.4. Proceso de licuefacción IFP/Axens

Un modelo que nos permite conseguir grandes capacidades con un proceso y equipamiento simple. Se basa en la utilización de dos CMR, uno pre-refrigerará y otro criogenizará. En el tren de licuación del GN el gas se pre-refrigera hasta unos -50°C -80°C donde saldrá y se eliminara como en el resto de procesos los componentes pesados del GN, a continuación, entra de nuevo en la cámara de frio y entra en el sistema criogénico que lo llevará hasta el estado de almacenaje como GNL.

Estudiamos el primer sistema MR de pre-refrigeración el cual refrigera en tres etapas de presión distintas en el ciclo, en cada una se condensa completamente la MR en la caja de frío y se expande a continuación. Después de la expansión entra en la caja de frío y refrigera gas natural y condensado del mismo ciclo, al evaporarse pasa al grupo de compresión.

En el segundo ciclo, el sistema criogénico, la MR se condensa también en la cámara de frío, el condensado se expande por una turbina de expansión y se reintroduce en la cámara de frío donde absorberá calor para el condensado y el gas natural.

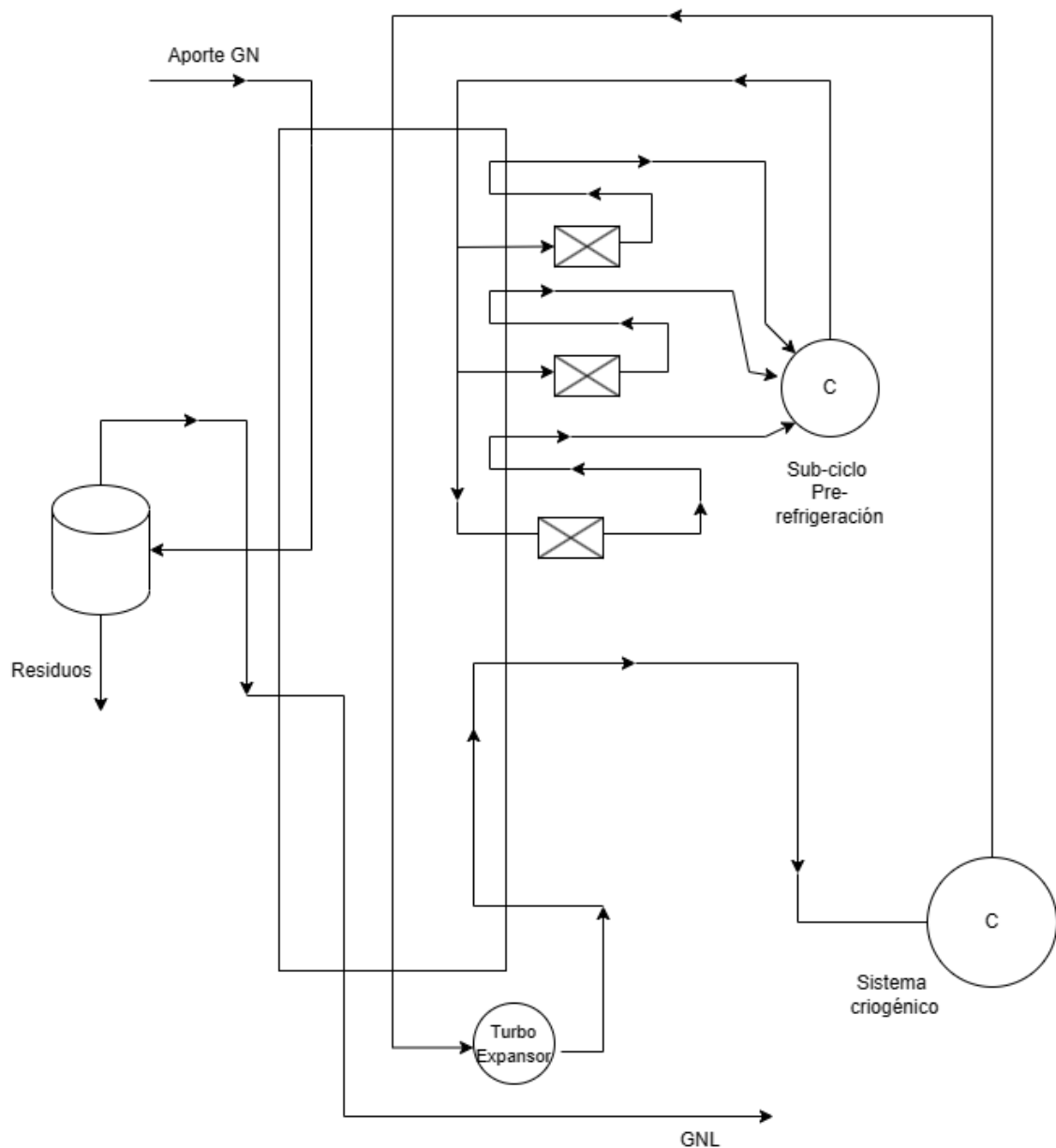


Ilustración 2.39: Ciclo IFP/Axens

El hecho de compartir la refrigeración en condensación junto con la refrigeración del gas natural, proporciona la distribución del trabajo y optimiza los intercambiadores. Está pensado para una distribución de un 50/50, mitad de la potencia proporcionada por el sistema de pre-refrigerado y mitad aportado por el sistema criogénico. El resto de capacidad frigorífica se encargará de condensar las MR.

Este sistema ahorra un alrededor de un 20% en costes en comparación con otros sistemas. Se mejora en costes de intercambiadores, se compacta el área de ocupación, y aumenta la capacidad de la planta. Aun así, no se ha puesto en marcha ninguna planta con este sistema.

2.3.3.5. Shell dual mixed refrigerant proceess

La empresa Shell desarrolla un CMRD con una diferenciación de dos ciclos uno para pre-refrigerar el GN y otro para su licuación, con esto consigues poder elegir la carga de cada ciclo. El ciclo de pre-refrigeración usará una MR de etano y propano, este proceso es muy eficiente en climas fríos ya que la MR supera las limitaciones que el propano puro suponía en estos climas. El deber de enfriar hasta la licuefacción del GN es gracias al segundo CMR, esta MR estará compuesta de nitrógeno, metano, etano y propano. El vapor a la salida del intercambiador de este ciclo es comprimido por tres fases de compresión una en un compresor axial y otros dos compresores centrífugos, consta de una fase de intercooling y un atemperador con aire, la condensación de la MR es ayudada por la caja de frío que enfría el GN.

El proceso que Shell propone se contempla el suministro de energía a través de energía eléctrica. Estos funcionan bien en un rango de capacidad de entre 5 y 10 MTPA y compiten bien con los ciclos mecánicos debido, aunque sea más costoso debido a la adaptación de los sistemas eléctricos.

Esta empresa también ha propuesto un método para incrementar la capacidad del ciclo de propano puro implementando equipamiento de doble carcasa y haciendo así posible que el método de propano puro, es decir, sin MR se acerque a una capacidad de 5 MTPA. Además, en climas tropicales pueden aumentar a un proceso de cascada de tres ciclos uno de pre-refrigeración y dos de criogenia pudiendo aumentar la capacidad a 8 MTPA. Este último método también es aplicable a procesos de MR y no sería necesario cambiar nada importante en el proceso.

La potencia puede ser aumentada también añadiendo distintos potenciadores, como, por ejemplo, unir los grupos de compresión de dos ciclos independientes, esto puede suponer un gran reto.

2.3.3.6. APCI Propano pre-refrigerado con mezcla de refrigerante

Este proceso al que denominaremos C3-MR fue desarrollado por la empresa APCI (Air Products & Chemical Inc) y es de los procesos más usados en la licuefacción de gas natural.

Este proceso este compuesto por una multifase del propano pre-refrigerando y una CMR para la etapa de licuefacción, estando la MR compuesta de nitrógeno, metano etano y propano. Para el comienzo del proceso el gas natural aportado pasa por un enfriador de propano independiente que baja la temperatura del gas a unos -35°C aproximadamente. Después el gas natural entra en la cámara de criogenia donde se encuentra el intercambiador principal y donde este es licuado y subenfriado hasta la temperatura adecuada, este enfriamiento es posible gracias al CMR, el cual es ayudado a condensar la MR gracias al enfriador de propano, que una vez condensado se expande a través de válvulas J-T y entra a la caja criogénica dando la capacidad frigorífica suficiente para la licuefacción del GN.

Cabe destacar que los intercambiadores usados en este ciclo son de tipo en forma de espiral (FS), este proceso consigue una capacidad de 5 MTPA, se contemplan modificaciones hechas por la empresa que aumentan la capacidad a 6/7 MTPA a través de un aumento del intercambiador central.

2.3.4. Proceso de selección

Por comparación de cantidad podemos diferenciar los ciclos según el tamaño de la planta la que se adapte el ciclo. Simplificando podemos decir que las plantas pequeñas usan procesos de expansión, las plantas de mediana escala se adaptan mejor a los CMR y en las plantas grandes usan ciclos en cascada, o con pre-refrigeración.

Este proceso simplista de elección no nos favorece, debido a la gran importancia que la elección del proceso obtiene para en el impacto económico de la planta. Desde el principio de planificación del proyecto es una de las claves a tener en cuenta. Para

la selección de una apropiada tecnología se considerará el factor tecnológico y económico. Dentro de estos dos campos se estudian factores que influyen en los diseños, algunos de estos pueden ser las condiciones del lugar, composición del gas, ciclo de vida, capacidad de producción.

Según Eficiencia Térmica

La eficiencia viene relacionada con la capacidad calorífica del producto en comparación con la capacidad calorífica de la materia inicial. Es decir, debemos estudiar la pérdida de energía en el proceso de licuación, cuanto menos perdamos y menos utilicemos en el proceso más eficiente será.

La eficiencia térmica dependerá de factores como la composición del gas, la presión de entrada y la temperatura del lugar. Además de los instrumentos y equipos en sistemas de procesado utilizados. La eficiencia térmica será uno de los factores que nos ayudará a comparar procesos.

Según selección de equipo

La economía del proyecto depende mayoritariamente de los costes de los equipos utilizados. La eficiencia de los equipos y el coste de ellos decidirían cual es exactamente el necesario para nuestra planta. Los equipos más característicos en una planta son:

Compresores: La elección de los equipos rotativos es afectada por la composición del GN, presión, temperatura, la relación de compresión, y el flujo de refrigerante. Dependiendo de la escala de la planta elegimos entre compresores axiales o centrífugos, los segundos son usados en grandes plantas debido a que pueden ser diseñados para aumentar el volumen de flujo. Para saltos de presión más bajos es mejor el uso de compresores axiales. Para plantas más chicas aumenta el rango de compresores utilizables.

Propulsores/ accionadores: Lo más usado como propulsor es la turbina de gas ya probada en muchas plantas de licuefacción, estas aumentan la eficiencia

aprovechando residuos gaseosos del propio sistema y ayudando así a que el balance en la planta sea más favorable, además, es más simple usar una turbina que una planta de potencia de vapor, o más barato que un accionamiento eléctrico. Estas turbinas además están muy estudiadas y presentan multitud de diseños y tendremos un gran catalogo para elegir según lo requerido en nuestra planta. Se pueden distinguir distintas turbinas según sus diseños, diferenciamos las “Frame turbines” y las “Aero-derivatives”, dependiendo de cual sea la relación de compresión y la temperatura, las “Aero-derivatives” funcionan con más relación de presiones, pero aun así son más frágiles que las Frames Turbines.

Table 3-3 Gas Turbine Performance Comparison					
Frame Turbines					
Model	GE 5C	GE 5D	GE 6	GE 7	GE 9E
ISO power, MW	28.3	32.6	43.5	85.4	123.4
Relative cost	1.0	1.2	1.3	2.7	3.0
Relative specific cost	1.0	1.04	0.85	0.89	0.89
Number of shafts	2	2	1	1	1
Efficiency %	29.3	30.3	33.2	32.7	33.8
Aero-derivatives					
Model	GE LM2500+	GE LM6000	RR Cobera 6761	RR Trent	
ISO power, MW	30	44.6	33.4	52.55	
Relative cost	1.2	1.7	1.2	1.9	
Relative specific cost	1.13	1.08	1.02	1.02	
Number of shafts	2	3	2	3	
Efficiency %	40.3	42.6	40.5	42.5	
<i>(after Avidan et al., 2001)</i>					

Ilustración 2.40: Tabla de comparación de turbinas

Es importante tener en cuenta la adaptación de la turbina al grupo compresor a la hora de elegir una turbina, es posible que un tren de compresión limite a los equipos y estos deben de ser revaluados para la obtención de una coordinación por parte de todos los elementos de la planta. Cuando en una planta se introduce un avance tecnológico o un cambio de equipos, se debe de reevaluar el rendimiento. En el caso de un accionamiento de turbina es lo mismo, se debe elegir teniendo en cuenta el equilibrio de la planta. Para turbinas se suele elegir la turbina más eficiente y más económica que se adapte a las especificaciones de nuestro grupo compresor, sin

embargo, los motores eléctricos se pueden combinar junto con las turbinas y así, permitit que los sistemas mecánicos no limiten la búsqueda de eficiencia.

Intercambiadores de calor: Los intercambiadoras más usados suelen ser los intercambiadores de placa fina (PF) y los de forma de espiral (FS), estos pueden conseguir que la temperatura entre el refrigerante y el gas natural acaben muy cercanas. Aun ser muy eficientes los intercambiadores tienen capacidad limitada, los PF consiguen hasta 1.5 MTPA y para el incremento de la capacidad se debe intercalar en serie varios de ellos, y por el otro lado los FS consiguen más capacidad, alrededor de 4MTPA.

Los PF consisten en finas placas de aluminio por las que el flujo circulará, estos tienen distintas configuraciones, las típicas, contracorriente, flujo paralelo o en múltiples direcciones. Las principales ventajas de los PF, es su tamaño compacto, su poco peso y un bajo precio. Se adapta bien con múltiples intercambiadores, aun así, son vulnerables a picos de temperatura y posibles golpes por su constitución de aluminio.

Los FS pueden operar con un gradiente más alto de temperaturas, su transferencia de calor es mayor, tienen más superficie que los PF y así consiguen una resistencia a los picos de calor, sin embargo, son peores lidiando con cambios de composición del gas debido a la configuración que se les impone.

Normalmente los FS son frecuentemente usados en ciclos MR, mientras que los intercambiadores PF suelen trabajar en plantas de procesos en cascada y de expansión. A la hora de la elección del tipo debemos analizar caso por caso internamente, es decir, dependiendo del sistema escogeremos el tipo de intercambiador para cada ciclo según convenga. En un proceso con tres subciclos como el Statoi/Linde el ciclo de pre-refrigeración usara un PF y los otros dos ciclos se realizarán con un FS.

Según comparación en consumos de las distintas tecnologías

En todos los procesos de la planta el más costoso es el proceso de licuefacción, es por eso que las mejoras para las plantas están principalmente enfocadas en estas tecnologías.

Distintas empresas están en la búsqueda de una combinación de elementos y equipos más genéricos que abaraten el costo y consigan una eficiencia similar. Para comparar distintos consumos deberemos fijarnos en la combinación de procesos con el equipo con el que cuentan. Por ejemplo, ExxonMobile desarrolla un proceso CMRD donde usa intercambiadores de placa soldada, un intercambiador más simple que los anteriormente comentados, junto con una turbina grande centrífuga que activa el compresor, intentando así que los equipos más simples que son más baratos consigan un funcionamiento eficiente.

Es necesario tener en cuenta las posibilidades de combinación entre todos los tipos y variantes de las tecnologías que hemos visto, pudiendo así elegir y conocer, según un consumo de energía, lo mejor. Un proceso puede ser muy eficiente térmicamente, pero consume mucho y al contrario igual un proceso que consume muy poco puede tener una eficiencia térmica muy mala. Es necesario una elección conveniente e inteligente a ojo de la empresa diseñadora, consiguiendo así que la planta prospere y consiga ser competitiva.

3. Aplicación en una planta: Análisis de la planta de Snøhvit, Noruega

Para una buena comprensión de la importancia del proceso de licuefacción de Gas Natural, deberemos ser conscientes de cómo funciona una planta real dedicada a este objetivo. Analizando los tratamientos a los que se somete el GN desde que entra en la planta hasta el almacenamiento y distribución de barriles de GNL, conseguiremos entender los procesos y la viabilidad de los mismos, los cuales hemos estado estudiando anteriormente. En una planta de GNL no solo se encargará de la refrigeración del GN, esta también implementará procesos de pre tratamiento y post tratamiento del GN, se analizarán para una comprensión plena de la planta.

Nuestro enfoque principal se basará en el análisis y diseño de un proceso de licuefacción de GN, pero este estará referido e influenciado por la planta real que se propone, imponiendo esta la mayoría de factores de diseño a tener en cuenta.

Para un análisis competente escogemos una planta representativa, una planta la cual aplique una tecnología puntera y obtenga un funcionamiento pleno durante

años. Es así como vemos la importancia de una planta de GNL en el día a día, y obtendremos información suficiente para una exposición final sobre el GNL en el mercado internacional y el porqué de un estudio de estas técnicas.

3.1. Planta de GNL de Snøhvit, Hammerfest, Noruega

3.1.1. Ubicación y contexto

La planta de Licuefacción de gas natural que estudiaremos se encuentra situada en la costa norte de Noruega en una latitud de 71° N. Pertenece al pueblo de Hammerfest, situada en una isla cercana a la población llamada Melkøya. Aquí es donde las principales instalaciones de la planta están construidas. Su localización permite que esta planta se ocupe de las extracciones de los campos de Snøhvit del mar de Barents.



Ilustración 3.41: Planta de GNL, isla Melkøya.

La isla consta de una superficie la cual fue aumentada artificialmente hasta unas 101.17 hectáreas y se alimenta de un gaseoducto que viene a través del fondo marino. La empresa Statoil con Linde se hace cargo del proyecto con una financiación inicial de 5.3 billones de dólares.

Esta planta con una capacidad de unos 4.3 MTPA firmaron contratos de exportación con España, Iberdrola y con la ciudad del Paso en EEUU. Desde de la isla de Melkøya se flotan unos 70 buques de carga de GNL cada año.

La planta tiene como proyección de vida entre 25-30 años de funcionamiento, se diferencia de otras por ser de las primeras plantas en procesar el gas natural a la entrada y conseguir separar el CO₂ para un su uso aparte. Su producción empieza en 2007 y hasta día de hoy ha seguido funcionando consistentemente. Desde su inicio más pozos han sido perforados y se planea extender la planta con una inversión de 1.14 billones de dólares.

3.2. Procesado del Gas natural

Analizaremos el recorrido que sigue el Gas Natural desde que entra en la planta hasta que sale convertido en GNL, destacamos que esta planta no solo produce GNL si no que extrae del GN distintas componentes. Nuestro foco de estudio se pondrá en el sistema de licuefacción del GN, aunque comentaremos los distintos sistemas que esta planta implementa en el tratamiento del GN.

3.2.1. Tratamientos pre-licuación

La mejor forma de visualizar los sistemas de tratamiento del gas natural en la planta es seguir el recorrido que nuestra sustancia realiza hasta llegar al GNL.

Para comenzar debemos de saber que esta planta no solo produce GNL si no que extrae y trata otros componentes del gas natural para su aprovechamiento. EL primer paso de la planta es la entrada de materia prima de los gaseoductos, en este caso provenientes de los campos de Snøhvit. De estos gaseoductos se obtiene tres componentes, GN, Condensado y agua. El captador del gaseoducto trabaja a una presión de entre 70 y 90 bares.

Después de la captación el líquido y vapor son calentados con la intención de separar y prevenir que el GN se hidrate en la expansión del gas, por lo que se separan los resquicios líquidos y las partículas sólidas. En este proceso el gas cambia su presión, para su control se introduce una válvula que nos mantendrá la presión en unos 68 bar para que se adapte bien a los siguientes sistemas. Durante el tratamiento se extrae una porción de Gas Natural para usar de combustible de alimentación en otros sistemas. El resto de GN pasa a la siguiente fase mezclado con gases residuales provenientes del tratamiento del condensado.

El condensado es llevado desde la captación, a su propio sistema de tratamiento independiente del sistema del GN. Estos tratamientos se basan en la eliminación de los componentes más ligeros del condensado y gases residuales, para su siguiente almacenamiento y uso en labores energéticas.

Siguiendo el curso del Gas Natural, pasamos al sistema de eliminación del CO₂, no sin antes también eliminar el mercurio contenido en la composición de nuestro gas, evitando así un ataque químico de este elemento a nuestros equipos. El contenido en el GNL de CO₂ puede ser como máximo de un 0.005% en volumen, para evitar que este compuesto se congele en el proceso de licuefacción. Químicamente se trata el GN eliminando el CO₂ a través de una amina. Este sistema extrae aproximadamente un 5.3% en volumen de gas natural como CO₂.

Una vez hemos cumplido con estos tratamientos nuestro Gas natural está listo para entrar el proceso de licuefacción. Una vez el gas sale del sistema de eliminación de CO₂, este tendrá un caudal de unos 758365.72 Nm³/h que en flujo masico equivale a unos 155.25 kg/s , a una presión de 61 bares y una temperatura de 12°C

Con esta cantidad trabajaremos en el siguiente apartado donde estudiaremos el funcionamiento del ciclo, los intercambiadores principales y el flujo másico de refrigerante necesario.

3.2.2. Ciclo de criogenia del GN

EL ciclo que presenta esta central es uno de los ciclos estudiados teóricamente en los apartados anteriores. Se trata del ciclo desarrollado por Statoil/Linde dos empresas que nos proponen un modelo de ciclo en cascada con tres fases y con una Mezcla de refrigerantes distinta en cada uno de ellos. Cada una de las fases desarrolla una función a la hora del enfriamiento del GN, una fase se encargará del pre-enfriamiento, otra de la licuefacción, y otra del sub-enfriamiento.

Este es verdaderamente el enfoque de nuestro análisis, es por eso que nos centraremos en un desarrollo teórico del ciclo según datos reales de la planta, pudiendo así ver las implicaciones de cada fase del ciclo y el comportamiento energético de las MR y los intercambiadores.

Para ellos implementamos datos de diseño, los cuales están basados en estudios de la planta en algún momento de su funcionamiento. No todos los datos de partida son exactos a la realidad, pero si coherentes con el estudio que se realiza, y por tanto representativos a la hora de entender el funcionamiento del proceso de licuefacción de esta planta.

Datos de diseño:

- El Gas Natural entrara al ciclo con un flujo de 155.25 kg/s con una temperatura de 12°C .
- La presión permanecerá constante durante todo el proceso de enfriamiento del Gas Natural, con valor de 61 bares
- La composición del GN contara con tres componentes, Metano (C1) al 91.2% en masa, Etileno (C2) al 6% y Propano (C3) al 2.8%.
- La mezcla refrigerante de la fase de pre-enfriamiento se compondrá de C2 y C3
- La MR de la fase de licuefacción se compondrá de C1, C2 y C3
- La MR de la fase de sub-enfriamiento se compondrá de Nitrogeno (N2), C1, y C2.
- El sub-ciclo de la fase de preenfriamiento tendrá dos expansiones a distintas presiones, expansión de 18 bar a 3 bar, y expansión de 18 bar a 8 bar.
- El ciclo de licuefacción tendrá un salto de 19 bar a 3 bar.
- El ciclo de sub enfriamiento tendrá un salto de 54 bar a 3 bar.
- Se seguirán el esquema de temperaturas de la ilustración
- Mantendremos un flujo masico de GN constante.
- El punto a la salida de la fase de evaporación en los ciclos será considerado como un punto de vapor saturado.
- La etapa de compresión iniciará justo después del punto en vapor saturado. Esto se aplica a todos los sub-ciclos.
- Los compresores se considerarán ideales, es decir, la compresión será un proceso isoentálpico.

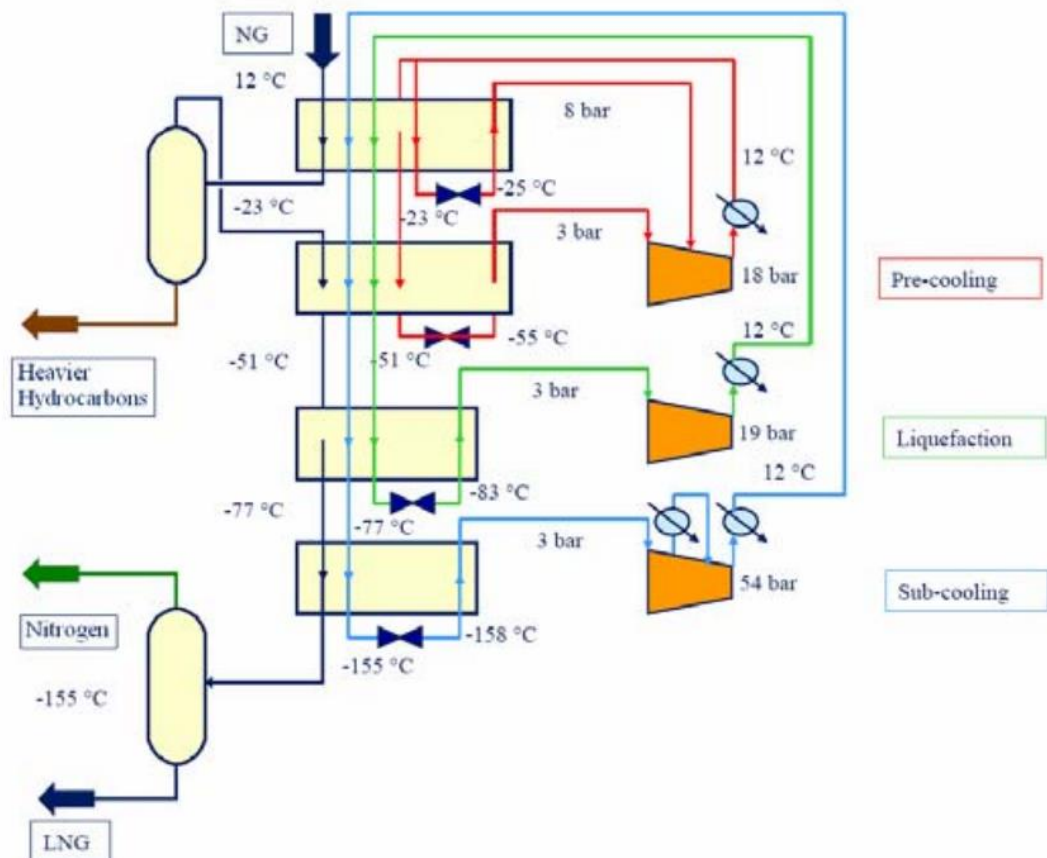


Ilustración 3.42: Esquema de la instalación de licuefacción

Nuestra incógnita principal en nuestro problema serán las masas de refrigerante de cada subciclo, para ello recopilaremos las entalpías de cada punto a las distintas temperaturas, y a través del balance en los intercambiadores obtendremos las masas de refrigerante.

Para el proceso de cálculo, empezaremos con el balance del intercambiador de la fase de subenfriamiento, continuaremos con los cálculos progresivos de los siguientes intercambiadores.

En cada intercambiador, se deberá de refrigerar una parte de gas natural, también refrigerará una parte de la MR, a la misma vez una evaporación de la MR ayudará a esa refrigeración. En la primera fase y la segunda también refrigera parte de otras MR en el intercambiador tal y como se ve en la ilustración 3.42

Las MR se compondrán de los componentes anteriormente mencionados según la fase, aun así, la proporción no siempre es la misma, para encontrar una buena

configuración de la MR realizaremos un proceso iterativo donde buscaremos una buena proporción de sus componentes que nos de la menor de la masa de refrigerante.

Cálculo de entalpías

Al no tener una sustancia pura, no disponemos de tablas o diagramas de la configuración de la MR que nos gustaría, por lo tanto, deberemos calcular nosotros y hacer nuestra propia tabla de nuestra MR.

Nuestro proceso de cálculo se basará en la obtención de la entalpía del punto para la sustancia pura y hacer la mezcla según la proporción másica de la MR. Por ejemplo, en el ciclo de subenfriamiento en el cual el ciclo se compone de N2, C1 y C2; la entalpía de la mezcla se encontrará a través de la siguiente expresión:

$$h_{MR} = X_{N2} \cdot h_{N2} + X_{C1} \cdot h_{C1} + X_{C2} \cdot h_{C2}$$

Al tener las temperaturas y presiones de los distintos puntos del sistema seremos capaces de obtener las entalpías de las sustancias puras a través de diagramas los cuales están disponibles en el *Anexo 1* del estudio.

A continuación, rellenamos las tablas para cada refrigerante puro, guiándonos por el siguiente esquema.

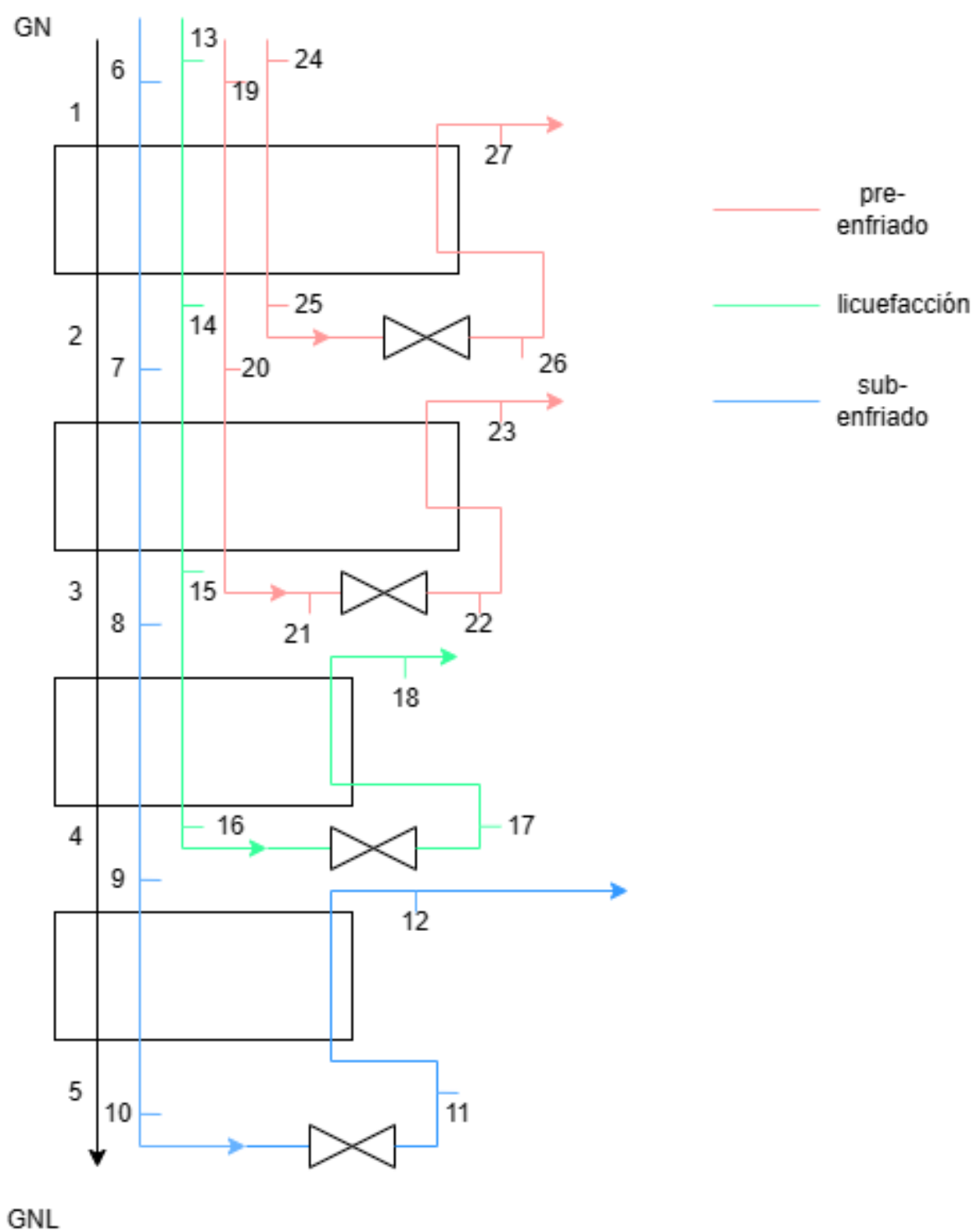


Ilustración 3.43: Esquema simplificado por puntos de la instalación

Tabla 1: Propiedades Nitrogeno (N2)

Propiedades N2			
	Presión (bar)	Temperatura (°C)	Entalpía (kJ/kg)
6	54	12	540
7	54	-23	497
8	54	-51	460
9	54	-77	430
10	54	-155	365
11	3	-158	365
12	3		330

El nitrógeno solo se presenta en el sub-ciclo de sub enfriamiento, es por eso que solo consideraremos las entalpías en esos puntos.

Tabla 2: Propiedades Metano (C1)

Propiedades C1			
	Presión (bar)	Temperatura (°C)	Entalpía (kJ/kg)
6	54	12	910
7	54	-23	810
8	54	-51	700
9	54	-77	580
10	54	-155	60
11	3	-158	60
12	3	-----	610
13	19	12	948
14	19	-23	855
15	19	-51	790
16	19	-77	750
17	3	-83	750
18	3	-----	610

Tabla 3: Propiedades Etileno (C2)

Propiedades C2			
	Presión (bar)	Temperatura (°C)	Entalpía (kJ/kg)
6	54	12	370
7	54	-23	212
8	54	-51	140
9	54	-77	70
10	54	-155	-223
11	3	-158	-223
12	3	-----	400
13	19	12	500
14	19	-23	450
15	19	-51	29.14
16	19	-77	-38.39
17	3	-----	-38.39
18	3	-----	400
19	18	12	510
20	18	-23	425
21	18	-51	28.38
22	3	-----	28.38
23	3	-----	400
24	18	12	523.35
25	18	-23	464.6
26	8	-----	464.6
27	8	-----	413.1

Tabla 4: Propiedades Propano (C3)

Propiedades C3			
	Presión (bar)	Temperatura (°C)	Entalpía (kJ/kg)
13	19	12	220
14	19	-23	140
15	19	-51	83
16	19	-77	165
17	3	-83	165
18	3	-----	550
19	18	12	218
20	18	-23	140
21	18	-51	70
22	3	-55	70
23	3	-----	550
24	18	12	220
25	8	-23	138
26	8	-25	138
27	8	-----	600

Tabla 5: Propiedades del Gas Natural (GN)

Propiedades GN						
	Presión (bar)	Temperatura (°C)	Entalpía (kJ/kg)	Entalpía C1 91.2% (kJ/kg)	Entalpía C2 6% (kJ/kg)	Entalpía C3 2.8% (kJ/kg)
1	61	12	846.21	900	348	162
2	61	-23	728.73	780	220	149
3	61	-51	639.63	690	140	69.78
4	61	-77	460.77	500	60	41.868
5	61	-155	63.76	85	-220	-20

El cálculo del GN se realiza con la composición de diseño siguiendo el proceso de cálculo anterior:

$$h_{GN,1} = 0.912 \cdot 900 + 0.06 \cdot 348 + 0.028 \cdot 162 = 846.21 \text{ kJ/kg}$$

Para el cálculo de las distintas MR procedemos a comprobar las distintas proporciones másicas en un proceso iterativo para que consigamos la máxima eficiencia. A continuación, se mostrarán las tablas de las 3 MR distintas para los puntos consecuentes del ciclo. El cálculo se mostrará en el Anexo 2 donde hemos utilizado un script sencillo para simplificar el cálculo.

Tabla 6: Propiedades Mezcla refrigerante ciclo sub-enfriamiento (MR1)

Propiedades MR1 (0.05 N2, 0.05 C1, 0.9 C2)			
	Presión (bar)	Temperatura (°C)	Entalpía (kJ/kg)
6	54	12	405.5
7	54	-23	256.15
8	54	-51	184
9	54	-77	113.5
10	54	-155	-179.45
11	3	-158	-179.45
12	3	-----	407

Tabla 7: Propiedades Mezcla refrigerante ciclo licuefacción (MR2)

Propiedades MR2 (0.1 C1, 0.1 C2, 0.8 C3)			
	Presión (bar)	Temperatura (°C)	Entalpía (kJ/kg)
13	19	12	320.8
14	19	-23	242.5
15	19	-51	148.31
16	19	-77	-60.83
17	3	-83	-60.83
18	3	-----	541

Tabla 8: Propiedades Mezcla refrigerante ciclo pre-enfriamiento (MR3)

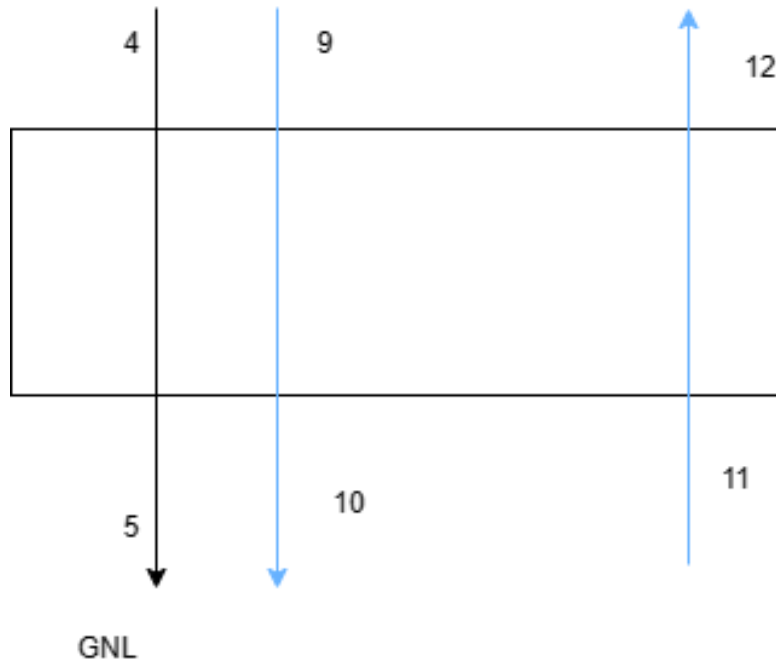
Propiedades MR3 (0.04 C2, 0.96 C3)			
	Presión (bar)	Temperatura (°C)	Entalpía (kJ/kg)
19	18	12	229.68
20	18	-23	151.4
21	18	-51	68.33
22	3	-55	68.33
23	3	-----	544
24	8	12	232.134
25	8	-23	151.06
26	3	-25	151.06
27	3	-----	592.52

Las proporciones elegidas son debidas a un cálculo posterior del balance de energía y por tanto las masas de refrigerante. Con esta configuración de las MR, conseguimos unas masas de refrigerante competitivas, mientras evitamos problemas de estado del refrigerante, como por ejemplo que se congele o que no cumpla procesos evaporativos.

Balance de energía en los intercambiadores

A través de un simple balance en cada uno de los intercambiadores podremos ir deduciendo las masas necesarias para lograr la refrigeración necesaria.

Intercambiador 1:



$$Q_{ev} = h_{12} - h_{11} = 407 - (-179.45) = 586.45 \text{ kJ/kg}$$

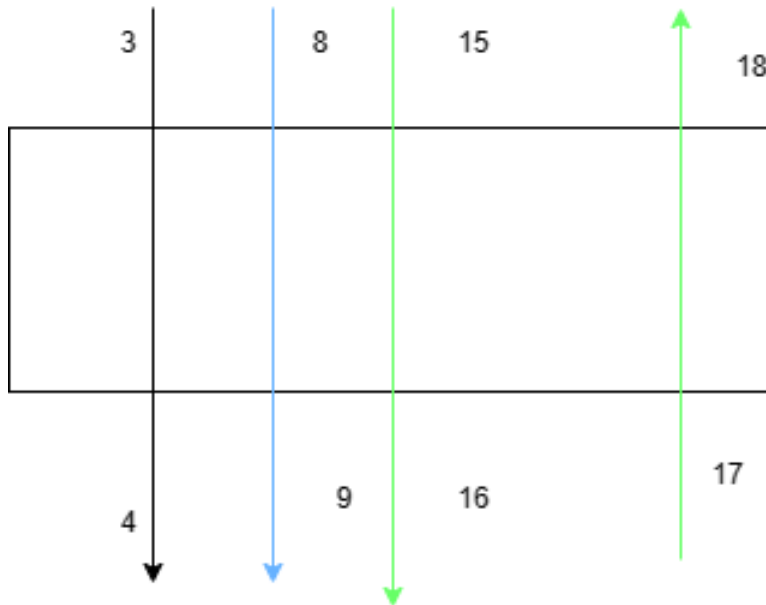
$$Q_{con} = h_9 - h_{10} = 113.5 - (-179.45) = 292.95 \text{ kJ/kg}$$

$$Q_{GNL} = h_4 - h_5 = 460.7 - 63.76 = 396.94 \text{ kJ/kg}$$

$$m_{GNL} \cdot Q_{GNL} + m_{RefI} \cdot Q_{con} = m_{RefI} \cdot Q_{ev} \rightarrow m_{RefI} = \frac{m_{GNL} \cdot Q_{GNL}}{(Q_{ev} - Q_{con})}$$

$$m_{RefI} = \frac{155.5 \cdot 396.94}{(586.45 - 292.95)} = 210 \text{ kg/s}$$

Intercambiador 2:



$$Q_{ev} = h_{18} - h_{17} = 541 - (-60.83) = 601.83 \text{ kJ/kg}$$

$$Q_{con} = h_{15} - h_{16} = 148.31 - (-60.83) = 209.14 \text{ kJ/kg}$$

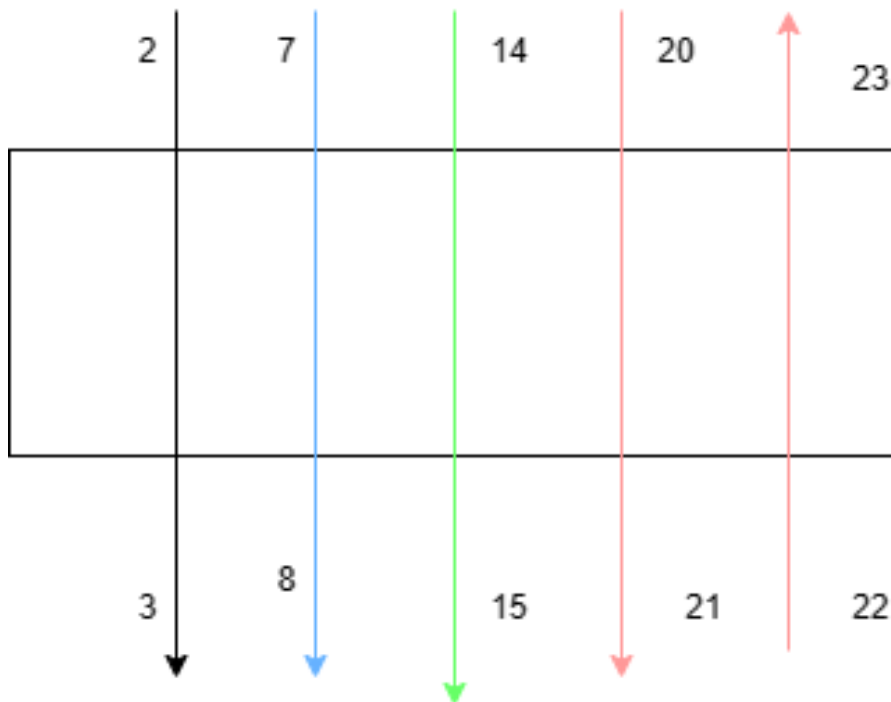
$$Q_{GNL} = h_3 - h_4 = 639.63 - 460.77 = 178.86 \text{ kJ/kg}$$

$$Q_{sub} = h_8 - h_9 = 184 - 113.5 = 70.5 \text{ kJ/kg}$$

$$\begin{aligned} m_{GNL} \cdot Q_{GNL} + m_{Ref,I} \cdot Q_{sub} + m_{Ref,II} \cdot Q_{con} &= m_{Ref,II} \cdot Q_{ev} \rightarrow m_{Ref,II} \\ &= \frac{m_{GNL} \cdot Q_{GNL} + m_{Ref,I} \cdot Q_{sub}}{(Q_{ev} - Q_{con})} \end{aligned}$$

$$m_{Ref,II} = \frac{155.5 \cdot 178.86 + 210 \cdot 70.15}{(601.83 - 209.14)} = 108.41 \text{ kg/s}$$

Intercambiador 3:



$$Q_{ev} = h_{23} - h_{22} = 544 - 68.33 = 475.67 \text{ kJ/kg}$$

$$Q_{con} = h_{20} - h_{21} = 151.4 - 68.33 = 83.07 \text{ kJ/kg}$$

$$Q_{GNL} = h_2 - h_3 = 728.73 - 639.63 = 89.1 \text{ kJ/kg}$$

$$Q_{sub} = h_7 - h_8 = 256.15 - 184 = 72 \text{ kJ/kg}$$

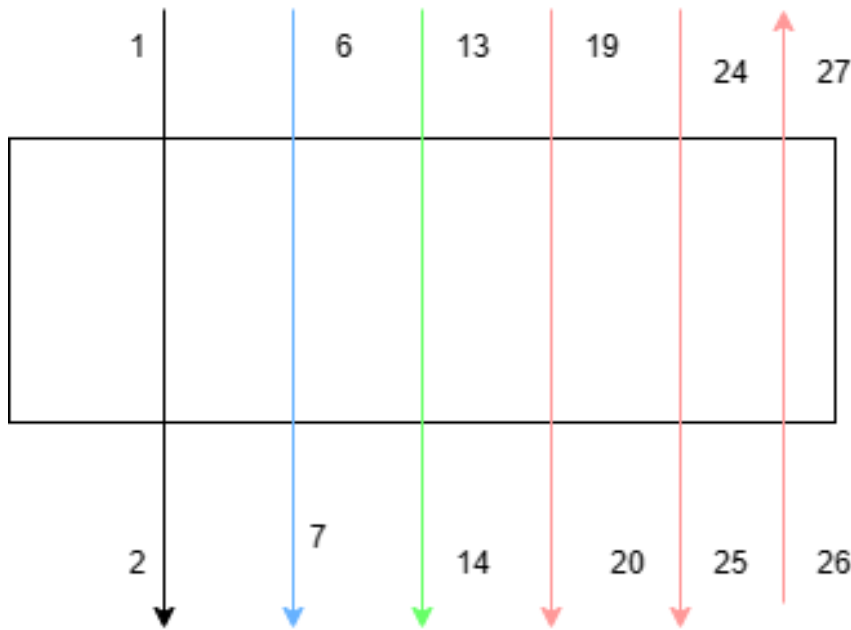
$$Q_{Liq} = h_{14} - h_{15} = 242.5 - 148.31 = 94.19 \text{ kJ/kg}$$

$$m_{GNL} \cdot Q_{GNL} + m_{Ref,I} \cdot Q_{sub} + m_{Ref,II} \cdot Q_{Liq} + m_{Ref,III\ 1} \cdot Q_{con} = m_{Ref,III\ 1} \cdot Q_{ev}$$

$$\rightarrow m_{Ref,III\ 1} = \frac{m_{GNL} \cdot Q_{GNL} + m_{Ref,I} \cdot Q_{sub} + m_{Ref,II} \cdot Q_{Liq}}{(Q_{ev} - Q_{con})}$$

$$m_{Ref,III\ 1} = \frac{155.5 \cdot 89.1 + 210 \cdot 72 + 108.41 \cdot 94.19}{(475.67 - 83.07)} = 99.83 \text{ kg/s}$$

Intercambiador 4:



$$Q_{ev} = h_{27} - h_{26} = 592.52 - 151.06 = 441.46 \text{ kJ/kg}$$

$$Q_{con} = h_{24} - h_{25} = 232.13 - 151.06 = 81.07 \text{ kJ/kg}$$

$$Q_{GNL} = h_1 - h_2 = 846.21 - 728.73 = 117.48 \text{ kJ/kg}$$

$$Q_{sub} = h_6 - h_7 = 405.5 - 256.15 = 149.35 \text{ kJ/kg}$$

$$Q_{Liq} = h_{13} - h_{14} = 320.8 - 242.5 = 78.3 \text{ kJ/kg}$$

$$Q_{pre,I} = h_{19} - h_{20} = 229.68 - 151.4 = 78.28 \text{ kJ/kg}$$

$$\begin{aligned} m_{GNL} \cdot Q_{GNL} + m_{Ref,I} \cdot Q_{sub} + m_{Ref,II} \cdot Q_{Liq} + m_{Ref,III\ 1} \cdot Q_{pre} + m_{Ref,III\ 2} \cdot Q_{con} = \\ = m_{Ref,III\ 1} \cdot Q_{ev} \end{aligned}$$

$$m_{Ref,III\ 2} = \frac{m_{GNL} \cdot Q_{GNL} + m_{Ref,I} \cdot Q_{sub} + m_{Ref,II} \cdot Q_{Liq} + m_{Ref,III\ 1} \cdot Q_{pre}}{(Q_{ev} - Q_{con})}$$

$$m_{Ref,III\ 2} = \frac{155.5 \cdot 117.48 + 210 \cdot 149.35 + 108.41 \cdot 78.3 + 99.83 \cdot 78.28}{(441.46 - 81.07)} = 182.87 \text{ kg/s}$$

El ciclo de pre-enfriado se divide en dos etapas de expansión, en las cuales el flujo de refrigerante se separa, es por eso que el flujo de la MR3 será la suma de las dos partes.

$$m_{Ref,III} = m_{Ref,III\ 1} + m_{Ref,III\ 2} = 99.83 + 182.27 = 282.1\ kg/s$$

Potencia de compresión:

Para el cálculo de la energía de compresión gastada solo tendremos que hacer un balance desde el punto de vapor saturado de nuestra MR, hasta el punto de inicial de la refrigeración a alta presión.

En nuestro ejemplo teórico, es necesario una refrigeración previa del refrigerante con elementos externos, antes de que los refrigerantes entren en la refrigeración en cascada del ciclo.

Para obtener los puntos a la salida de la compresión, deberemos hacer un proceso análogo y obtener las propiedades de cada sustancia pura en esas condiciones para el cálculo de la mezcla posteriormente.

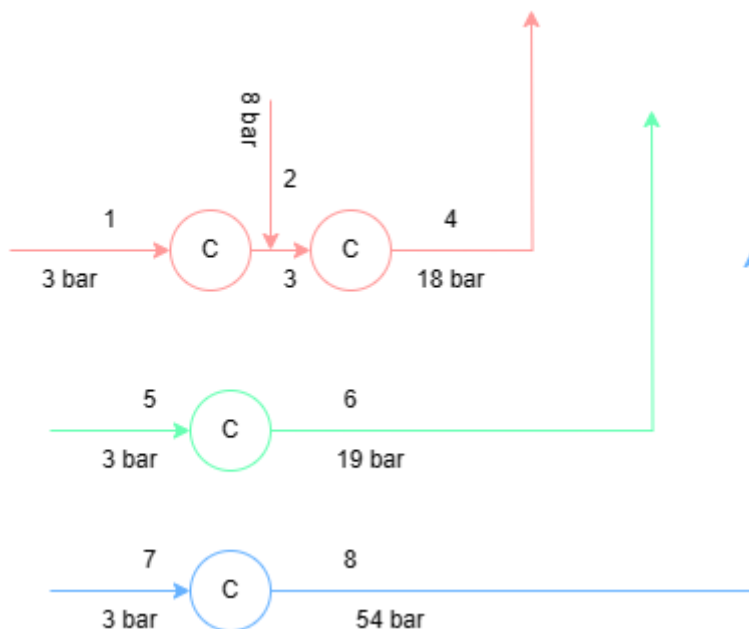


Ilustración 3.44: Esquema de fase de compresión de la instalación

Tabla 9: Propiedades refrigerantes puros (Fase Compresión)

Propiedades N2					
	Presión (bar)	Temperatura (°C)	Entalpía (kJ/kg)	Entropía (kJ/kg °K)	
7	3	----	330	2.78	
8	54	----	440	2.78	
Propiedades C1					
	Presión (bar)	Temperatura (°C)	Entalpía (kJ/kg)	Entropía (kJ/kg °K)	
7	3	-----	610	5	
8	54	-----	880	5	
5	3	-----	610	5	
6	19	-----	760	5	
Propiedades C2					
	Presión (bar)	Temperatura (°C)	Entalpía (kJ/kg)	Entropía (kJ/kg °K)	
7	3	-----	400	2.312	
8	54	-----	626	2.312	
5	3	-----	400	2.312	
6	19	-----	514.7	2.312	
1	3	-----	400	2.312	
2	8	-----	413	2.13	
3	8	-----	454		
3'	8	-----	427.55	2.199	
4	18	-----	478.3	2.199	
Propiedades C3					
	Presión (bar)	Temperatura (°C)	Entalpía (kJ/kg)	Entropía (kJ/kg °K)	
5	3	-----	550	2.4	
6	19	-----	650	2.4	
1	3	-----	550	2.4	
2	8	-----	605	2.4	

3	8	-----	600	2.368	
3'	8	-----	601.83	2.38	
4	18	-----	648	2.38	

El punto 3' pertenecerá a una mezcla a 8 bares cada una con su proporción de flujo refrigerante correspondiente.

Tabla 10: Fase compresión Sub-enfriado

Ciclo Sub enfriado				
	Presión (bar)	Temperatura (°C)	Entalpía (kJ/kg)	Entropía (kJ/kg °K)
7	3	-----	407	2.4698
8	54	-----	629.4	2.4698

Tabla 11: Fase compresión Licuefacción

Ciclo licuefacción				
	Presión (bar)	Temperatura (°C)	Entalpía (kJ/kg)	Entropía (kJ/kg °K)
5	3	-----	552.47	2.6512
6	19	-----	647.47	2.6512

Tabla 12: Fase compresión pre-enfriado

Ciclo pre enfriado				
	Presión (bar)	Temperatura (°C)	Entalpía (kJ/kg)	Entropía (kJ/kg °K)
1	3	-----	544	2.3965
2	8	-----	597.32	2.389
3	8	-----	594.16	2.365
3'	8	-----	594.85	2.3728
4	18	-----	641.212	2.3728

$$\text{Subenfriamiento} \rightarrow \dot{Q} = m_{Ref,I} \cdot (h_8 - h_7) = 210 \cdot (629.4 - 407) = 46.7 \text{ MW}$$

$$\text{Licuefacción} \rightarrow \dot{Q} = m_{Ref,II} \cdot (h_6 - h_5) = 108.41 \cdot (647.47 - 552.47) = 10.3 \text{ MW}$$

$$\begin{aligned} \text{Pre-enfriamiento} \rightarrow \dot{Q} &= m_{Ref,III,1} \cdot (h_2 - h_1) + m_{Ref,III} \cdot (h_4 - h_{3'}) \\ &= 99.83 \cdot (597.32 - 544) + 282.1 \cdot (641.212 - 594.85) = 18.4 \text{ MW} \end{aligned}$$

$$W_{TotalCompresion} = 46.7 + 10.3 + 18.4 = 75.4 \text{ MW}$$

Eficiencia

Para el cálculo de la eficiencia tendremos en cuenta la potencia frigorífica total en comparación con la potencia de compresión utilizada. Esta eficiencia será la eficiencia del ciclo.

$$\begin{aligned} N_{frigorifica} &= Q_{sub} + Q_{liq} + Q_{pre} = \\ &= 210 \cdot 586.45 + 108.41 \cdot 601.83 + 99.83 \cdot 475.67 + 182.27 \cdot 441.26 = \\ &= 316.31 \text{ MW} \end{aligned}$$

$$COP = \varepsilon = \frac{N_{frigorifica}}{W_{TotalCompresion}} = \frac{316.31}{75.4} = 4.19$$

El ciclo recién analizado no es más que un ejemplo teórico, que tiene como objetivo entender la refrigeración del gas natural en este ciclo. Con estos cálculos entendemos cómo funcionan las MR y sus propiedades mientras vemos como los ciclos en cascada se coordinan para seguir la curva de enfriamiento del gas natural. Estos cálculos son solo un ejemplo simplificado para ayudar a que entendamos lo anterior, los cálculos reales no tienen por qué coincidir con los datos mostrados ya que hay muchos factores de los cuales no tenemos información ni están relacionados con nuestro estudio. Gracias a haber hecho estas simplificaciones, somos capaces de mostrar algunos resultados representativos, si no, tendríamos que haber realizado modelos y métodos numéricos con la intención de simular el funcionamiento de la planta. Esto representa un proceso trabajoso y no es el objetivo del estudio. El estudio simplemente se centra en conseguir entender la aplicación de los procesos estudiados en plantas reales.

3.2.3. Tratamientos post-licuación

En este apartado trataremos el sistema de eliminación de productos pesados del GN, este proceso realmente no se lleva a cabo después de la licuefacción, si no que es durante el mismo proceso. Cuando el GN alcanza una temperatura de -23°C este pasa a una columna separadora donde los productos pesados se eliminan y el GN sigue su proceso de enfriamiento.

También una vez terminado el ciclo de enfriamiento del GN, cuando ya tenemos GNL, este se introduce en el sistema de eliminación de N_2 en el cual el GNL pasa por un evaporador y una nueva fase de expansión, donde la presión es reducida hasta 0.2 Bar, el 50% del GNL se evapora y se vuelve a introducir en los intercambiadores de enfriamiento, calentando al GNL que entrara en la columna de eliminación de N_2 por debajo conseguiremos que se elimine el N_2 , y se separe. El GNL restante acabará saliendo de este sistema a -160.9°C y unos 4.5 Bar, que después pasará al sistema de almacenamiento.

3.3. Balance de la Planta

A través del estudio e implementación de estos sistemas mencionados antes la planta se pone en marcha, su funcionamiento y viabilidad depende principalmente de que los sistemas se coordinen y funcionen a su máxima capacidad.

Para analizar el balance de la planta deberíamos hablar de los costes de producción y la capacidad de la planta de generar GNL. También, es necesario hablar del coste de los equipos.

Empezamos hablando de los costes de construcción de la planta, como ya hemos comentado la planta empezó con una inversión de 5000 millones de euros, en esto incluimos todos los sistemas de la planta, la captación del gas, los sistemas de eliminación de elementos innecesarios, los compresores, los intercambiadores, etc ...

La alimentación de los equipos principalmente los compresores son lo que constituirán el coste de producción de cada cantidad, según el coste de la potencia eléctrica definiremos un valor. También dependerá de accionamiento de estos grupos compresores, por ejemplo, puede ser de manera mecánica a través de un motor de

GN o con turbinas accionada por la expansión de un gas. Haciendo así que se puedan abaratar los costes en este sentido. En esta planta se usa una parte del gas natural proveniente del yacimiento para su uso como combustible en otros sistemas. También usan etapas de expansión del gas para generar energía y activar los compresores.

Para la visualización de la viabilidad de la planta centramos nuestro foco en la producción junto con los costes. Esta planta produce en un año una cantidad de 4.3 MTPA de GNL, además de 747 000 toneladas de condensado y 247 000 toneladas de gas licuado del petróleo (GLP). Con esta producción y teniendo en cuenta los costes la planta consigue fletar 70 cargos al año, esto le produce una rentabilidad positiva, ya que el proyecto está pensado para mantener la producción unos 25-30 años.

4. Conclusiones: Implementación en España

Después del análisis de la planta, una planta real y con producción actual que funciona con éxito, conseguimos entender las tecnologías estudiadas de licuefacción del gas natural.

Con el estudio del ciclo que se aplica en la planta tocamos la mayoría de tecnologías usadas en la licuefacción. Al ser un ciclo en cascada hemos podido ver como se desarrolla el flujo en distintas etapas y así poder aumentar la eficiencia de total, realizando sub-ciclos más simples y con mayor rendimiento.

Además, estos sub-ciclos implementan la otra tecnología principal en la licuefacción, la mezcla de refrigerantes. Cada sub-ciclo adquiere un fluido refrigerante diseñado expresamente para la adaptación de la capacidad frigorífica del fluido a la hora de refrigerar el GN, creado a través de una mezcla de refrigerantes puros en una proporción calculada. Con esta tecnología vemos como varían las capacidades frigoríficas dependiendo de que proporción de refrigerante puro lleven.

Al haber estudiado multitud de procesos aplicables en la licuefacción del GN podemos comparar procesos, además de elegir el más conveniente según nuestros requerimientos. Al igual que hemos estudiado una planta de gran producción, muchos

de estos procesos son aplicables a un gran rango de producciones, comprendiendo cuales de los procesos son más adaptables al tipo de producción requerida.

Con toda la información recolectada en el estudio podemos adaptar según una carga, un sistema y proceso para la generación de GNL. Como enfoque del estudio, sería de interés la implantación de una planta de GNL en España, la cual solo dispone de plantas de regasificación y que, además, simplemente es una nación importadora de este recurso. España tiene yacimientos y recursos fósiles limitados, es decir, hay pozos de este recurso, pero no con la cantidad suficiente para que la explotación de los mismos sea rentable, aun así, es una nación de paso de los gaseoductos del norte de África y controla el acceso de estos a la red europea. Sin embargo, la propia licuefacción de GN no tiene siempre como objetivo explotar un yacimiento, si no principalmente facilitar el transporte.

Es por eso que la implementación de una planta de licuefacción en España no queda tan lejos de la realidad, al haber tantas tecnologías adaptables y con el desarrollo día a día de innovaciones, es posible encontrar una solución rentable para tener en España una manera de licuar nuestro GN y así poder moverlo de manera más eficiente por nuestro territorio.

España es un lugar amplio y con mucha población repartida en todo su territorio, el abastecimiento del recurso del gas natural no está disponible para todos los habitantes de España, este servicio está reservado para los ciudadanos de grandes ciudades donde se encuentran plantas de tratamiento de GN o para las personas que puedan permitirse instalar los equipos necesarios para que el GN llegue a sus casas. A las empresas no siempre les interesa llevar a todos los sitios este servicio, puesto que no le es rentable, además, tenemos 2 archipiélagos los cuales depende principalmente de la importación para la obtención de este recurso.

La idea de conseguir que este esencial en la vida diaria llegue a toda la población de una manera asequible podría estar más cerca si conseguimos que las tecnologías de licuefacción de GN proliferen, y por tanto se abarate el transporte del mismo. A través de estas tecnologías podremos llevar el GN que ya compramos a otros países y que pasa por la península, a lugares los cuales están retirados de zonas relevantes o a las islas. Con este método de transporte incentivamos el uso del GN en más sitios,

aparte de crear un mercado nacional y no depender excesivamente de los países extranjeros.

En lo llegado a esta conclusión podemos preguntarnos por qué llega a ser más económico y más rentable esta tecnología, es decir, porque GNL y no más gaseoductos. Para argumentar nuestra premisa de incentivar el mercado y la producción de GNL podemos identificar las ventajas que este presenta respecto a su principal competidor, que además es de las técnicas más utilizadas en el transporte de esta sustancia, que es el Gas Natural Conducido, (GNC) el cual recorre gaseoductos por toda Europa. Como ventaja principal del GNL indicamos su versatilidad en el transporte, una medida que transporta mucho en poco espacio mientras que el GNC, aun estando comprimido, ocupa más espacio que el GNL. Podemos fijarnos también en que el estado de compresión añade inseguridad en el transporte, además en almacenamiento y tratamiento para su uso, el GNC tiene una clara desventaja en comparación con el GNL.

Pero realmente el factor apremiante más tenido en cuenta a la hora de su comparación, es el factor económico. Como comienzo identificamos los costes de cada método, el GNL tiene como costes principales, el tratamiento de su licuación, su extracción y su transporte; por el otro lado, el GNC le corresponde pérdidas por extracción, tratamiento de compresión y infraestructura de transporte. El método de extracción del GN es el mismo en los dos métodos por lo tanto no es un factor a tener en cuenta en la comparación.

Comparamos los procesos de licuación y compresión de los métodos en este sentido, el GNC sale de su proceso a una presión de unos 220 bares en las líneas de gaseoductos de alta presión, después hay líneas de baja presión las cuales disponen el gas a 16 bares, también se puede adaptar los conductos para obtener presiones en ese intervalo (220-16). Esto realmente no supone un gran gasto, no tiene unas consecuencias directas en el tratamiento, el GN en su extracción, aunque depende del método, suele extraerse comprimido en esos niveles de presión, por lo tanto, no requiere mucho tratamiento y por ello no mucho coste. En el proceso de licuación como ya hemos visto si requiere un tratamiento más exhaustivo, tenemos que completar los procesos de postratamiento vistos, más llevar a cabo la refrigeración del GN, esto supone el gasto principal del método de GNL.

EL proceso de transporte es el otro factor importante en el coste. Para el GNC este supone su mayor coste puesto que la conducción del recurso se hace a través de unos grandes conductos los cuales deben atravesar kilómetros de distancia cruzando países y continentes. Este supone un gran gasto a la hora de la instalación de la red de tuberías, ya que esta normalmente va enterrada, por ejemplo, el gaseoducto Nord Stream cruza el mar báltico y esto supone una gran obra y construcción, un proyecto ingenieril inmenso, estos conductos van realizándose poco a poco a través de inversiones continuas según la necesidad. Este conducto, el Nord Stream, costó una cantidad final de 7400 millones de euros. Sin embargo, el transporte del GNL se basa simplemente en el almacenaje en barriles del producto y un transporte a través de medios tradicionales como aviones trenes barcos o camiones, obviamente esto genera un coste muchísimo menor.

Para la comparación final debemos enfrentar el mayor coste del GNL con el GNC, es decir, el precio de la planta de licuación comparado con el coste del gaseoducto. La comparación es de 5000 millones de euros de la planta con 7400 millones del gaseoducto. A parte de esto comparamos las capacidades de cada uno, la planta genera 4.3 MTPA y el gaseoducto Nord Stream uno 55000 bcm/año, en términos energéticos comparamos 595000 Mwh/año del gaseoducto a 63180 Mwh/año, hay una diferencia significativa en la cantidad de energía conseguida, también es cierto que la diferencia de precio de la construcción merece la pena por el exceso de energía conseguido. El principal problema es la cantidad de tiempo que se requiere para conseguir que esa cantidad de GN, proporcionada por los gaseoductos, llegue a varios países; y aun así, no podemos llevarla al sitio que queramos. En este aspecto el GNL es más versátil y más rápido, consigues una explotación rápida y mundial de este recurso. En resumen, el GNL es más barato consiguiendo una cantidad inferior, pero es mucho más adaptable para muchos mercados y rápido abastecimiento.

Son métodos que pueden convivir, pero una inversión en el campo del GNL podría ayudar a reducir las desventajas del método, así, en España, está creciendo este campo, aun así, no disponemos de una planta para licuar el GN. Para la rentabilidad de una planta de licuefacción en España debemos situarla en un centro costero donde poder fletar buques a nuestras islas sea factible, a la misma vez que

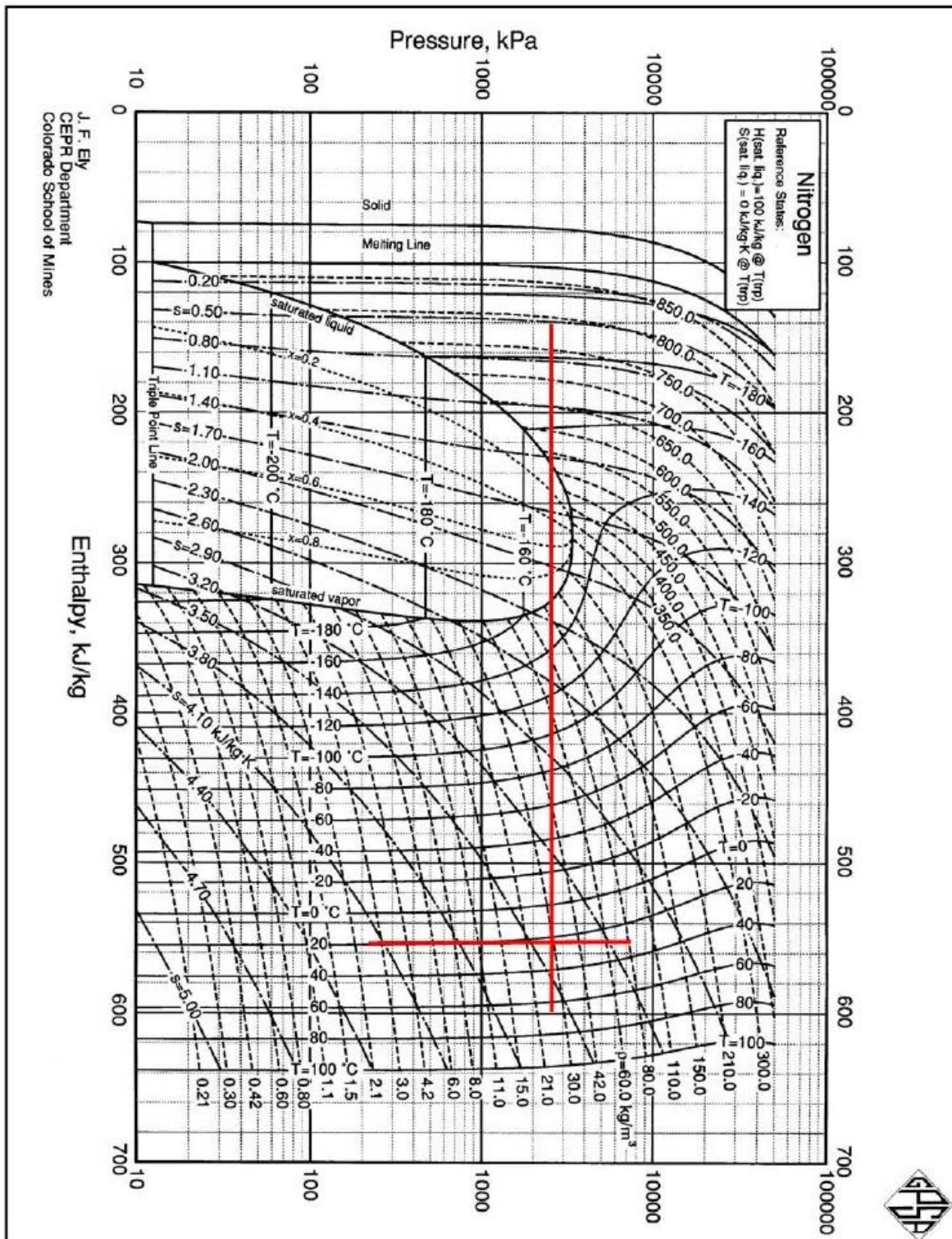
enviar camiones de este recurso a los lugares indicados. Esta planta no es necesario que tenga una gran capacidad, la suficiente para abastecer sobre todo a las islas. También podría tenerse una planta para cada costa, la costa atlántica y la mediterránea. Como hemos estudiado, hay muchas posibilidades de tecnologías para pequeñas capacidades que son muy eficientes y funcionan realmente.

A día de hoy el GN juega un gran papel en nuestras vidas, el tener más formas de transporte causa que este recurso llegue a más gente y pueda ser utilizado para mejorar nuestra vida. Una gran forma de transporte es el GNL, una tecnología relativamente reciente y que, aunque esta ya desarrollada tiene aún mucho campo de estudio y puede avanzar de manera exponencial si se invierte en ella. El GNL es la solución al transporte y logística de este recurso, es la forma de que el combustible fósil más limpio y más tratable se accese en todo el mundo, es la solución al monopolio de los grandes yacimientos y es una solución para pequeñas naciones para poder explotar sus recursos y avanzar.

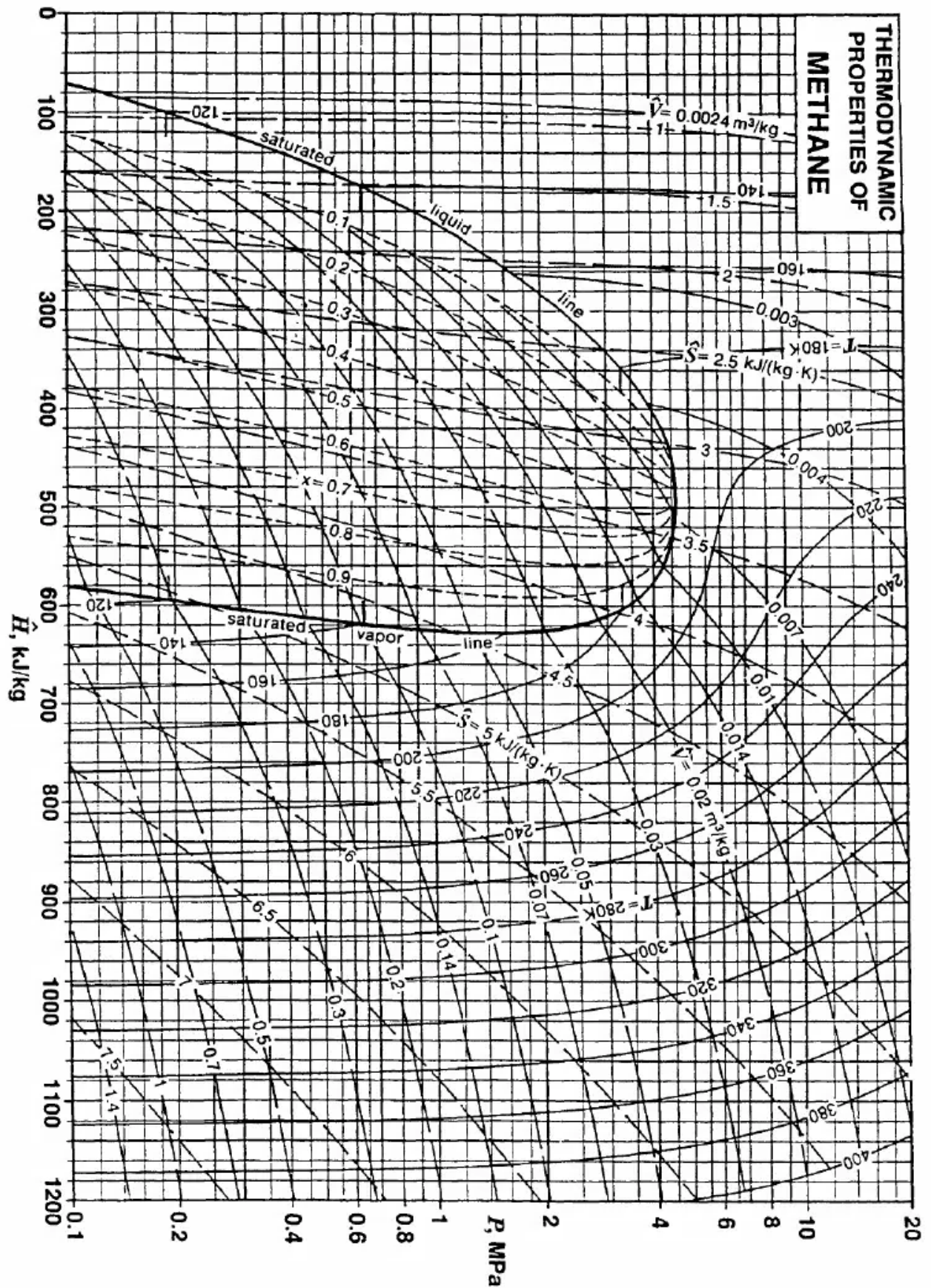
ANEXOS

Anexo 1: Diagramas P-H

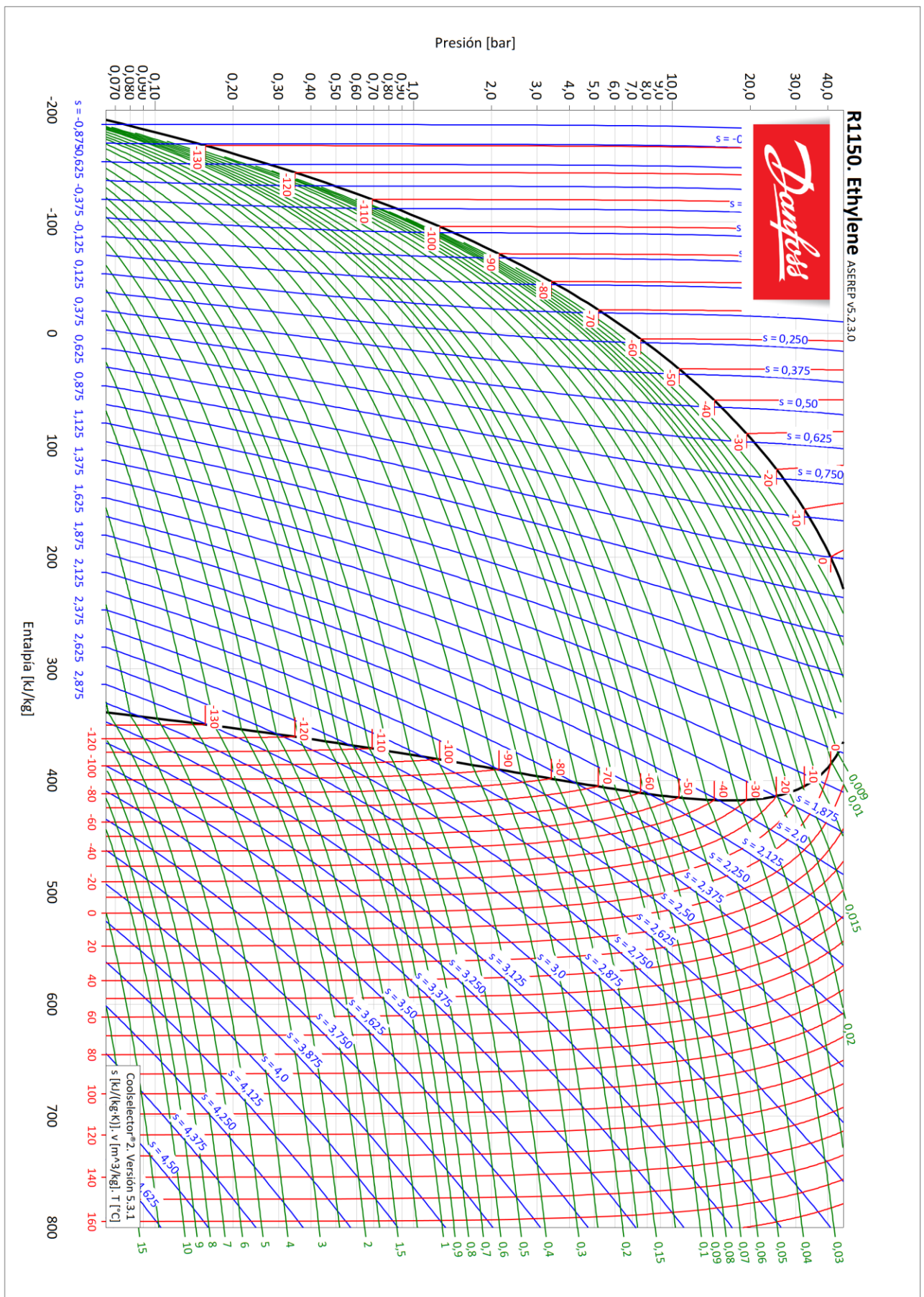
Nitrógeno (N₂)



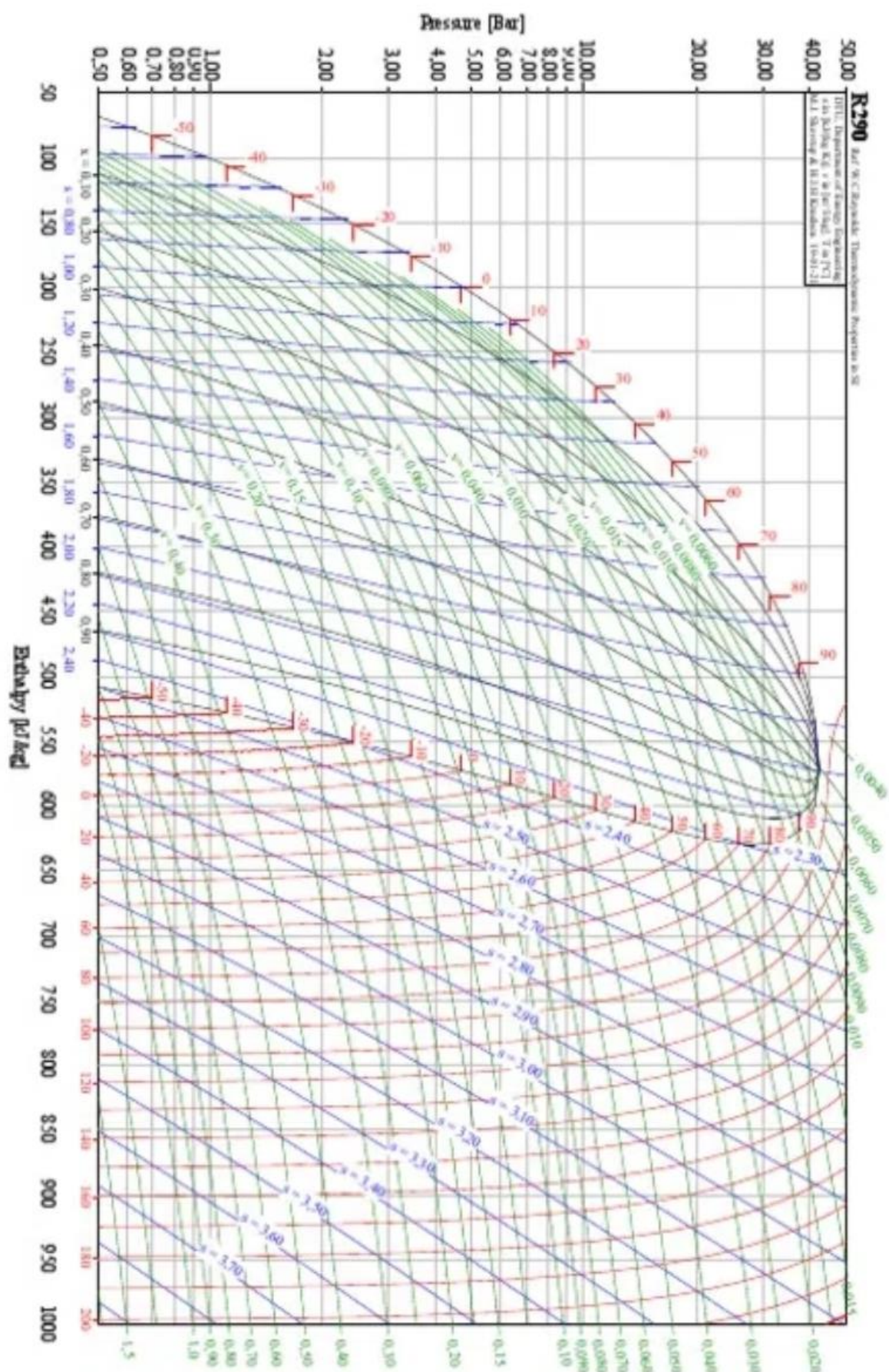
Metano (C1)



Etileno (C2, R1150)



Propano (C3, R290)



Anexo 2: Proceso de cálculo con ayuda de MATLAB

Cálculo de propiedades GN

Se usa una simple ecuación con las proporciones indicadas de GN.

Codigo:

```
%calculo de propiedades del gas natural
clear all; clc
CO2=0; C1=0.912; C2=0.06; C3=0.028; %CO2 eliminado y otros insignificantes
HCO2=0
HC1=x
HC2=x
HC3=x
HGN= (CO2*HCO2) + (C1*HC1) + (C2*HC2) + (C3*HC3)
```

Cálculo de las MR según proporción e intercambiadores

Nuestra única variable serán las proporciones en masa de refrigerante puro, que cambiamos a placer en busca del menor gasto masico de refrigerante.

Código:

```
%Cálculo completo del ciclo
clear all; clc
load TablasC1.txt;load TablasC2.txt;load TablasC3.txt;load TablasN2.txt;
Mgnl=155.5;
hC1=TablasC1; hC2=TablasC2; hC3=TablasC3; hN2=TablasN2;
%calculo MR
%MR1 y sub endriamiento
HMR1=zeros(7,1);
N2=0.05;C1=0.05;C2=0.9;C3=0;
for i=1:7
    HMR1(i,1)=(N2*hN2(i,1))+(C1*hC1(i,1))+(C2*hC2(i,1))+(C3*hC3(i,1))
end
Qev=HMR1(7,1)-HMR1(6,1);
Qcond=HMR1(4,1)-HMR1(5,1);
QGNL=460.7-63.76;
Mref1=(Mgnl*QGNL)/(Qev-Qcond)
%MR2 y licuación
HMR2=zeros(6,1)
N2=0;C1=0.1;C2=0.1;C3=0.8;
for i=1:6

HMR2(i,1)=(N2*hN2(i+7,1))+(C1*hC1(i+7,1))+(C2*hC2(i+7,1))+(C3*hC3(i+7,1))
end
Qev=HMR2(6,1)-HMR2(5,1);
Qcond=HMR2(3,1)-HMR2(4,1);
Qsub=HMR1(3,1)-HMR1(4,1);
QGNL=178.86;
Mref2=((Mgnl*QGNL)+(Mref1*Qsub))/(Qev-Qcond)
%MR3 y prerefrigeración
HMR3=zeros(9,1)
N2=0;C1=0;C2=0.04;C3=0.96;
for i=1:9

HMR3(i,1)=(N2*hN2(i+13,1))+(C1*hC1(i+13,1))+(C2*hC2(i+13,1))+(C3*hC3(i+13,1))
end
Qev=HMR3(5,1)-HMR3(4,1);
Qcond=HMR3(2,1)-HMR3(3,1);
Qliq=HMR2(2,1)-HMR2(3,1);
Qsub=HMR1(2,1)-HMR1(3,1);
QGNL=89.1;
Mref31=((Mgnl*QGNL)+(Mref1*Qsub)+(Mref2*Qliq))/(Qev-Qcond)
%prerefri 2
Qev=HMR3(9,1)-HMR3(8,1);
Qcond=HMR3(6,1)-HMR3(7,1);
Qliq=HMR2(1,1)-HMR2(2,1);
Qsub=HMR1(1,1)-HMR1(2,1);
Qpre=HMR3(1,1)-HMR3(2,1);
QGNL=117.48;

Mref32=((Mgnl*QGNL)+(Mref1*Qsub)+(Mref2*Qliq)+(Mref31*Qpre))/(Qev-Qcond)
Mref3=Mref31+Mref32
```

Cálculo de h y s de un punto para una MR

Código:

```
clear all; clc
N2=0.; C1=0; C2=0.04; C3=0.96;
HFN2=x
HFC1=x
HFC2=x
HFC3=x
HFm1=(N2*HFN2)+(C1*HFC1)+(C2*HFC2)+(C3*HFC3)
SFN2=x
SFC1=x
SFC2=x
SFC3=x
SFm1=(N2*SFN2)+(C1*SFC1)+(C2*SFC2)+(C3*SFC3)
```

Bibliografía

James G. Speight (2007). *Natural Gas: A Basic Handbook*. Editorial Gulf Publishing Company.

[Las 10 reservas de Gas Natural más grandes - Mining Press](#)

[Producción global de gas natural | Estadísticas mundiales sobre gas natural | Enerdata](#)

[El mapa del gas en Rusia - Mapas de El Orden Mundial - EOM](#)

[Usos del Gas Natural ¿Cuáles son sus Aplicaciones? \(preciogas.com\)](#)

G. Venkatarathnam (2008). *CRYOGENIC MIXED REFRIGERANT PROCESSES*. Editorial Springer

M^a Teresa Sánchez y Pineda de las Infantas (2008). *Ingeniería del Frío: Teoría y Práctica*. Editorial Springer

[Sistema de Linde-Hampson - Wikiwand](#)

Guglielmo Ventura and Lara Risegari. *The Art of Cryogenics*. Editorial Elsevier

Saeid Mokhatab, John Y. Mak, Jaleel V. Valappil. *Handbook of Liquefied Natural Gas*. Editorial Elsevier

[Snøhvit LNG Plant – Mechademy](#)

Anders Lauvdal. *Mass balance model for Hammerfest LNG plant Snøhvit*. Norwegian University of Science and Technology

[LNG-technology tcm19-4577.pdf \(linde-engineering.com\)](#)

Jose M.Palomar Carnicero y Fernando Cruz Peragón. *Apuntes de Teoría de Maquinas Termicas*. Universidad de Jaén

