



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ

EVALUACIÓN DEL AHORRO DE ENERGÍA DE LOS MOTOCOMPRESORES DE GAS RESIDUAL GB-5 DE LA PLANTA CRIOGÉNICA EN EL CPG LA VENTA.

REPORTE FINAL DE RESIDENCIA PROFESIONAL QUE PRESENTA:

DANA BELÉN CHIÑAS BARRIOS

Como requisito para acreditar la Residencia Profesional de la Licenciatura en:

INGENIERIA QUÍMICA

ASESORES:

ROBERTO DAVID VÁZQUEZ SOLÍS
RAFAEL GUADALUPE CRUZ JIMÉNEZ

REVISORES:

AZALEA GEORGINA GARCÍA CRUZ
JOSÉ FRANCISCO MARTÍNEZ



Tuxtla Gutiérrez, Chiapas
Enero de 2024





AGRADECIMIENTOS

En este momento de culminación, deseo expresar mi sincero agradecimiento a quienes contribuyeron significativamente en este nuevo logro.

En primer lugar, elevo mi gratitud a Dios, fuente inagotable de sabiduría y guía, por haberme acompañado en cada paso de esta travesía, por brindarme la inteligencia, el conocimiento y la fuerza de voluntad que me ha permitido avanzar con determinación. Su infinita misericordia ha sido un faro que ilumina mi camino, guiándome a lo largo de desafíos y éxitos.

A mis padres, les dedico un agradecimiento sincero y profundo. Su apoyo incondicional ha sido la piedra angular de mi éxito. Gracias por proporcionarme los recursos necesarios para alcanzar mis metas y por las palabras de aliento y motivación. Su sacrificio y dedicación han sido el cimiento sobre el cual construí cada logro.

A mi hermana, por ser mi compañía incondicional, por los momentos de respiro y por el apoyo constante. Gracias por celebrar mis logros como triunfos propios.

A mis mentores que de una forma u otra extendieron su mano amiga, y compartieron conmigo su experiencia y conocimiento.

Con gratitud,

Dana Belén Chiñas Barrios



RESUMEN

Este proyecto se enfoca en evaluar el control operativo y la eficiencia energética de los motocompresores GB-5 del Complejo Procesador de Gas La Venta. Durante un mes de monitoreo, se analizaron variables clave del equipo utilizando gráficas de control de Shewhart. Además, se aplicó un análisis de exergía para evaluar la eficiencia termodinámica del proceso de compresión. La elección del modelo politrópico en el análisis se basó en la práctica de la ingeniería y la representación más realista del comportamiento de un compresor centrífugo en condiciones reales; mientras que el modelo adiabático asume condiciones ideales sin pérdidas de calor y fricción, el modelo politrópico permite tener en cuenta ciertas pérdidas, ofreciendo así una representación más precisa en la industria. Los resultados proporcionaron índices detallados de eficiencia mecánica y termodinámica demostrando que las variables operaron dentro de las condiciones esperadas.

El proyecto culmina en un sistema de informes mensuales, destacando competencias desarrolladas en áreas técnicas, analíticas, de gestión y seguridad. Este enfoque integral contribuye a la eficiencia operativa y sostenibilidad en el complejo, brindando una evaluación precisa y aplicada del rendimiento de los motocompresores GB-5.

Palabras clave: eficiencia energética, motocompresor, exergía, politrópico, adiabático.



ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	1
RESUMEN	2
CAPÍTULO I	9
1.1 INTRODUCCIÓN.....	10
1.2 DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA.....	10
1.2.1 Pemex Gas y Petroquímica Básica (PGPB).....	11
1.2.2 Complejo Procesador de Gas La Venta (CPGLV)	12
1.2.2.1 Proceso productivo de la Planta Criogénica en el CPGLV	12
1.3 PROBLEMAS A RESOLVER	21
1.4 OBJETIVOS.....	22
1.4.1 Objetivo general	22
1.4.2 Objetivos específicos	22
1.5 JUSTIFICACIÓN	22
CAPÍTULO 2	24
2.1 INTRODUCCIÓN A LOS MOTOCOMPRESORES DE GAS NATURAL	25
2.1.1 Compresión de un gas	25
2.1.1.1 Primera Ley de la Termodinámica.....	25
2.1.1.2 Compresores de gas natural.....	27
2.1.1.3 Proceso de compresión por etapas.....	29
2.1.2 Definición y función de los motocompresores	32
2.1.3 Características del gas natural.....	33
2.1.3.1 Propiedades y Comportamiento del Gas Natural.	33
2.1.3.2 Composición del Gas Natural	35
2.1.3.3 Poder Calorífico	37
2.1.3.4 Usos del gas natural	39
2.1.3.5 Efectos de los contaminantes en los proceso	40
2.2 EFICIENCIA ENERGÉTICA EN SISTEMAS DE COMPRESIÓN	41
2.2.1 Procesos de compresión	41
2.2.1.1 Proceso isotérmico.....	42



2.2.1.2	Proceso politrópico	43
2.2.1.3	Proceso isentrópico	43
2.2.1.4	Minimización del trabajo del compresor	43
2.2.2	Medición de la eficiencia energética de un compresor	45
2.2.2.1	Condiciones de funcionamiento.....	46
2.2.2.2	Proceso de compresión multietapa sin enfriamiento intermedio..	49
2.2.3	Estrategias para mejorar la eficiencia energética	54
2.2.4	Impacto ambiental y económico.....	56
2.2.5	Sistema de Gestión de Energía ISO 50001	57
2.2.5.1	Beneficios de la implantación	57
2.2.5.2	Ciclo PHVA	59
2.3	PRINCIPIO Y FUNCIONAMIENTO DE COMPRESORES CENTRIFUGOS.....	60
2.3.1	Selección de compresores centrífugos.....	65
2.3.2	Compresores centrífugos de etapas múltiples.....	66
2.3.3	Auxiliares para compresores centrífugos.....	68
2.4	INGENIERÍA DE DETALLE DEL MOTOCOMPRESOR GB-5.....	69
2.4.1	Descripción general del conjunto e instrucciones para su uso.....	69
2.4.1.1	Descripción general del conjunto eléctrico del compresor	69
2.4.1.2	Material de los principales componentes.....	69
2.4.1.3	Pesos aproximados de las piezas principales componentes.....	70
2.4.2	Descripción de los distintos componentes	70
2.4.2.1	Compresor centrifugo de gas	70
2.4.2.2	Engranaje de aumento de velocidad.....	72
2.4.2.3	Motor eléctrico.....	73
2.4.3	Curvas características y dibujos del equipo	74
2.5	GUÍA TÉCNICA DE CONFIABILIDAD OPERACIONAL PARA LA MEJOR PRÁCTICA: VENTANAS OPERATIVAS.....	77
2.5.1	Disposiciones generales	78
2.5.1.1	Objetivo	78
2.5.1.2	Alcance	78



2.5.1.3	Ámbito de aplicación y normativa	78
2.5.1.4	Definiciones	78
2.5.1.5	Abreviaturas	79
2.5.2	Disposiciones específicas.....	80
2.5.2.1	Introducción	80
2.5.2.2	Desarrollo	82
2.5.2.3	Ejecución y seguimiento.....	86
2.5.2.4	Herramientas informáticas.....	86
2.5.2.5	Entregables.....	87
2.5.3	Disposiciones finales	87
2.5.3.1	De la Interpretación.	87
2.5.3.2	De la Supervisión y Control.	87
CAPÍTULO 3	88
3.1	CONTROL OPERATIVO DEL COMPRESOR.....	89
3.1.1	Generación de gráficas.....	90
3.1.2	Inclusión de Límites Seguros de Operación (LSO).....	90
3.1.3	Representación de Condiciones Esperadas de Operación (CEO).....	90
3.1.4	Análisis de tendencias y desviaciones.....	91
3.1.4.1	Índices de Control de Proceso.....	91
3.1.4.2	Ventana Estadística (V.E).....	93
3.1.5	Acciones correctivas y optimización	93
3.1.6	Documentación y reportes.....	94
3.2	EVALUACIÓN ENERGÉTICA DEL COMPRESOR.....	94
3.2.1	Factor de compresibilidad	95
3.2.2	Flujo volumétrico actual.....	97
3.2.3	Densidad, ρ	98
3.2.4	Relación de presiones.....	100
3.2.5	Calor específico a presión constante, C_p	100
3.2.6	Calor específico a volumen constante, C_v	101
3.2.7	Exponente adiabático, γ	102



3.2.8	Exponente politrópico, n	102
3.2.9	Eficiencia isentrópica de compresión, η_{isen}	102
3.2.10	Eficiencia politrópica de compresión, η_{poli}	103
3.2.11	Trabajo de compresión ideal, W_s	103
3.2.12	Trabajo de compresión real, W_c	104
3.2.13	Eficiencia mecánica	104
3.2.14	Eficiencia global del motocompresor GB-5	105
CAPÍTULO 4		106
4.1	TENDENCIA DE LAS VARIABLES CLAVE	109
4.1.1	Descripción de resultados	109
4.1.2	Interpretación de resultados	110
4.2	ÍNDICES DE CONTROL DE PROCESO	111
4.2.1	Descripción de resultados	111
4.2.2	Interpretación de resultados	113
4.3	EFICIENCIAS ENERGÉTICAS	115
4.3.1	Descripción de resultados	115
4.3.2	Interpretación de resultados	116
CAPÍTULO 5		118
5.1	CONCLUSIÓN	119
5.2	RECOMENDACIONES	120
CAPÍTULO 6		122
CAPÍTULO 7		126
CAPÍTULO 8		129
8.1	CARTA DE AUTORIZACIÓN PARA LA TITULACIÓN	130
8.2	FOTOS DURANTE LA ESTADÍA	131

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1.	Diagrama de proceso de la Planta Criogénica del CPGLV	19
Ilustración 2.	Diagrama P-V de un proceso de compresión	25
Ilustración 3.	Sistema de un gas con pistón móvil	26



Ilustración 4. Transferencia de calor en un sistema de gas.	27
Ilustración 5. Trabajo en un sistema de gas.....	27
Ilustración 6. Transformación politrópica en un diagrama P-V.	28
Ilustración 7. Esquema de un proceso de compresión por etapas.....	29
Ilustración 8. Diagrama presión-volumen de una compresión en etapas.	30
Ilustración 9. Motocompresor centrífugo de gas natural.....	32
Ilustración 10. Diagrama P-V de los procesos de compresión.....	45
Ilustración 11. Compresión multietapa sin enfriamiento intermedio.	49
Ilustración 12. Alcance del Sistema de Gestión de la Energía.	59
Ilustración 13. Límites de funcionamiento de los compresores en la IPQ.....	60
Ilustración 14. Flujo de gas en un compresor centrífugo.	61
Ilustración 15. La resistencia al flujo se debe sólo a la fricción.	62
Ilustración 16. La contrapresión fija requiere control cuidadoso.....	62
Ilustración 17. El control antioscilación maneja la contrapresión fija.	62
Ilustración 18. Configuración de sellos.	63
Ilustración 19. Impulsores de una etapa para compresores.	66
Ilustración 20. Impulsores en serie de un compresor centrífugo múltiple.	67
Ilustración 21. Sistema de lubricación de un compresor centrífugo.	68
Ilustración 22. Disposición de compresor centrífugo con salida por debajo.....	68
Ilustración 23. Rangos de Operación.	80
Ilustración 24. Ventanas Operativas.	83
Ilustración 25. Gráfico Shewhart.....	84
Ilustración 26. Ejemplo: Registro de la tendencia de Pdesc de GB-5.	90
Ilustración 27. Curva de diseño de densidad para el motocompresor GB-5.....	99
Ilustración 28. Curva de diseño de Cp para el motocompresor GB-5.....	101
Ilustración 29. Exponente politrópico en Aspen HYSYS V10.....	102

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Simbología del diagrama de proceso.	20
Tabla 2. Nomenclatura de equipos de la Planta Criogénica.	21
Tabla 3. Propiedades físicas y químicas del gas natural.	34
Tabla 4. Componentes encontrados en la composición del gas natural.	36
Tabla 5. Composición aproximada del gas natural.	36
Tabla 6. Densidad relativa de gases combustibles.....	37
Tabla 7. Poder Calorífico de combustión de gases puros.	39
Tabla 8. Aplicaciones del gas natural.	40
Tabla 9. Tipos de sello y límites normales de presión.	63



Tabla 10. Sistema de confiabilidad de Pemex.....	77
Tabla 11. Nivel de riesgo vs. Límites de la variable de proceso.....	81
Tabla 12. Ventanas Operativas del motocompresor GB-5.	90
Tabla 13. Composición del gas natural seco procesado por GB-5.....	95
Tabla 14. Tabulación de datos de densidad vs. T del gas natural seco.....	99
Tabla 16. Tabulación de datos de Cp vs. T del gas natural seco.	101



CAPÍTULO I

GENERALIDADES DEL PROYECTO



1.1 INTRODUCCIÓN

En la búsqueda inalcanzable por mejorar la eficiencia energética y reducir el impacto ambiental de las operaciones industriales, la evaluación y optimización de los sistemas de compresión de gas se ha convertido en una prioridad ineludible. En este contexto, el presente proyecto se enfoca en un componente crítico de la planta criogénica del CPG La Venta: los motocompresores de gas residual (seco) GB-5.

En el complejo y dinámico mundo de la industria procesadora de gas natural, las plantas criogénicas desempeñan un papel esencial. Estas instalaciones son el epicentro de la transformación industrial del gas natural húmedo en productos de alto valor y pureza, como los licuables o condensados de éste. Su función, por lo tanto, es un engranaje fundamental en la cadena de suministro energético global.

La importancia de evaluar las eficiencias energéticas de los motocompresores radica en múltiples factores. La planta criogénica, en su proceso de licuefacción, requiere considerables cantidades de energía para operar a temperaturas extremadamente bajas. El rendimiento energético de los motocompresores GB-5s' utilizados para comprimir el gas seco generado durante el proceso criogénico, plantea interrogantes que requieren una evaluación meticulosa, puesto que en esta fase puede tener un impacto directo en los costos de producción y, por ende, en la competitividad de la industria del gas natural.

El objetivo principal de este proyecto recae en el análisis y evaluación energética de los motocompresores GB-5, así como la formulación de estrategias destinadas a maximizar la eficiencia energética de este equipo y constatar un control operacional seguro dentro de los límites permitidos.

1.2 DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA





Petróleos Mexicanos (PEMEX) es una empresa estatal productora, transportista, refinadora y comercializadora de petróleo y gas natural mexicana. Cuenta con un régimen individual constitucional denominado empresa productiva del estado para la explotación de los recursos energéticos en territorio mexicano, aunque también cuenta con diversas operaciones en el extranjero, principalmente de comercialización, operaciones financieras y servicios petroleros periféricos.

Petróleos Mexicanos fue establecido a través de un decreto del Congreso de la Unión el 7 de junio de 1938, y oficialmente comenzó sus operaciones el 20 de julio del mismo año. Pemex, junto con sus cuatro Organismos Subsidiarios opera como una entidad descentralizada dentro de la Administración Pública Federal de los Estados Unidos

Mexicanos, y en conjunto, conforman la principal industria petrolera de México (PEMEX, 2014).

La actividad de Pemex está principalmente regulada por la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, la Ley Reglamentaria del Artículo 27 Constitucional en el Ramo del Petróleo (conocida como la "Ley Reglamentaria") y la Ley de Petróleos Mexicanos, junto con su respectivo reglamento. Estas leyes establecen que el Estado tiene la responsabilidad exclusiva de llevar a cabo actividades en el ámbito estratégico del petróleo, demás hidrocarburos y la petroquímica básica, a través de Petróleos Mexicanos y sus Organismos Subsidiarios (Montejano, 2008).


Con fecha 21 de marzo del año 2012, el Ejecutivo Federal a través del Diario Oficial de la Federación expidió el decreto que tiene por objeto establecer la estructura, el funcionamiento y el control de los Organismos Subsidiarios de Petróleos Mexicanos. Dichas entidades paraestatales son organismos públicos descentralizados con fines productivos, de carácter técnico, industrial y comercial, con personalidad jurídica y patrimonio propios, subsidiarios de Petróleos Mexicanos, agrupados en el sector coordinado por la Secretaría de Energía. Dichos Organismos son controlados y consolidados y tienen el carácter de subsidiarios con respecto a Petróleos Mexicanos. Los Organismos Subsidiarios son:

-  PEMEX-Exploración y Producción ("PEP").
-  PEMEX-Refinación ("PR").
-  PEMEX-Gas y Petroquímica Básica ("PGPB").
-  PEMEX-Petroquímica ("PPQ").

1.2.1 Pemex Gas y Petroquímica Básica (PGPB)

El subsidiario PGPB procesa el gas natural, elabora productos petroquímicos básicos y gas licuado en sus diez Centros Procesadores de Gas (CPG) ubicados en diferentes puntos del territorio nacional, siendo éstos: Cactus en Chiapas; Matapionche, Poza Rica, y área Coatzacoalcos en Veracruz; Nuevo Pemex, **La Venta** y Cd. Pemex, en Tabasco; y, Arenque, Burgos y Reynosa en Tamaulipas. Cabe señalar que el CPG área Coatzacoalcos está conformado, a su vez, por Pajaritos, Morelos y La Cangrejera.

En sus centros procesadores, Pemex Gas y Petroquímica Básica produce gas seco (mejor conocido como gas natural), gas licuado, etano, azufre y gasolinas naturales. La producción de algunos de ellos es apoyada por las refinerías, que son parte de la estructura de Pemex Refinación. La cadena industrial de PGPB consiste en tres procesos básicos:

-  **Endulzamiento:** se eliminan gases ácidos y se recupera azufre que posteriormente se coloca en el mercado nacional e internacional.

- 🔥 **Recuperación de licuables vía plantas criogénicas:** se producen gas seco e hidrocarburos líquidos.
- 🔥 **Fraccionamiento de hidrocarburos:** de la corriente de hidrocarburos líquidos proveniente de las plantas criogénicas se separan el etano, el gas licuado y las gasolinas naturales.

Los productos de PGPB se transportan a sus centros de consumo principalmente a través de ductos, barcos, autotanques y carrotanques (Sáenz, 2011).

1.2.2 Complejo Procesador de Gas La Venta (CPGLV)

El Complejo Procesador de Gas La Venta se encuentra ubicado en la zona sureste de la República Mexicana, en la población La Venta, municipio de Huimanguillo, Tabasco, cuenta con una superficie total de 71 hectáreas, mientras que la superficie total construida es de 42 hectáreas aproximadamente. En los esfuerzos desplegados por Petróleos Mexicanos para el aprovechamiento integral de los yacimientos petrolíferos se construyó el “Complejo Procesador de Gas La Venta”, inicialmente denominado “Unidad Petroquímica La Venta”, fue construido en el año 1963 para procesar el gas húmedo dulce proveniente de los distritos de Agua Dulce, Activo de Producción 5 Presidentes de Pemex Exploración y Producción y de las endulzadoras de Cd. Pemex y Cactus (Morales, 2021).

La planta criogénica del CPGLV fue diseñada para procesar 182 MMPCD de gas natural conteniendo 80.07% mol de metano, 10.65% mol de etano, 0.25% mol de CO₂, 5.51% mol de propano y 3.52% mol de una mezcla de butano e hidrocarburos más pesados. El condensado y/o producto final de la planta criogénica es bombeado a los Complejos del área Coatzacoalcos.

1.2.2.1 Proceso productivo de la Planta Criogénica en el CPGLV

La planta fue diseñada para operar en forma continua con un factor de servicio de 95% mínimo.

La alimentación procede de las endulzadoras de Cd. Pemex, Cactus y de las compresoras ya existentes en La Venta, está saturada con agua a las condiciones de entrada de 550 lb/pulg² man. (37.9 kg/cm²) Y 100 °F (37.7 °C).

El condensado de la planta criogénica es bombeado a los Complejos del área Coatzacoalcos, vía una línea existente de 8”.

El gas residual de la planta criogénica es dividido en dos corrientes: una corriente de 21.7 MMPCD provee gas combustible a las compresoras ya existentes en el CPG La Venta y

el resto (131.1 MMPCD) es recomprimido a 854 lb/pulg² man. (60.04 kg/cm²) para entrar al gasoducto hacia la Ciudad de México.

El proceso criogénico se fundamenta en la propiedad física del gas (punto de condensación) que permite obtener los hidrocarburos licuables a partir del subenfriamiento del mismo.

Se divide en las siguientes etapas:

1. Recepción de materia prima.
2. Separación.
3. Compresión y deshidratación del gas húmedo.
4. Enfriamiento y expansión.
5. Destilación.
6. Compresión y recompresión de gas seco.
7. Bombeo de etano plus (C2+) al CPG Área Coatzacoalcos.

Descripción de las etapas:

1. Recepción de materia prima.

El CPG CD. PEMEX suministra gas húmedo marino y gas húmedo terciario. Por parte del CPG Cactus, se recibe gas húmedo mezosoico.

Se cuenta con un patín de medición SCADA FT-60 el cual consta de 2 trenes de medición y un tren maestro.

También procesa el gas húmedo terciario del Activo de Producción Cinco Presidentes, cuyos gasoductos llegan al área de Trampas Oriente y Sur. Estos ductos llegan a un cabezal y entran a un sistema de separación, filtración y medición de gas terciario (SCADA propiedad de PEP) del patín. El gas sale a través de una tubería de 16" y se interconecta a la tubería de 24" que constituye la alimentación principal a la planta Criogénica.

Existe la opción a la salida del patín de gas terciario, de desviarlo directamente a la succión de las máquinas reciprocantes, pudiendo bloquear el desvío al cabezal de 24".

2. Separación

El gas llega al separador FA-0 el cual se encuentra anterior al límite de baterías, permitiendo la separación de condensados y agua libre. Pasa enseguida a través de una tubería de 16" a un tubo de medición (FR-80), dirigiéndose al separador trifásico FA-1. Los condensados son enviados al separador FA-6 A/B mediante la válvula automática LCV-2.

Generalmente, cuando el CPG Cactus alinea gas húmedo, llegan condensados con un alto contenido de contaminantes. Este evento ocasiona falla en el funcionamiento de los indicadores magnéticos de nivel, y transmisores de presión diferencial, entre otros.

3. Compresión y deshidratación del gas húmedo

Compresión

El gas alimentado a la planta a 550 lb/pulg² man. (37.9 kg/cm²) es primero comprimido hasta 665 lb/pulg² man. (46.7 kg/cm²) en el compresor GB-1 (éste usa la energía obtenida por el turboexpansor GC-1) y sigue a un calentamiento en el intercambiador de calor EA-1 (intercambia calor con gas seco de la descarga de los GB-5s'), posteriormente pasa a través del rehervidor EA-2 de la demetanizadora.

Como el gas de entrada está saturado con agua y a la temperatura de rocío de los hidrocarburos más pesados; al enfriar a 70 °F (21.1 °C) y 665 lb/pug² man. (46.7 kg/cm²), se condensa una parte de hidrocarburos y agua. Esta mezcla de hidrocarburos, agua y vapor de gas natural se separan en el tanque separador del gas de alimentación a deshidratadores FA-5, el cual tiene control de nivel de interfase para separar el agua de los hidrocarburos, que son enviados a los tanques separadores de producto líquido FA-6 A y B; donde por una evaporación instantánea en dos etapas se reduce el contenido de metano en el líquido hasta 6.8 mol%. El líquido obtenido se bombea al tanque de almacenamiento de producto terminado FA-9 y el vapor se envía al cabezal de gas combustible.

El vapor de gas natural que sale del tanque separador FA-5 fluye a cualquiera de los dos deshidratadores de gas de alimentación, los FA-2A y B, donde es deshidratado hasta una temperatura de rocío del agua de -150 °F (101.1 °C), o menos para prevenir cualquier congelamiento o problemas de formación de hidratos que de otro modo se encontraría en una planta criogénica.

Uno de los dos deshidratadores está en servicio mientras que el otro se regenera.

La regeneración, se llevaba en cinco etapas: depresurización, calentamiento, enfriamiento, presurización e igualación. El uso del gas residual seco de la misma planta criogénica da como resultado una regeneración muy efectiva. El empaque de diseño consiste en alúmina activada grado A de Pechiney Saint-Gobain.

Deshidratación

El gas húmedo libre de condensados entra a los deshidratadores FA-2AC/BD en donde se elimina el agua hasta un valor inferior a 0.1 ppm en volumen.

Normalmente, un deshidratador se encuentra en servicio, y el otro se encuentra en regeneración.

En el control distribuido se cuenta con un analizador en línea de humedad marca PANAMETRICS, el cual permite el monitoreo de la humedad del gas que entra al tren de enfriamiento.

Cada deshidratador cuenta con un manómetro de presión diferencial, el cual permite conocer el grado de saturación alcanzada por el material desecante contenido en los deshidratadores (alúmina activada y malla molecular). Conforme el deshidratador se va saturando de humedad en la etapa de servicio, la presión diferencial se incrementa.

Las corrientes de entrada y salida de gas de los deshidratadores cuentan con termopares, cuya señal llega a una consola pirométrica instalada en el cuarto de control. De esta forma el Tablerista monitorea las temperaturas de regeneración y enfriamiento de los deshidratadores. Captura los datos en una hoja de Excel lo que permite generar las gráficas de regeneración.

Para la regeneración de los deshidratadores se cuenta con un PLC Programador FlexLogix de Allen Bradley, el cual permite el cierre-apertura de 16 válvulas de mariposa con actuadores de doble efecto.

Las etapas de la regeneración son:

1. Depresionamiento
2. Regeneración
3. Enfriamiento
4. Presionamiento
5. Igualación y cambio

El Control Distribuido cuenta con una pantalla de visualización en el que está integrado el subsistema de Deshidratación de gas húmedo, mismo que permite tener monitoreo y control sobre los deshidratadores en servicio y en regeneración, así como de los hornos BA-1 y BA-2.

4. Enfriamiento y expansión

Al salir de los deshidratadores, el gas húmedo entra al tren de enfriamiento el cual está constituido por 6 intercambiadores de calor conectados en serie. El gas húmedo fluye a través de la fluxería intercambiando calor con propano líquido en la coraza de los EA-4 y EA-6 (el cual se somete a un cambio de fase durante el intercambio de calor), con gas seco del domo de la torre demetanizadora DA-1 en la coraza de los EA-3, EA-5 y EA-7. Y

finalmente, con los líquidos criogénicos recuperados durante el tren de enfriamiento en el EA-8. Es importante mencionar que, durante el tren de enfriamiento, el propano líquido es el que proporciona el mayor intercambio de calor, por lo que es el responsable de incrementar la caída de temperatura en esta etapa.

Cada intercambiador de calor cuenta con manómetros en la entrada y salida lado tubos, y con termopares en el lado tubos y lado coraza. Estas temperaturas son visualizadas por el tablerista en el Control Distribuido.

Posterior al EA-8, el gas húmedo entra al separador bifásico FA-7 en donde se separan los líquidos condensados durante el tren de enfriamiento (del EA-3 al EA-8) y el gas húmedo. Los líquidos salen por el fondo del tanque y entran al separador bifásico FA-8, salen por el fondo del recipiente y entran al intercambiador de calor EA-8, es ahí donde intercambia calor con el gas húmedo durante el tren de enfriamiento. Finalmente, los líquidos son enviados al plato No. 7 de la torre demetanizadora DA-1.

Por otro lado, el gas que sale por el FA-7 entra a la succión del turboexpansor-compresor GC-1, en donde la presión se reduce en una diferencial estimada de 27 kg/cm². Esta caída de presión provoca el subenfriamiento del gas desde -55 hasta -90°C liberando energía que es aprovechada por el compresor GB-1. Debido al enfriamiento repentino se forma una mezcla de dos fases en la descarga del compresor. Ésta entra como alimentación principal al plato No. 1 de la torre demetanizadora DA-1.

Enfriamiento.

Se tiene un sistema de refrigeración mecánica a base de propano para el enfriamiento inicial del gas de carga. Está conformado por 3 motocompresores centrífugos GB-2. Para una carga de 182 MMPCD se requiere operar con 2 máquinas, quedando la tercera máquina como relevo. Este sistema cuenta con dos pasos de compresión, dos separadores de succión, dos chillers de propano, y 4 condensadores. Los tres motores de refrigeración son de 13800 volts.

Expansión

Se tiene operando un nuevo turboexpansor-compresor con capacidad para 220 MMPCD de gas húmedo, el cual está dotado de tecnología de vanguardia, que permite operarlo en forma local y remota. Es decir, desde su tablero de campo o desde el cuarto de control.

Subsistemas:

- 🔥 Operación automática de hornos BA-1 y BA-2. La instrumentación instalada en cada uno de los hornos, permite que puedan ser operados vía remota desde el cuarto de control, a través de 3 PLC's Allen Bradley. Un PLC controla las funciones de encendido y apagado y los 2 restantes están dedicados a los dispositivos de protección.
- 🔥 Operación automática del proceso de regeneración de deshidratadores.
- 🔥 Visualización de 22 indicadores magnéticos de nivel. - Se tienen instalados en campo 22 indicadores de nivel magnéticos distribuidos entre los recipientes sujetos a presión.
- 🔥 Detección de mezclas explosivas y fuego. - En el cuarto de control se tiene un gabinete con el sistema automático de detección marca MSA el cual está conformado por sensores de campo, PLC de monitoreo y estación de visualización.
- 🔥 Analizador en línea de gas húmedo, gas seco y sulfhídrico. Se tienen instaladas 2 probetas de muestreo: una insertada en el FA-1 y la otra en la tubería de succión de gas seco, en el rack superior oriente de la casa de compresoras 1. El cromatógrafo es el modelo Danalyzer de DANIEL. En el cuarto de control se reciben las señales del controlador de campo a través de un puerto RS, y se visualiza en una estación de trabajo.

5. Destilación

La mezcla bifásica líquido-vapor se separa en el domo de la torre, los líquidos descienden a través de la torre y el vapor sube hacia la salida del domo.

La torre demetanizadora contiene 40 platos. La mezcla bifásica que sale del expansor GC-1 alimentada al plato superior y el líquido del tanque acumulador de alimentación a la demetanizadora FA-8 alimentado al séptimo plato de la torre representan la alimentación total combinada a la columna.

Como su nombre lo indica, esta columna separa todo el metano de los licuables recuperados y esto lo logra a través de una transferencia de masa y energía entre el vapor ascendente y los líquidos descendentes.

La torre demetanizadora cuenta con un rehervidor denominado EA-2 que calienta los líquidos del fondo de la torre para evaporarlos y recircularlos al fondo de ésta nuevamente. Mientras estos vapores ascienden, los líquidos de las alimentaciones antes mencionadas descienden simultáneamente provocando la transferencia de masa y energía.

A través de la columna, se tiene un perfil de temperaturas dando como resultado diferentes temperaturas a distintas alturas de la torre; la temperatura más baja se tiene en el domo de la torre y es de -95 a -100°C .

Es importante mencionar que el gas húmedo que se desea separar contiene una mezcla de hidrocarburos que tienen diferentes puntos de condensación, por lo que, al ascender los vapores a través de la columna, se van condensando hidrocarburos a distintas alturas. El metano contiene el punto de condensación más frío, aproximadamente de -161°C , por lo que no sería rentable licuar este hidrocarburo, por otro lado, el etano tiene una temperatura de condensación aproximadamente de -92°C y los demás hidrocarburos tienen puntos de condensación mayores a éste. Se puede decir, entonces, que el etano es el último hidrocarburo en condensarse y este cambio de fase sucede en el domo de la torre.

De esta forma, el vapor se va enriqueciendo del componente más volátil (metano) y agotándose de los hidrocarburos más pesados (C_2+), mientras que los líquidos se van enriqueciendo de estos hidrocarburos y se van agotando de metano, dando como resultado una separación física.

6. Compresión y recompresión de gas seco.

El gas seco, denominado también “gas residual” que sale del domo de la torre atraviesa los intercambiadores de calor EA-7, EA-5 y EA-3 por lado coraza como se había mencionado anteriormente.

Una parte del gas seco que sale del EA-3 se desvía hacia los hornos y los deshidratadores para ser utilizado como gas de regeneración. La otra se somete a un proceso de compresión en los **motocompresores GB-5** (tienen un motor eléctrico de $13\ 800$ V cada uno) los cuales comprimen el gas residual de $14.5\ \text{kg}/\text{cm}^2$ (presión del domo de la torre) a $35\ \text{kg}/\text{cm}^2$, durante la compresión, el gas se calienta y alcanza una temperatura en la descarga mayor a 130°C , por lo que, sigue su recorrido hacia los enfriadores de gas, los EA-13AB/CD/EF, éstos son intercambiadores de calor de tubos y coraza en los cuales, el gas seco intercambia calor con agua de enfriamiento. Además, una parte de la descarga de los GB-5s' se desvía hacia el EA-1 para calentar el gas húmedo de alimentación a la planta criogénica como se mencionó al inicio en la etapa 3.

Tanto la salida de gas seco de los EA-13s' como la que sale del EA-1 se reincorporan y, finalmente, se dirigen al proceso de recompresión en las turbinas 308-s' las cuales aumentan la presión del gas de $35\ \text{kg}/\text{cm}^2$ a $60\ \text{kg}/\text{cm}^2$.

Este gas se incorpora como subproducto final hacia el gasoducto general.

7. Prealmacenamiento y bombeo de etano plus al CPG Área Coatzacoalcos.

Los líquidos del fondo de la demetanizadores DA-1 y la corriente de hidrocarburos líquidos provenientes del tanque separador FA-6A/B son juntados en el tanque de almacenamiento de producto final FA-9 y bombeados al CPG Área Coatzacoalcos a través de una línea existente de 8" para un separación posterior.

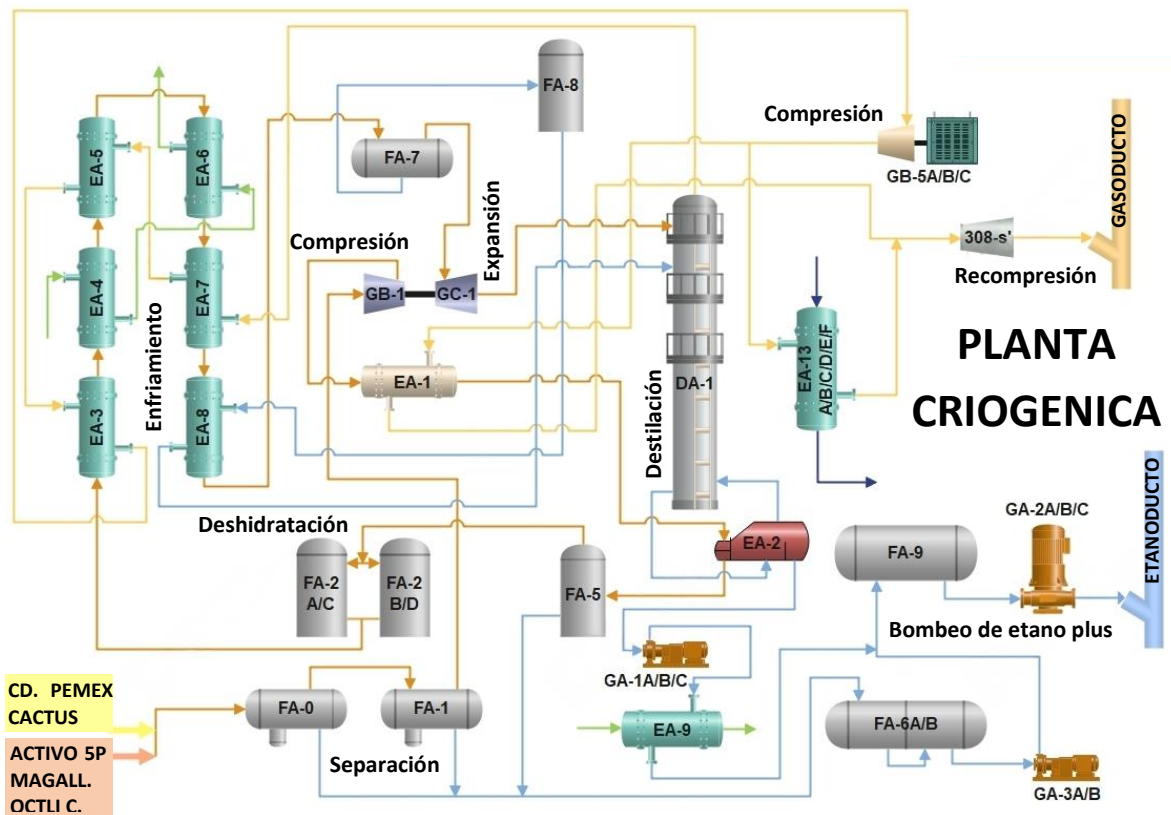


Ilustración 1. Diagrama de proceso de la Planta Criogenica del CPGLV (fuente propia).

En la figura 1 se ilustra el proceso químico de la planta criogenica del CPG La Venta, a continuación se describe la simbología del diagrama.

Línea de flujo	Descripción
	Gas natural húmedo dulce
	Gas natural seco (Gas residual)
	Líquidos criogénicos y condensados (C2+)
	Propano

	Agua de enfriamiento
--	----------------------

Tabla 1. Simbología del diagrama de proceso.

Equipo	Clave	Descripción
Recipientes	FA-0	Separador trifásico de gas húmedo.
	FA-1	Separador trifásico de succión de GB-1.
	FA-2A/B/C/D	Deshidratadores de gas de alimentación.
	FA-5	Separador bifásico de entrada a los deshidratadores.
	FA-6A/B	Separadores bifásicos de producto líquido.
	FA-7	Separador bifásico de succión del expansor.
	FA-8	Separador bifásico de alimentación a la torre demetanizadora.
	FA-9	Tanque de almacenamiento de producto líquido.
Intercambiadores de calor	EA-1	Calentador de gas de carga.
	EA-2	Rehervidor de la torre demetanizadora.
	EA-3/4/5/6/7/8	Tren de enfriamiento.
	EA-9	Calentador de líquidos de la torre demetanizadora.
	EA-13AB/CD/EF	Enfriadores de gas a compresión.

Transporte de fluidos	GB-1	Compresor de gas de alimentación.
	GB-5A/B/C	Compresores de gas residual a reinyección.
	308-S'	Maquinas reciprocantes y turbinas.
	GA-1A/B/C	Bomba de licuables recuperados en la demetanizadora.
	GA-2A/B/C	Bomba de salida de producto final.
	GA-3A/B	Bomba de condensados.
Otros	GC-1	Expansor.
	DA-1	Torre demetanizadora.

Tabla 2. Nomenclatura de equipos de la Planta Criogénica.

1.3 PROBLEMAS A RESOLVER

El presente proyecto se enfoca en la evaluación y resolución de varios problemas críticos dentro del contexto de los motocompresores GB-5 en la planta criogénica del Complejo Procesador de Gas La Venta. En primer lugar, se abordará la eficiencia energética de estos compresores, un problema que ha llevado a un consumo excesivo de energía eléctrica en relación con la producción de gas. Además, se explorará el cumplimiento normativo y los estándares de eficiencia energética, garantizando que la planta se adhiera a las regulaciones vigentes y optimice sus operaciones en términos de sostenibilidad y cumplimiento ambiental según los lineamientos de la *Guía Técnica de Confiabilidad Operacional para la Mejor Practica* del Subsistema de Administración de la Seguridad de los Procesos (SASP) de Petróleos Mexicanos. Por último, la seguridad operativa será un enfoque clave, ya que cualquier preocupación relacionada con la seguridad en el funcionamiento de los motocompresores y el proceso criogénico requerirá atención y soluciones efectivas para garantizar la operación segura y eficiente de la planta.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo general

Elaborar el control operativo con uso y consumo significativo de la energía de los motocompresores de gas residual GB-5.

1.4.2 Objetivos específicos

- Analizar las condiciones reales de operación de acuerdo a los rangos permitidos en las ventanas operativas empleando métodos gráficos.
- Cuantificar el consumo de energía actual de los motocompresores GB-5 en la planta criogénica.
- Determinar las eficiencias energéticas de los motocompresores GB-5.
- Evaluar el cumplimiento de la meta establecida en la eficiencia energética de los motocompresores GB-5.
- Realizar el reporte mensual del control operativo del equipo de acuerdo al análisis energético.

1.5 JUSTIFICACIÓN

La eficiencia energética se ha convertido en un tema de gran relevancia en la actualidad, no solo por su impacto en la reducción de costos operativos, sino también por su contribución a la sostenibilidad ambiental y al cumplimiento de regulaciones y normativas. En este contexto, el *control operativo de los motocompresores GB-5 con uso y consumo significativo de la energía del Complejo Procesador de Gas La Venta* adquiere un significado de suma importancia por varias razones fundamentales que afectan tanto a nivel industrial como global.

Impacto ambiental. La industria de transformación del gas natural desempeña un papel crucial en el suministro de energía y productos químicos esenciales para la sociedad. Sin embargo, este proceso consume una cantidad significativa de energía, lo que contribuye a las emisiones de gases de efecto invernadero y al cambio climático. Al evaluar y mejorar la eficiencia energética de los motocompresores utilizados en la planta criogénica, es posible reducir el consumo de energía del complejo y, en consecuencia, disminuir las emisiones de CO₂ y otros contaminantes atmosféricos.

Costos operativos. La eficiencia energética está directamente relacionada con los costos operativos de la industria del gas natural. Los motocompresores son dispositivos que consumen grandes cantidades de energía eléctrica para comprimir el gas. La mejora de la

eficiencia energética puede resultar en una reducción significativa de los costos operativos, lo que hace que la producción de gas natural sea más rentable y competitiva.

Recursos limitados. El gas natural es un recurso no renovable, y su explotación debe ser lo más eficiente posible para maximizar su disponibilidad a largo plazo. Al mejorar la eficiencia de los motocompresores, se puede aprovechar mejor el gas natural disponible, reduciendo así la necesidad de una explotación más intensiva y prolongando la vida útil de las reservas. Así también, optimizando la cogeneración de energía del CPG La Venta, ya que el gas natural seco obtenido del proceso criogénico se transforma en energía eléctrica a través de un turbogenerador.

Cumplimiento normativo. Muchos países y regiones tienen regulaciones estrictas sobre la eficiencia energética y las emisiones de gases de efecto invernadero. La evaluación y mejora de la eficiencia energética de los motocompresores en la industria del gas natural es esencial para cumplir con las normativas ambientales y evitar sanciones y multas. EL CPG La Venta debe cumplir con la normativa del Sistema de Gestión de la Energía de acuerdo a la norma ISO-50001.

Seguridad e integridad operativa. El control operativo del compresor permite anticipar y prevenir problemas potenciales, lo que mejora la confiabilidad del equipo y garantiza su disponibilidad cuando se necesita. La falta de control puede llevar a interrupciones no planificadas en la producción y a costos adicionales por mantenimiento y reparaciones. La operación segura de un compresor es fundamental para prevenir accidentes laborales y para evitar fugas de gases potencialmente peligrosos. El control operativo ayuda a mantener el compresor en condiciones seguras, detectando y respondiendo a situaciones de riesgo.

Por lo tanto, este proyecto desarrolla un control operativo integral para los motocompresores GB-5 que contribuirá significativamente a la evidencia en auditorías de una operación segura y sustentable en la planta criogénica del Complejo Procesador de Gas La Venta. Las recomendaciones propuestas se basan en un análisis detallado de las condiciones operativas del equipo.



CAPÍTULO 2

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 INTRODUCCIÓN A LOS MOTOCOMPRESORES DE GAS NATURAL

2.1.1 Compresión de un gas

La compresión es una de las propiedades características de los gases. En efecto, un gas carece de volumen fijo, pues dicho volumen depende de la presión a la que se encuentra sometido. ¿Cómo explica la teoría cinética este hecho bien conocido?

Un gas está constituido por un gran número de partículas microscópicas independientes en continuo movimiento. Entre ellas no hay nada más que espacio vacío. Así, es fácil comprimirlo disminuyendo el espacio existente entre las partículas.

Al comprimir un gas, por lo tanto, disminuye el espacio disponible en el que se mueven sus partículas. En consecuencia, el volumen disminuye pero la cantidad de gas no cambia, dado que el número de partículas contenidas en el recipiente no varía. La disminución del volumen para una cierta cantidad de un gas tiene una consecuencia importante: el aumento de la presión (Cengel, Termodinámica, 2012).

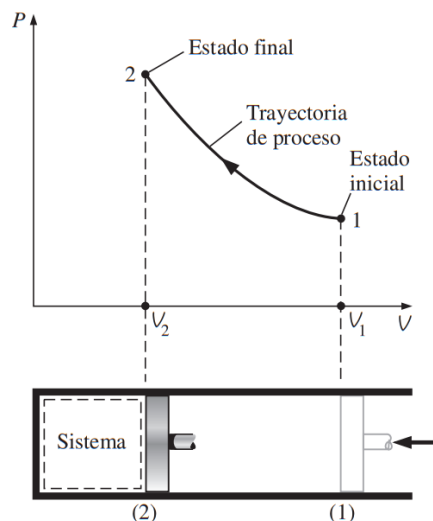


Ilustración 2. Diagrama P-V de un proceso de compresión.

2.1.1.1 Primera Ley de la Termodinámica

La primera ley de la termodinámica aplica el principio de conservación de energía a sistemas donde la transferir de calor y hacer un trabajo son los métodos de intercambio de energía dentro y fuera del sistema. La primera ley de la termodinámica establece que el cambio en la energía interna de un sistema, ΔU , es igual al calor neto que se le transfiere, Q , más el trabajo neto que se hace sobre él, W . En forma de ecuación, la primera ley de la termodinámica es

$$\Delta U = Q + W$$

Aquí, ΔU es el cambio en la energía interna del sistema, Q es el calor neto que se le ha transferido (es decir, es la suma de todo el calor transferido por y hacia el sistema) y W es el trabajo neto realizado sobre el sistema (Cengel, Termodinámica, 2012).

Así que el calor Q positivo y el trabajo W positivo inyectan energía en el sistema. La primera ley toma la forma $\Delta U = Q + W$ por esta razón. Simplemente establece que puedes aumentar la energía interna de un sistema al calentarlo o al hacer trabajo sobre él.

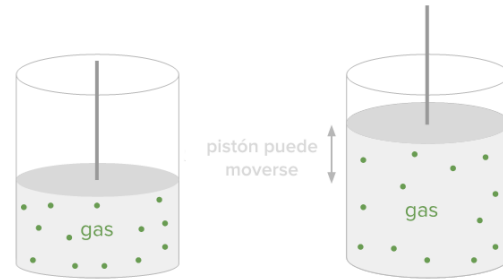


Ilustración 3. Sistema de un gas con pistón móvil.

No hay mejor ejemplo de la primera ley de la termodinámica que el de un gas atrapado en un contenedor que cuenta con un pistón móvil. Supondremos que el pistón se puede mover hacia arriba y hacia abajo de tal forma que comprime al gas o permite que se expanda (pero el gas no se puede salir del recipiente).

Las moléculas del gas atrapadas en el contenedor son "el sistema". Esas moléculas tienen energía cinética.

Se puede decir que la energía interna U de nuestro sistema es la suma de las energías cinéticas de cada molécula del gas. Así que si la temperatura T del gas aumenta, sus moléculas se mueven más rápido y la energía interna U del gas aumenta (lo que significa que ΔU es positiva). De manera similar, si la temperatura T del gas disminuye, las moléculas van más despacio, y la energía interna U del gas disminuye (lo que significa que ΔU es negativa).

Es muy importante recordar que tanto la energía interna U como la temperatura T aumentarán cuando las velocidades de las moléculas del gas se incrementen, pues en realidad son dos maneras de medir la misma cosa: cuánta energía hay en el sistema. Dado que la temperatura y la energía interna son proporcionales, $T \Leftrightarrow U$, si la energía interna se duplica, también lo hace la temperatura. Similarmente, si la temperatura no cambia, tampoco la energía interna.

Una manera en la que podemos incrementar la energía interna U (y por lo tanto la temperatura) del gas es transferirle calor Q . Esto lo podemos lograr si colocamos el contenedor sobre un mechero Bunsen o si lo sumergimos en agua hirviendo. El ambiente de alta temperatura transferirá calor a las paredes del contenedor y al gas por medio de conducción térmica, provocando que sus moléculas se muevan más rápido. Si entra calor al

gas, Q será un número positivo. Contrariamente, podemos hacer que disminuya la energía interna del gas si le extraemos calor. Lograremos esto colocando el contenedor en un baño de hielo. Si el calor sale del gas, Q será un número negativo. Esta convención de signos para el calor Q se representa en la imagen de abajo.

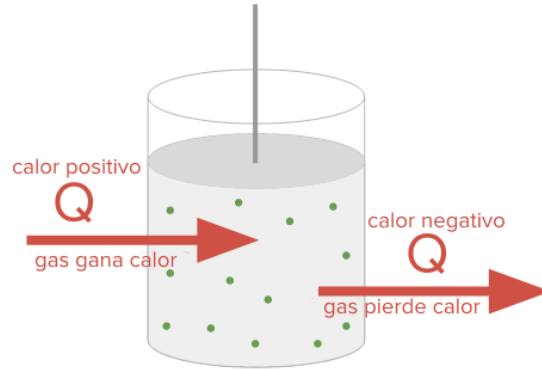


Ilustración 4. Transferencia de calor en un sistema de gas.

Si el pistón se mueve hacia abajo, **el gas se comprime** y se **hace un trabajo sobre él**. Las colisiones de moléculas de gas con el pistón que desciende provocarán que esas moléculas se muevan más rápido, lo que incrementa la energía interna total. Si el gas se comprime, el trabajo realizado, $W_{sobre\ el\ gas}$, es un número positivo. En el caso contrario, si **el gas se expande** y empuja al pistón, **el gas realiza un trabajo**. Las colisiones de las moléculas del gas con el pistón que retrocede hacen que las moléculas del gas se muevan más lento, lo que disminuye la energía interna del gas. Si el gas se expande, el trabajo que se realiza, $W_{sobre\ el\ gas}$, es un número negativo. La convención de signos para el trabajo W se representa en la imagen de abajo.

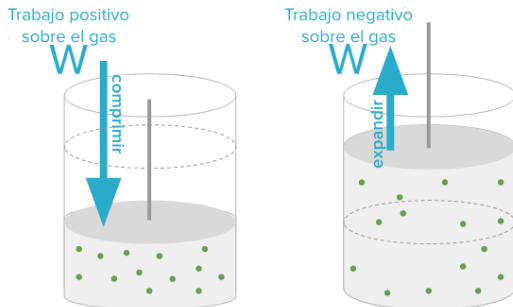


Ilustración 5. Trabajo en un sistema de gas.

2.1.1.2 Compresores de gas natural

El compresor es una máquina que tiene por objeto aumentar la presión de un fluido mediante la disminución de su volumen. También se emplea para transportar fluidos desde una zona de baja presión a otra de presión más elevada (Greene, Compresores, Selección, Uso y Mantenimiento, 1989).

Si bien puede ser de distintos tipos, la transformación que sufre el sistema puede estudiarse sin tener en cuenta el mecanismo del compresor.

Experimentalmente se ha encontrado que la compresión se realiza de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$P \cdot V^n = Cte$$

Por lo que se trata de una transformación politrópica de exponente n.

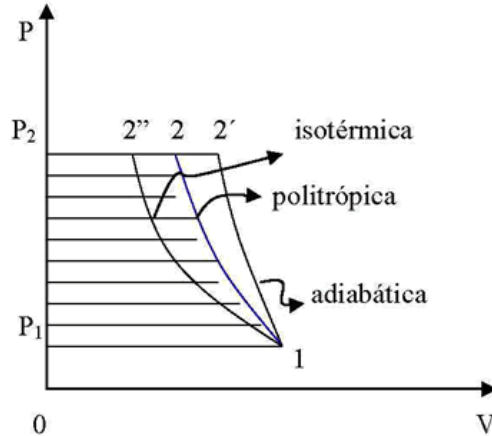


Ilustración 6. Transformación politrópica en un diagrama P-V.

En la figura se ha representado la transformación politrópica desde la presión P1 a la presión P2 en un diagrama P-V.

El trabajo consumido por el compresor efectúa la aspiración del gas, la compresión y el transporte hacia el almacenamiento o zona de alta presión. Será entonces un trabajo de circulación que está representado gráficamente por el área rayada del diagrama.

En la figura se puede observar que si la compresión se realiza adiabáticamente el trabajo de circulación será mayor que cuando lo hace isotérmicamente.

Tanto la transformación adiabática como la isotérmica son imposibles de realizar en la práctica. La primera requiere que no haya ningún intercambio de calor entre el gas y las paredes del compresor y la segunda que el calor se transmita tan perfectamente que la temperatura del gas se mantenga constante a pesar del aumento de energía que provoca la compresión. Por consiguiente, en la realidad, la compresión sigue una transformación politrópica intermedia entre la adiabática y la isotérmica. Los valores del exponente de la politrópica estarán comprendidos entre el valor del exponente adiabático y 1 que es el exponente de la isotérmica.

También se puede observar en la figura, que cuanto mayor sea la presión final que se alcance en la compresión, mayor será la diferencia de áreas correspondiente a la politrópica e isotérmica, y por ello mayor, el trabajo que se debe consumir. Por este motivo, cuando se

necesita presiones elevadas, la compresión se realiza en etapas, con un enfriamiento intermedio entre ellas.

2.1.1.3 Proceso de compresión por etapas

Antes de utilizar el gas natural u otros gases es necesario someterlos a un proceso de compresión a fin de elevarles su nivel energético. Para realizar este proceso se utilizan compresores, los cuales son máquinas construidas que tienen como finalidad comprimir fluidos en estado gaseoso a determinadas presiones.

El aumento de energía del gas se logra mediante el trabajo que se ejerce sobre el fluido en un compresor. Este incremento se manifiesta por aumento de presión y en la mayoría de los casos por aumentos de temperatura.

La compresión del gas natural se puede representar por un proceso termodinámico. Inicialmente, el gas se encuentra en un nivel inferior de presión en cantidades prefijadas. Luego se comprime y posteriormente se descarga a los niveles de presión superiores requeridos. Este proceso se repite de manera continua o permanente.

Las presiones creadas por los compresores que funcionan en los esquemas tecnológicos industriales son bastantes altas. Sin embargo, es muy difícil obtener una alta presión en una sola etapa de compresión; para lograrlo, necesariamente hay que enfriar el gas lo más intenso posible en el proceso de compresión, y luego, efectuar la compresión en las etapas sucesivamente unidas, realizando el descenso de la temperatura del gas en los inter enfriadores conectados en el flujo entre las etapas (Matene, 2021).

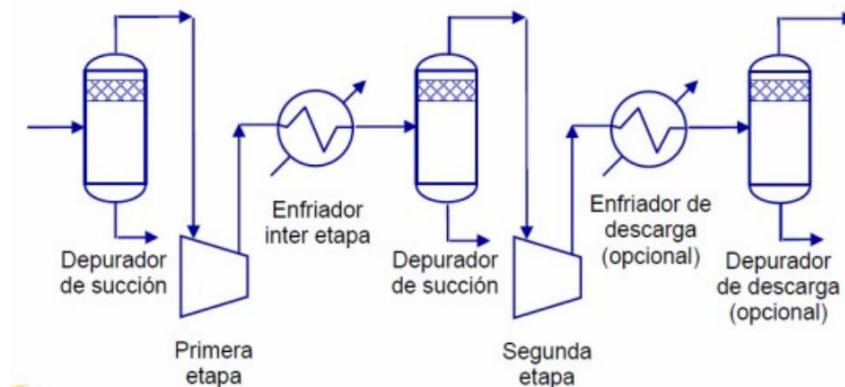


Ilustración 7. Esquema de un proceso de compresión por etapas.

El empleo de la compresión por etapas produce un gran ahorro de energía empleada para accionar el compresor. Esto se puede ver claramente en el diagrama presión–volumen de un compresor de tres etapas de la siguiente imagen.

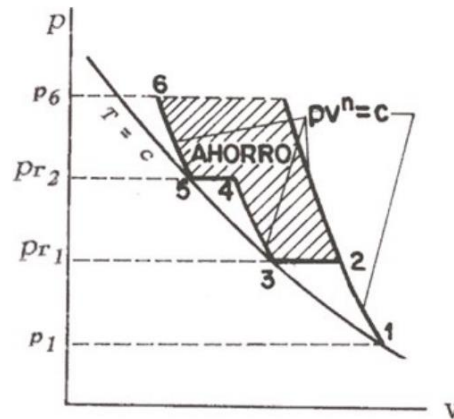


Ilustración 8. Diagrama presión-volumen de una compresión en etapas.

Los compresores son ampliamente usados para comprimir grandes volúmenes de gas, mediante la aplicación de fuerzas inerciales al gas manejado. Están diseñados para comprimir gas entre ciertos límites de presión, mediante la energía impartida al mismo. Esta compresión se efectúa en el impulsor, cuyas paletas imparten energía al fluido, aumentando su energía cinética y presión estática. La corriente de gas debe estar libre de líquidos, componentes corrosivos, materiales abrasivos, partículas que puedan depositarse en el impulsor y compuestos que se polimerizan a las condiciones existentes dentro de la unidad (Matene, 2021).

Generalmente estos equipos de compresión están basados en un modelo de compresión isentrópico o adiabático reversible, en el cuál se establece, que a lo largo del proceso de compresión, se debe mantener una transferencia neta de calor nula. Es por eso que surge la necesidad de segmentar el proceso global en varias etapas, donde el número de etapas vendrá determinado por la relación de compresión total y limitado por la temperatura máxima de descarga permisible, con la finalidad de sustraer la energía ganada por el gas una vez comprimido.

Los servicios de compresión de alta relación de presión comúnmente se separan en etapas de compresión múltiples y casi siempre incluyen enfriadores entre etapas a fin de remover el calor generado en la compresión. La compresión se realiza en etapas por las siguientes razones:

- Para limitar la temperatura de descarga de cada etapa a niveles que sean seguros desde el punto de vista de limitaciones mecánicas o tendencia de ensuciamiento del gas.
- Para tener disponibles corrientes laterales en la secuencia de compresión a niveles de presión intermedia, tales como sistemas de los procesos de refrigeración.

- Para aumentar la eficiencia total de compresión (a fin de obtener una reducción en potencia) manteniendo la compresión tan isotérmica como sea posible, optimizando la inversión adicional en enfriadores interetapas y los costos de operación del agua de enfriamiento contra el ahorro de potencia. Esto es un factor significativo en compresiones de aire en plantas y en compresiones de aire para procesos de gran capacidad.
- Para enfriar las entradas a las etapas y de esta manera reducir los requerimientos de cabezal de compresión total, suficientemente a fin de reducir el número de etapas de compresión requeridas. Esto da como resultado compresores más compactos y de costos de construcción más bajos.
- Para fijar el aumento de presión por etapas a las limitaciones de presión por etapas diferencial del tipo de maquinaria: limitaciones en carga de empuje axial en los compresores centrífugos, limitaciones de tensión en la varilla del pistón.

La operación de compresión es de naturaleza cíclica, es decir, el gas es tomado del nivel inferior de presión en cantidades fijas, es comprimido, luego descargado en el nivel superior de presión después de lo cual el mecanismo compresor admite un nuevo volumen de gas a baja presión para reiniciar el ciclo. Se ha hablado de mecanismos compresores para indicar que la naturaleza de la operación es la misma sin importar el que este mecanismo sea un compresor de desplazamiento o dinámico, los cuales se diferencian entre sí por sus aspectos operacionales o de construcción, pero no por la naturaleza de la operación de compresión misma.

El proceso de compresión requiere de una serie de equipos que conforman sistemas, que en conjunto realizan el trabajo de compresión. Entre los sistemas más importantes de una planta compresora se tienen depuradores. Entre estos se distinguen los generales de succión, de succión y los de descarga interetapas.

- Depurador general de succión: este dispositivo tiene como función extraer los hidrocarburos condensables del gas a la entrada de las unidades motocompresoras. Para retirar así la mayor cantidad de líquido posible del gas al proceso.
- Depurador de succión: este equipo extrae los líquidos contenidos en el gas residuo del primer depurador y está justo antes de la primera etapa de motocompresor.
- Depuradores de descarga inter-etapas: son depuradores cuya función es acumular los hidrocarburos condensados que se generan al bajar la temperatura del gas manteniendo su presión. Existen tantos depuradores de descarga, como etapas de compresión tenga la unidad.

2.1.2 Definición y función de los motocompresores

Un motocompresor de gas es un dispositivo mecánico utilizado para comprimir gas. Su función principal es aumentar la presión del gas, lo que lo hace útil en una variedad de aplicaciones en las que se necesita almacenar, transportar o utilizar gas a presiones más altas que las que se encuentran en condiciones normales.

Los motocompresores de gas constan de dos componentes principales: un motor y un compresor. El motor proporciona la potencia necesaria para operar el compresor, que es la parte encargada de comprimir el gas. El compresor puede tener diferentes diseños y configuraciones: centrífugos, de paletas, de tornillo, de émbolo (reciprocantes), etc., según la aplicación específica y las características del gas a comprimir.



Ilustración 9. Motocompresor centrífugo de gas natural.

Las aplicaciones de los motocompresores de gas son diversas y van desde la industria química y petroquímica, la refrigeración y aire acondicionado, la producción de energía, la industria alimentaria y farmacéutica, hasta la exploración y producción de petróleo y gas, entre otras. Si se profundiza en la industria del gas natural, los motocompresores se utilizan comúnmente en estaciones de compresión a lo largo de gasoductos para aumentar la presión del gas y facilitar su flujo a través de largas distancias. Esto es esencial para llevar el gas natural desde los puntos de extracción hasta las plantas de procesamiento, las instalaciones de distribución y las estaciones de servicio (Greene, Compresores, Selección, Uso y Mantenimiento, 1989).

Estos compresores están diseñados para proporcionar una alta eficiencia y confiabilidad, ya que el gas natural es un recurso crítico en la generación de energía y otras aplicaciones. La industria del gas natural busca minimizar pérdidas y garantizar un suministro constante y seguro, por lo que la confiabilidad es esencial. Además, están diseñados para manejar las características específicas del gas natural: composición, presencia de impurezas y variabilidad en la presión de succión; consideran aspectos de seguridad, ya que el gas natural es altamente inflamable.

El mantenimiento regular es esencial para garantizar el funcionamiento adecuado del equipo. Se realizan inspecciones, lubricación, cambios de filtros y otras tareas de mantenimiento programado para garantizar su operación segura y eficiente.

2.1.3 Características del gas natural

Se denomina gas natural al formado por los componentes más volátiles de la serie parafínica de hidrocarburos, principalmente metano, cantidades menores de etano, propano y butano, y finalmente, puede contener cantidades muy pequeñas de compuestos más pesados. Además, puede contener en varias cantidades, gases no hidrocarburos, como dióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno (ácido sulfhídrico), nitrógeno, helio, vapor de agua y metales (Vásquez, 2011).

El gas natural puede existir como tal, en yacimientos de gas, o asociado con yacimientos de petróleo y de condensado (porciones volátiles de petróleo). Particularmente en México la mayoría del gas proviene de yacimientos de petróleo.

Este contiene elementos orgánicos importantes como materias primas para la industria petrolera y química. Antes de emplear el gas natural como combustible se extraen los hidrocarburos más pesados, como el butano y el propano. El gas que queda, el llamado gas seco, se distribuye a usuarios domésticos e industriales como combustible. Este gas, libre de butano y propano, también se encuentra en la naturaleza. Está compuesto por los hidrocarburos más ligeros, metano y etano, y también se emplea para fabricar plásticos, fármacos y tintes.

El Gas natural puede clasificarse como:

- Gas Dulce: Es aquel que no contiene sulfuro de hidrógeno.
- Gas Agrio o Amargo: Es aquel que contiene cantidades apreciables de sulfuro de hidrógeno y por lo tanto es muy corrosivo.
- Gas Rico (Húmedo): Es aquel del que puede obtenerse cantidades apreciables de hidrocarburos líquidos. No tiene que ver nada con el contenido de vapor de agua.
- Gas Pobre (Seco): Está formado prácticamente por metano.

2.1.3.1 Propiedades y Comportamiento del Gas Natural.

En la forma más simple, un gas puede considerarse compuesto de partículas sin volumen y entre las cuales no existen fuerzas de atracción. Es un fluido homogéneo, generalmente de baja densidad y viscosidad, sin volumen definido y llena cualquier volumen en que se coloca (Vásquez, 2011).

La anterior definición de gas, generalmente se cumple a condiciones de baja presión y temperatura, pero gradualmente se aparta de esta definición y el comportamiento teórico se aparta del observado. A medida que aumenta la presión y temperatura, debe incluirse el volumen de las moléculas y fuerzas entre ellas. Los gases que cumplen la definición dada en

el párrafo anterior, se denominan gases perfectos o ideales. Los que no cumplen esta definición se denominan gases reales.

Tal como se extrae de los yacimientos, el Gas Natural es un producto incoloro e inodoro, no tóxico y más ligero que el aire.

Propiedades Físicas/Químicas	
Forma molecular	Mezcla (CH ₄ + C ₂ +)
Peso molecular	18.2
Temperatura de ebullición a 1 atm	-160.0 °C
Temperatura de fusión	-182.0 °C
Densidad de los Vapores (Aire = 1) a 15.5 °C	0.61 (más ligero que el aire)
Densidad del Líquido (Agua = 1) a 0°/4 °C	0.554
Relación de Expansión	1 L de líquido se convierte en 600 L de gas
Solubilidad en Agua a 20 °C	Ligeramente soluble (de 0.1 a 1.0%)
Apariencia y Color	Gas incoloro, insípido y con ligero olor a huevos podridos (por la adición de mercaptanos para detectar su presencia en caso de fugas de acuerdo a NormaPemex No 07.3.134.

Tabla 3. Propiedades físicas y químicas del gas natural.

Densidad.

La densidad, medida respecto de la del aire tomada como unidad, oscila entre 0.6 y 0.8 según sea el contenido de hidrocarburos condensables (propano y más pesados), pudiendo aún ser mayor si fuese muy rico en estos últimos.

Estabilidad y Reactividad.

- Estabilidad Química: Estable en condiciones normales de almacenamiento y manejo.

- Condiciones a Evitar: Manténgalo alejado de fuentes de ignición y calor intenso ya que tiene un gran potencial de inflamabilidad, así como de oxidantes fuertes con los cuales reacciona violentamente (pentafluoruro de bromo, trifluoruro de cloro, cloro, flúor, heptafluoruro de yodo, tetrafluoroborato de dióxigenil, oxígeno líquido, ClO₂, NF₃, OF₂).
- Productos Peligrosos de Descomposición: Los gases o humos que produce su combustión son: bióxido de carbono y monóxido de carbono (gas tóxico).
- Peligros de Polimerización: No polimeriza.

2.1.3.2 Composición del Gas Natural

El gas natural es una mezcla gaseosa en condiciones normales de presión y temperatura.

Clase	Componentes	Formula
Hidrocarburo	Metano	CH ₄
	Etano	C ₂ H ₆
	Propano	C ₃ H ₈
	i-Butano	iC ₄ H ₁₀
	n-Butano	nC ₄ H ₁₀
	i-Pentano	iC ₅ H ₁₂
	n-Pentano	nC ₅ H ₁₂
	Ciclopentano	C ₅ H ₁₀
	Hexanos y pesados	C ₆ +
Gases Ácidos	Ácido sulfhídrico	H ₂ S
	Dióxido de carbono	CO ₂
Gases Inertes	Nitrógeno	N ₂
	Helio	He
	Argón	Ar
Compuestos de azufre	Mercaptanos	R-SH

	Sulfuros	R-S-R'
	Disulfuros	R-S-S-R'
Otros	Hidrógeno	H ₂
	Oxígeno	O ₂
	Vapor de agua	H ₂ O
	Sulfuro de hierro	FeS

Tabla 4. Componentes encontrados en la composición del gas natural.

Compuesto	% en mol
Metano	76
Etano	3.3
Propano	1.2
Butano	0.8
Pentano	0.5
Hexano	2.0
Dióxido de Carbono	7.0
Ácido sulfhídrico	8.0
Agua	1.0
Nitrógeno	Mínimo
Argón	Trazas

Tabla 5. Composición aproximada del gas natural.

Componente	Líquido (Agua = 1)	Gas (Aire = 1)
Metano	-	0.555
Etano	-	1-046

Propano	0.5077	1.547
Butano	0.5844	2.071

Tabla 6. Densidad relativa de gases combustibles.

2.1.3.3 Poder Calorífico

Los combustibles gaseosos están formados por hidrocarburos, que son, compuestos moleculares de carbono e hidrógeno. Las propiedades y características de los diferentes gases dependen del número y disposición de los átomos de carbono e hidrógeno de sus moléculas. La comercialización del gas natural implica que este reúna unas características especiales que lo hacen apto para su transporte y consumo, tanto industrial como doméstico. Estas características están reguladas en el contrato que se establece en la compra-venta del gas.

Los principales parámetros que exigirá el comprador respecto del gas que le están suministrando serán:

- El poder calorífico que este posee.
- La presión de suministro.
- La humedad del gas.
- Temperatura del gas.
- La cantidad de sólidos que arrastra.
- La no presencia de elementos indeseables como el anhídrido carbónico o el sulfuro de hidrógeno.

Definición de poder calorífico

Es la cantidad de calor liberado por la combustión de la unidad de volumen o de peso de un combustible (Vásquez, 2011).

Se define como poder calorífico de un combustible a la cantidad de calor que puede ceder por unidad de masa o volumen, cuando participa en una reacción de combustión.

Sus unidades son BTU/lb o Kcal/kg para combustibles líquidos y BTU/ft³ o Kcal/m³ para combustibles gaseosos en el sistema inglés e internacional de unidades respectivamente.

El poder calorífico del gas natural es variable de acuerdo a su composición, estando comprendido entre 9000 y 9.500 Kcal/m³, a menos que se trate de un gas con importante contenido de inertes o por el contrario de hidrocarburos pesados, siendo así de menor o mayor poder calorífico respectivamente.

El poder calorífico se divide en:

- Poder calorífico superior o neto. Es la cantidad máxima de calor por unidad de masa del combustible que se podría obtener del mismo, si el agua que se forma durante la combustión se condensara durante el enfriamiento de los gases.
- Poder calorífico inferior. Es la cantidad real de calor que se obtiene por unidad de masa del combustible, considerando el vapor de agua en la fase gaseosa, que es como realmente se encuentra en mezcla con los gases producto de cualquier combustión a nivel industrial, en este caso no se aprovecha el calor de condensación del agua, por lo que el PCI resulta menor que el PCS.

Por tanto la diferencia entre PCS y PCI es igual por definición al calor de condensación del vapor de agua resultante de la combustión del combustible. La relación PCI/PCS depende de la proporción de los elementos carbono e hidrogeno presentes en gas combustible. Para los gases combustibles más usuales el valor de PCI/PCS ronda el valor de 0.9.

Generalmente el valor del gas depende de su poder calorífico, de todas formas si existiera un mercado para el etano, propano, butano, puede ser rentable comprimir estos componentes del gas aunque rebajemos su poder calorífico. En algunos casos, cuando el gas es suministrado como combustible residencial, los contratos de venta pueden pedir restringir los contenidos de componentes altos en BTU's, por lo que habrá que tratar este gas para minimizar su contenido.

Hidrocarburo	Poder Calorífico Superior	Poder Calorífico Inferior	Poder Calorífico Superior	Poder Calorífico Inferior
	Kcal/kg	Kcal/kg	Kcal/m ³	Kcal/m ³
Metano	13 265	11 954	9 006	8 107
Etano	12 399	11 350	15 868	14 515
Propano	12 033	11 079	22 757	20 941
Butano	11 837	11 932	29 984	27 598
Pentano	11 715	10 840	35 680	33 010
Hexano	11 634	10 780	42 328	39 195

Heptano	11 577	10 737	48 976	45 398
---------	--------	--------	--------	--------

Tabla 7. Poder Calorífico de combustión de gases puros.

2.1.3.4 Usos del gas natural

El gas natural tiene diversas aplicaciones en la industria, el comercio, la generación eléctrica, el sector residencial y el transporte de pasajeros. Ofrece grandes ventajas en procesos industriales donde se requiere de ambientes limpios, procesos controlados y combustibles de alta confiabilidad y eficiencia.

En el siguiente cuadro se presentan algunas de las aplicaciones más comunes de gas natural:

Sector	Aplicaciones/Procesos
Industrial	Generación de vapor
	Industria de Alimentos
	Secado
	Cocción de productos cerámicos
	Fundición de metales
	Tratamientos térmicos
	Temple y recocido de metales
	Generación eléctrica
	Producción de petroquímicos
	Sistema de calefacción
Comercio y Servicios	Hornos de fusión
	Calefacción central
	Aire acondicionado
	Cocción/preparación de alimentos
	Agua caliente

Energía	Cogeneración eléctrica
	Centrales térmicas
Residencial	Cocina
	Calefacción
	Agua caliente
	Aire acondicionado
Transporte de pasajeros	Taxis
	Buses

Tabla 8. Aplicaciones del gas natural.

Adicionalmente, el gas natural es utilizado como materia prima en diversos procesos químicos e industriales. De manera relativamente fácil y económica puede ser convertido a hidrógeno, etileno, o metanol; los materiales básicos para diversos tipos de plásticos y fertilizantes (Vásquez, 2011).

2.1.3.5 Efectos de los contaminantes en los procesos

El endulzamiento del gas se hace con el fin de eliminar el H_2S y el CO_2 del gas natural. Como se sabe el H_2S y el CO_2 son gases que pueden estar presentes en el gas natural y pueden en algunos casos, especialmente el H_2S , ocasionar problemas en el manejo y procesamiento del gas; por esto hay que eliminarlos para llevar el contenido de estos gases ácidos a los niveles exigidos por los consumidores del gas. El H_2S y el CO_2 se conocen como gases ácidos, porque en presencia de agua forman ácidos, y un gas natural que posea estos contaminantes se conoce como gas amargo.

Entre los problemas que se pueden tener por la presencia de H_2S y CO_2 en un gas se pueden mencionar:

- Toxicidad del H_2S .
- Corrosión por presencia de H_2S y CO_2 .
- En la combustión se puede formar SO_2 que es también altamente tóxico y corrosivo.
- Disminución del poder calorífico del gas.
- Promoción de la formación de hidratos.
- Cuando el gas se va a someter a procesos criogénicos es necesario eliminar el CO_2 porque de lo contrario se solidifica.

- Los compuestos sulfurados (mercaptanos (RSR), sulfuros de carbonilo (SCO) y disulfuro de carbono (CS₂) tienen olores bastante desagradables y tienden a concentrarse en los líquidos que se obtienen en las plantas de gas; estos compuestos se deben eliminar antes de que los compuestos se puedan usar.

2.2 EFICIENCIA ENERGÉTICA EN SISTEMAS DE COMPRESIÓN

La compresión de aire y otros gases consume una gran cantidad de energía en las industrias de procesos químicos. En la producción de gases industriales como oxígeno, nitrógeno y helio y en la licuefacción de gas natural, la potencia para compresión es más del 80% de la energía total requerida. Entonces, la eficiencia del compresor tiene un efecto directo en los costos de producción.

Definición de eficiencia energética

El uso eficiente de la energía, a veces simplemente llamado, eficiencia energética o ahorro energético, es el objetivo de reducir la cantidad de energía requerida para proporcionar productos y servicios (Diesendorf, 2007).

2.2.1 Procesos de compresión

Desde un punto de vista termodinámico, el cálculo para la potencia de compresión es particularmente sensible a las especificaciones del flujo de masa, temperatura y presión de succión, más la temperatura y presión de descarga. Un compresor operará bajo condiciones variantes de estos valores, los cuales impactan su rendimiento. De manera que la parte de mayor dificultad en el cálculo de compresión es la especificación de un rango razonable para cada variante, y no el cálculo en sí.

Normalmente, los análisis termodinámicos se logran bajo un régimen ideal (reversible). Los resultados de este proceso reversible luego son adaptados al mundo real a través del empleo de la eficiencia termodinámica. En el proceso de compresión existen tres procesos ideales que se pueden visualizar: 1) Proceso isotérmico, 2) Proceso isentrópico (adiabático reversible), y 3) Proceso politrópico. Cualquiera de estos procesos puede ser aplicado adecuadamente en la evaluación de la eficiencia energética de compresión aplicando métodos basados en modelos termodinámicos. El proceso isotérmico, sin embargo, es aplicado usualmente como base, puesto que, en la industria real, el proceso de compresión no es llevado a cabo, ni aproximadamente, a temperatura constante.

La elección del tipo de proceso de compresión depende de las necesidades específicas de la aplicación, la eficiencia energética y las propiedades del gas comprimido.

Cada tipo de proceso tiene sus ventajas y desventajas, y la selección adecuada depende de factores como la temperatura deseada, la eficiencia y los recursos disponibles, no obstante, la elección de un proceso politrópico en lugar de un proceso isentrópico para evaluar la compresión en un compresor centrífugo se basa en la práctica de la ingeniería y la representación más realista del comportamiento del compresor en condiciones reales.

En un compresor centrífugo, la compresión rara vez es completamente isentrópica en la práctica. La compresión isentrópica asume que el proceso de compresión se realiza sin pérdidas de calor y sin fricción, lo cual es un modelo idealizado. Sin embargo, en la realidad, los compresores centrífugos pueden experimentar pérdidas de eficiencia debido a la fricción interna, la turbulencia y otros factores. La eficiencia isentrópica no tiene en cuenta estas pérdidas y, por lo tanto, puede no reflejar con precisión el rendimiento del compresor en condiciones reales.

La eficiencia politrópica, por otro lado, es una medida más realista y práctica de la eficiencia del compresor en situaciones del mundo real. Un proceso politrópico permite tener en cuenta ciertas pérdidas y no asume que la compresión es completamente reversible y sin fricción. La eficiencia politrópica se define como la relación entre el trabajo real realizado por el compresor y el trabajo ideal realizado en un proceso politrópico.

La elección de la eficiencia politrópica (como eficiencia de compresión) sobre la isentrópica en la evaluación de compresores centrífugos se debe a que la primera tiene en cuenta las pérdidas y la realidad de las condiciones del mundo real en el funcionamiento del compresor. Esto proporciona una representación más precisa de la eficiencia del compresor bajo condiciones reales.

2.2.1.1 Proceso isotérmico

Se denomina proceso isotérmico o proceso isoterma al cambio reversible en un sistema termodinámico, siendo dicho cambio a temperatura constante en todo el sistema. La compresión o expansión de un gas ideal puede llevarse a cabo colocando el gas en contacto térmico con otro sistema de Capacidad calorífica muy grande y a la misma temperatura que el gas; este otro sistema se conoce como foco calórico. De esta manera, el calor se transfiere muy lentamente, permitiendo que el gas se expanda realizando trabajo. Como la energía interna de un gas ideal sólo depende de la temperatura y ésta permanece constante en la expansión isoterma, el calor tomado del foco es igual al trabajo realizado por el gas

$$Q = W$$

2.2.1.2 Proceso politrópico

Se denomina proceso politrópico al proceso termodinámico, generalmente ocurrido en gases, en el que existe, tanto una transferencia de energía al interior del sistema que contiene el o los gases como una transferencia de energía con el medio exterior.

$$PV^n = cte$$

Donde p es la presión, V es un volumen específico, n , el índice politrópico, que puede ser cualquier número real, y C es una constante. La ecuación de un proceso politrópico es particularmente útil para describir los procesos de expansión y compresión que incluyen transferencia de calor. Esta ecuación puede caracterizar un amplio rango de procesos termodinámicos desde $n = 0$ a $n = \infty$ lo cual incluye: $n = 0$ (proceso isobárico), $n = 1$ (proceso isotérmico), $n = \gamma$ (proceso isentrópico), $n = \infty$ (proceso isocórico) y todos los valores intermedios de n . Así la ecuación es politrópica en el sentido de que describe varias líneas o procesos. Además de la representación del comportamiento de gases, la ecuación puede ser utilizada para representar ciertos comportamientos de líquidos o sólidos. La única restricción es que el proceso debe desplegar una tasa de transferencia de energía de $K = \delta Q / \delta W = cte$ durante tal proceso. Si se desvía de tal restricción, esto sugiere que el exponente no es una constante.

2.2.1.3 Proceso isentrópico

En termodinámica se designa como proceso adiabático a aquél en el cual el sistema (generalmente, un fluido que realiza un trabajo) no intercambia calor con su entorno. Un proceso adiabático que es además reversible se conoce como proceso isentrópico. El extremo opuesto, en el que tiene lugar la máxima transferencia de calor, causando que la temperatura permanezca constante, se denomina proceso isotérmico.

El término adiabático hace referencia a elementos que impiden la transferencia de calor con el entorno. Una pared aislada se aproxima bastante a un límite adiabático. Otro ejemplo es la temperatura adiabática de llama, que es la temperatura que podría alcanzar una llama si no hubiera pérdida de calor hacia el entorno.

2.2.1.4 Minimización del trabajo del compresor

El trabajo de entrada en un compresor se minimiza cuando el proceso de compresión se ejecuta de manera internamente reversible. Cuando los cambios en las energías cinética y potencial son insignificantes, el trabajo del compresor está dado por

$$w_{rev,entrada} = \int_1^2 V dP$$

Ecuación 1

Una forma de minimizar el trabajo del compresor es aproximarlos tanto como sea posible a un proceso internamente reversible, minimizando irreversibilidades como la fricción, la turbulencia y la compresión sin cuasiequilibrio. El grado que esto puede alcanzar está limitado por consideraciones económicas. Una segunda (y más práctica) manera de reducir el trabajo del compresor es mantener el volumen específico del gas tan pequeño como sea posible durante el proceso de compresión, lo cual se hace manteniendo la temperatura del gas tan baja como sea posible durante la compresión, ya que el volumen específico de un gas es proporcional a la temperatura. Por consiguiente, reducir el trabajo de entrada en un compresor requiere que el gas se enfríe cuando se comprime.

Para una mejor interpretación del efecto de enfriamiento durante el proceso de compresión se compara el trabajo de entrada requerido para tres tipos de procesos: uno isentrópico (no implica enfriamiento), otro politrópico (incluye un poco de enfriamiento) y uno más isotérmico (incluye máximo enfriamiento). Suponiendo que todos los procesos se ejecutan entre los mismos niveles de presión (P_1 y P_2) de una forma internamente reversible y el gas se comporta como uno ideal ($PV = RT$) con calores específicos constantes, se observa que el trabajo de compresión se determina al realizar la integración expresada en la ecuación 1 para cada caso, con los siguientes resultados:

- Isentrópico: $PV^k = cte$

$$w_{comp,entrada} = \frac{kR(T_2 - T_1)}{k - 1} = \frac{kRT_1}{k - 1} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]$$

Ecuación 2

- Politrópico: $PV^n = cte$

$$w_{comp,entrada} = \frac{nR(T_2 - T_1)}{n - 1} = \frac{nRT_1}{n - 1} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]$$

Ecuación 3

- Isotérmico: $PV = cte$

$$w_{comp,entrada} = RT \ln \frac{P_2}{P_1}$$

Ecuación 4

Los tres procesos se trazan sobre un diagrama $P - V$ en la figura 7-45 para el mismo estado de entrada y la misma presión de salida. En un diagrama $P - V$, el área a la izquierda de la curva del proceso es la integral $\int VdP$. Por lo tanto, es una medida del trabajo de compresión del flujo estacionario. En este diagrama es interesante observar que de los tres casos considerados internamente reversibles, la compresión adiabático ($PV^k = constante$) requiere el trabajo máximo mientras que la compresión isotérmico ($T = constante$ o $PV = constante$) requiere el mínimo. El trabajo de entrada requerido para el caso politrópico ($PV^n = constante$) está entre estos dos y disminuye cuando el exponente politrópico n disminuye, lo que aumenta el rechazo de calor durante el proceso de compresión. Si se remueve suficiente calor, el valor de n se aproxima a la unidad y el proceso se vuelve isotérmico. Una manera común de enfriar el gas durante la compresión es usar camisas de agua alrededor de la carcasa de los compresores.

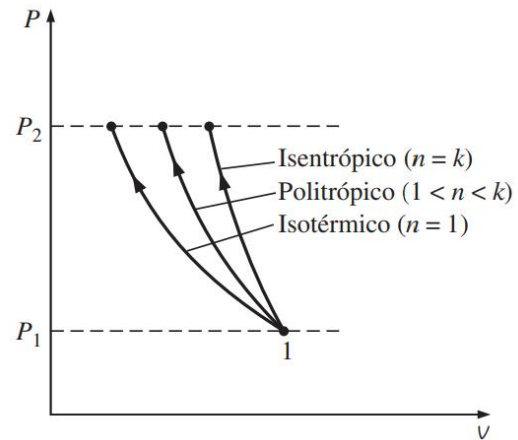


Ilustración 10. Diagrama $P-V$ de los procesos de compresión.

Es importante considerar que en la realidad es muy difícil conseguir una compresión completamente isotérmica o adiabática, por lo que el proceso politrópico de compresión resulta más cercano a la realidad.

2.2.2 Medición de la eficiencia energética de un compresor

Las eficiencias nominales de los compresores pueden ser tan engañosas como las tasas de interés. Para obtener el máximo por su dinero al adquirir compresores, hay que cerciorarse de que las comparaciones de las eficiencias se hagan sobre las mismas bases (Lady, Los Alamos Scientific Laboratory).

Los problemas energéticos, económicos y sociales que se enfrentan actualmente, requieren de nuevas técnicas para conocer el impacto que tiene cada proceso en un sistema de producción. La escasez de combustibles fósiles, sumado a los problemas ambientales, son ejemplos que llevan a plantear la relación que tiene el aprovechamiento energético de un proceso con el medio ambiente.

El concepto de exergía surge al complementar un análisis energético, utilizando a la segunda ley de la termodinámica. Mediante el análisis exergético se puede identificar de mejor manera cuales son los beneficios ambientales, económicos e incluso sostenibles de los procesos (Hepbasli, 2008).

Definición de exergía

La exergía es una propiedad termodinámica de una sustancia en un entorno que permite determinar el potencial de trabajo útil de una determinada cantidad de energía que se puede alcanzar por la interacción espontánea entre un sistema y su entorno. Informa de la utilidad del sistema como fuente de trabajo.

El análisis exergético proporciona la información del trabajo útil de un sistema termodinámico, cuando éste alcanza el equilibrio (físico, químico y térmico) con el medio ambiente, mientras que la destrucción de exergía es proporcional a la cantidad de entropía generada en un proceso, y por lo tanto, es una consecuencia de las ineficiencias de los componentes de un sistema (Moran & Shapiro, 1999).

Los compresores dinámicos son usualmente utilizados en procesos industriales en donde se requieren flujos continuos de gases a altas presiones. La relación de presiones de un compresor, depende de la velocidad de giro con que opera el equipo; sin embargo, estos dispositivos tienen un límite de velocidad periférica para evitar turbulencias y daños estructurales, por esta razón, la compresión del fluido en varios escalonamientos es una alternativa para obtener mayores relaciones de presiones al final del proceso de compresión. La ventaja de la compresión multietapa con enfriamientos intermedios es alcanzar una relación de presiones alta, con un menor trabajo de compresión, al reducir los cambios de entalpía de cada etapa de compresión.

Un parámetro muy útil para la evaluación de la calidad de diseño y conocer el aprovechamiento energético de un compresor, es la eficiencia politrópica. Debido a que el compresor centrífugo es una máquina receptora, es decir, que requiere de un suministro de energía para su funcionamiento, el cambio de exergía de un proceso de compresión representa el mínimo trabajo reversible para elevar la presión del fluido (Encinas, 1984).

2.2.2.1 Condiciones de funcionamiento

Se debe tener cierta información acerca de a) las condiciones de funcionamiento de cualquier compresor y b) las propiedades del aire, gas o mezcla de gases que se va a comprimir (Greene, Compresores, Selección, Uso y Mantenimiento, 1989).

El análisis del gas se suele expresar en porcentaje en volumen. Un análisis molal se puede convertir con facilidad en un análisis en porcentaje molal para determinar las propiedades de la mezcla de gases. En los compresores de aire se requiere la humedad relativa o la temperatura del bulbo húmedo en la entrada, con la cual se puede determinar la cantidad de humedad que hay en el aire.

La razón de los calores específicos k es igual al exponente adiabático de compresión γ , en donde

$$k = \gamma = \frac{C_p}{C_v}$$

Ecuación 5

Se puede expresar a la temperatura de succión. Para un cálculo más exacto, k debe estar a la temperatura promedio durante el ciclo de compresión.

Los factores de compresibilidad, que indican la desviación con respecto a un gas ideal se dan o calculan en las condiciones de succión y descarga. Para el aire o un gas puro hay disponibles graficas de factores de compresibilidad como funciones de la presión y temperatura reales. Si no se cuenta con esas gráficas para gases mezclados se acostumbra utilizar las tablas generales de compresibilidad que requieren calcular la presión reducida, P_r , y la temperatura reducida, T_r . Estos términos se definen mediante

$$P_r = \frac{P}{P_c} \quad ; \quad T_r = \frac{T}{T_c}$$

Ecuación 6

En donde P_r y T_r son la presión y temperatura reducida, P y T son presión y temperatura en condiciones reales de funcionamiento, y P_c y T_c son la presión y temperatura crítica de la mezcla.

Las presiones y temperaturas se deben dar en las condiciones de succión y, la presión en las condiciones de descarga, incluso la presión de cualquier carga lateral o requisito intermedio en el ciclo total de compresión. No se da la temperatura de descarga, sino que se calcula para incluir los efectos del aumento de temperatura durante la compresión. Las presiones, por lo general, se expresan en lb/in² manométricas (psig) y lb/in² absolutas (psia) (Greene, Compresores, Selección, Uso y Mantenimiento, 1989).

Las capacidades se pueden expresar en diversas formas:

- Flujo en peso, W , lb/h o lb/min.
- Gasto, referido a las condiciones estándar, que suelen ser 14.7 y 60 °F en las industrias de procesos químicos, expresado como:
 - SCFM: Pies cúbicos estándar por minuto.
 - SCFH: Pies cúbicos estándar por hora.
 - MMSCFD: Millones de pies cúbicos estándar por día.

- El gasto, en relación con las condiciones en la succión que se suele expresar como:
 - SCFM / SCFS: ft^3/min o ft^3/s
 - Q o Q_s : ft^3/min o ft^3/s

No importa la forma en que se exprese la capacidad, pues hay que convertirla a la capacidad en las condiciones de succión para seleccionar el compresor del tamaño correcto. Esta conversión se puede hacer con el empleo de cualquiera de las siguientes relaciones, o todas ellas:

$$\frac{P_1 V_1}{T_1 Z_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2 Z_2}$$

Ecuación 7

En donde V es el volumen, P es la presión absoluta, T es la temperatura absoluta y Z es el factor de compresibilidad. En la ecuación 3 se puede suponer que el factor de compresibilidad, Z_1 , es de 1.0 si P_1 y T_1 están a las condiciones estándar de 14.7 psia y 520 °R.

$$CFM/S = Q_s = W\bar{v} = \frac{W}{\rho}$$

Ecuación 8

En donde W es el flujo, lb/min , \bar{v} es el volumen específico, ft^3/lb , y ρ es la densidad, lb/ft^3 . El volumen específico, \bar{v} , se puede calcular con:

$$\bar{v} = z \left(\frac{1.545}{M_w} \right) \left(\frac{T}{144P} \right)$$

Ecuación 9

En donde M_w es el peso molecular.

$$SCFM = \frac{379.46M}{60}$$

Ecuación 10

En donde M es el flujo molar, de mol/h .

$$W = M(M_w)$$

Ecuación 11

En donde W es el flujo en peso, lb/h, M es el flujo molar, mol/h, y M_w es el peso molecular.

$$Q_s = (CFM) = \left[\frac{(MMSCFD) \times 10^6}{60 \times 24} \right] \left(\frac{14.7}{P_s} \right) \left(\frac{T_s}{520} \right) \left(\frac{Z_s}{1.0} \right)$$

Ecuación 12

En donde el subíndice s denota las propiedades en las condiciones de succión. La presión y temperatura están en psia y °R respectivamente.

2.2.2.2 Proceso de compresión multietapa sin enfriamiento intermedio.

La relación de presiones, las relaciones de presiones intermedias, el cambio de entalpía, el trabajo de flujo, el trabajo de compresión, el cambio de exergía, la eficiencia isoentrópica, la eficiencia politrópica y la eficiencia exergética son los parámetros para analizar el proceso de compresión con y sin enfriamientos intermedios.

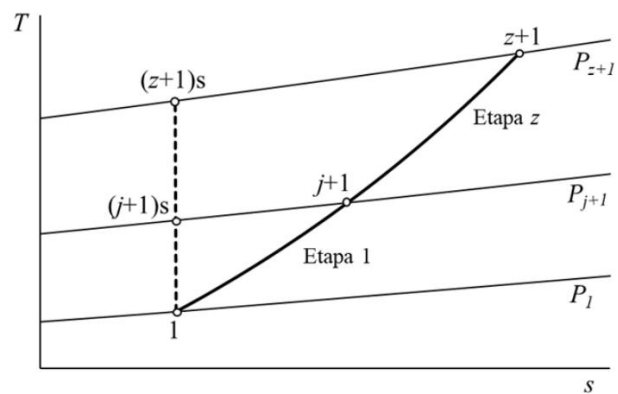


Ilustración 11. Compresión multietapa sin enfriamiento intermedio.

En la Ilustración 10 se muestra el proceso de compresión multietapa sin enfriamiento intermedio en un diagrama T-s.

La presión de succión P_1 , la temperatura de succión T_1 , la presión de descarga P_{z+1} , son parámetros conocidos del proceso de compresión; la letra “j” funciona como un contador para nombrar estados, propiedades y parámetros en etapas intermedias de la compresión, tomando valores de 1 a $z - 1$. El diagrama de la Ilustración 10 sólo funciona cuando $z > 1$; en el caso en que $z = 1$ el proceso sólo va de 1 a 2 y el contador j no se utiliza (Andrade, 2019).

Considerando que cada etapa de compresión opera bajo el mismo exponente politrópico, el desempeño total de este proceso multietapa se puede determinar mediante las condiciones iniciales y finales del gas. Por lo tanto, de acuerdo a la Ilustración 10 se tienen las siguientes expresiones:

Relación de presiones total

Ésta es la relación entre la presión de descarga de la última etapa de compresión y la presión de succión de la primera etapa de compresión

$$r_c = \frac{P_{(z+1)}}{P_1}$$

Ecuación 13

Temperatura de descarga real total

Considerando que el proceso de compresión sea politrópico, se tiene que

$$PV^n = cte$$

Ecuación 14

Siendo n el exponente politrópico, la temperatura de descarga se obtiene a partir de la relación de presiones:

$$T_{(z+1)} = T_1 (r_c)^{\frac{n-1}{n}}$$

Ecuación 15

Temperatura de descarga isoentrópica total

Una compresión es isoentrópica cuando el exponente politrópico es igual al exponente adiabático, $n = \gamma$; entonces, la temperatura de descarga isoentrópica es

$$T_{(z+1)s} = T_1 (r_c)^x$$

Ecuación 16

En donde

$$x = \frac{\gamma - 1}{\gamma} = \frac{R}{C_p}$$

Ecuación 17

Recordar que

$$C_p - C_v = R$$

Ecuación 18

Y de la ecuación 5 sabemos que

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v}$$

Trabajo de compresión ideal

El trabajo de compresión ideal, también denominado trabajo de flujo es el trabajo suministrado por el fluido, para elevar la presión desde la presión de admisión hasta la presión de descarga. Es la cantidad de trabajo teóricamente necesario para comprimir un gas desde un estado inicial hasta un estado final en un proceso adiabático. Este trabajo ideal se asocia con un proceso en el que no hay pérdida de energía en forma de calor hacia el entorno, y todas las interacciones son reversibles (Greene, Compresores, Selección, Uso y Mantenimiento, 1989).

Se determina mediante la siguiente ecuación.

$$w_f = h_{(z+1)s} - h_1 = \left(\frac{k}{k-1}\right) RZ_1 T_1 \left[(r_c)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]$$

Ecuación 19

Trabajo de compresión real

En la realidad, los procesos no se comportan de manera ideal y reversible, por el contrario, siempre hay transferencia de calor y los procesos tienden a generar un cambio de entropía por la fricción, la resistencia al flujo por esfuerzos cortantes, etc., por lo que los procesos se comportan de manera politrópica y no isentrópica (adiabática reversible).

Considerando una compresión real mediante un proceso politrópico, el trabajo real suministrado al compresor es el cambio de entalpía del proceso de compresión (Greene, Compresores, Selección, Uso y Mantenimiento, 1989).

$$w_c = h_{(z+1)} - h_1$$

Ecuación 20

Eficiencia isentrópica de compresión

Es un parámetro que describe la eficiencia de un compresor al comprimir un gas de manera isentrópica. La compresión isentrópica es un proceso teórico que ocurre sin pérdida de calor y es reversible adiabático. Se utiliza para cuantificar qué tan cerca está el proceso real de compresión del proceso ideal isentrópico (Greene, Compresores, Selección, Uso y Mantenimiento, 1989).

$$\eta_{isen} = \frac{(r_{rc})^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1}{(r_{rc})^{\frac{n-1}{n}} - 1}$$

Ecuación 21

Eficiencia politrópica de compresión

Es la relación entre trabajo de compresión ideal (trabajo de flujo) y el trabajo de compresión real. Este parámetro se utiliza para modelar y entender mejor el comportamiento de los compresores en situaciones del mundo real donde pueden existir pérdidas de calor u otros efectos no ideales, es decir, es la eficiencia real del proceso de compresión.

A continuación se tiene la eficiencia politrópica en función del exponente adiabático y el exponente politrópico (Greene, Compresores, Selección, Uso y Mantenimiento, 1989):

$$\eta_{poli} = \frac{w_f}{w_c} = \left(\frac{n}{n-1}\right) \left(\frac{\gamma-1}{\gamma}\right)$$

Ecuación 22

Cambio de entropía en función de la eficiencia politrópica

El cambio de entropía de un sistema abierto se determina con la ecuación de Gibbs

$$TdS = dH - VdP$$

Ecuación 23

La forma diferencial de la eficiencia politrópica es

$$\eta_{poli} = \frac{VdP}{dH}$$

Ecuación 24

Despejando dh de la ecuación 19 y sustituyendo en la ecuación 18 se tiene que

$$dH = \frac{VdP}{\eta_{poli}}$$

$$TdS = \frac{VdP}{\eta_{poli}} - VdP$$

Ecuación 25

Despejando ds , la diferencial de entropía es

$$TdS = \frac{VdP}{\eta_{poli}} - VdP$$

$$TdS = \frac{VdP - \eta_{poli}VdP}{\eta_{poli}}$$

$$dS = \frac{VdP - \eta_{poli}VdP}{\eta_{poli}T}$$

$$dS = \frac{VdP(1 - \eta_{poli})}{\eta_{poli}T}$$

$$dS = \frac{VdP}{T} \left(\frac{1 - \eta_{poli}}{\eta_{poli}} \right)$$

Ecuación 26

Al considerar el gas natural como un gas real tenemos que:

$$\frac{PV}{RT} = z$$

$$\frac{V}{T} = z \frac{R}{P}$$

Ecuación 27

Donde Z es el factor de compresibilidad del gas, por lo que sustituimos la ecuación 22 en la ecuación 21:

$$dS = zR \left(\frac{1 - \eta_{poli}}{\eta_{poli}} \right) \frac{dP}{P}$$

Ecuación 28

Con límites de integración de succión y descarga correspondientes; el cambio de entropía en función de la eficiencia politrópica para un proceso de compresión resulta

$$\int_{S_1}^{S_2} dS = zR \left(\frac{1 - \eta_{poli}}{\eta_{poli}} \right) \int_{P_1}^{P_2} \frac{dP}{P}$$

$$S_2 - S_1 = zR \left(\frac{1 - \eta_{poli}}{\eta_{poli}} \right) [\ln P_2 - \ln P_1]$$

$$S_2 - S_1 = zR \left(\frac{1 - \eta_{poli}}{\eta_{poli}} \right) \left[\ln \frac{P_2}{P_1} \right]$$

$$S_2 - S_1 = zR \left(\frac{1 - \eta_{poli}}{\eta_{poli}} \right) [\ln r_c]$$

$$\Delta S = zR \left(\frac{1 - \eta_{poli}}{\eta_{poli}} \right) [\ln r_c]$$

Ecuación 29

Eficiencia global de un compresor

La eficiencia global de un compresor se obtiene multiplicando la eficiencia de compresión (también conocida como eficiencia politrópica o isentrópica según la elección) y la eficiencia mecánica del compresor. La eficiencia global representa cuánta energía se conserva durante el proceso de compresión, teniendo en cuenta tanto la eficiencia termodinámica como la mecánica.

El rango aceptable para la eficiencia global de un compresor centrífugo puede variar según la aplicación específica, el diseño del compresor, las condiciones de operación y otros factores. Sin embargo, Heinz P. Bloch en su libro titulado “Compressors: How to Achieve High Reliability & Availability” (Compresores: cómo lograr alta confiabilidad y disponibilidad) expone que la eficiencia global de un compresor centrífugo suele estar en el rango del 60% al 88%.

La eficiencia de compresión (Politrópica o Isentrópica) generalmente tiene un alcance del 70% al 90%, dependiendo de las características del compresor y las condiciones de operación, por otro lado, la eficiencia mecánica considera valores típicos que pueden estar dentro del 90% al 98% (Bloch, 2011).

Es importante destacar que estos valores son aproximados y pueden variar según la aplicación y el fabricante del compresor. La eficiencia global es un parámetro crítico para evaluar el rendimiento de un compresor y debe considerarse en el contexto de los requisitos específicos de la aplicación.

2.2.3 Estrategias para mejorar la eficiencia energética

La eficiencia energética y la sostenibilidad son dos conceptos ligados entre sí. El aumento progresivo del coste de las fuentes de energía (tanto de combustibles como de electricidad), el aumento de la demanda y las consecuencias medioambientales de su uso están determinando la necesidad de la sostenibilidad en los procesos productivos.

El primer paso para conseguirlo es la monitorización energética. La recogida y gestión de datos sobre los hábitos de consumo permite identificar oportunidades de ahorro, establecer acciones de mejora y ver la evolución de las medidas implantadas. Una vez que se tenga esta información, debe desarrollarse una estrategia de mantenimiento inteligente que se adapte a los diferentes equipos, instalaciones y características de la empresa. Entre

los diferentes procesos que afectan al consumo de energía destacan la climatización, la iluminación y los equipos industriales. Existen varias estrategias y prácticas que puedes implementar para mejorar la eficiencia energética en sistemas de compresión.

1. Selección de equipos eficientes: Escoger compresores y componentes de alta eficiencia energética. Asegurar de que los equipos sean dimensionados adecuadamente para la aplicación específica, de modo que no estén sobredimensionados ni subdimensionados.
2. Mantenimiento regular: Establecer un programa de mantenimiento preventivo para los sistemas de compresión. Esto incluye la limpieza de filtros y radiadores, el ajuste de correas y la verificación de fugas de aire o refrigerante.
3. Optimización de la presión de operación: Ajustar la presión de operación del compresor para que sea la necesaria y no más. Operar a una presión más baja puede reducir el consumo de energía. Utilizar reguladores de presión y controladores de carga para mantener la presión adecuada en función de la demanda.
4. Recuperación de calor: En sistemas de compresión que generan calor como subproducto, se puede considerar la instalación de sistemas de recuperación de calor para precalentar agua o aire en la instalación, lo que reduce la necesidad de energía adicional para calefacción.
5. Uso de tecnologías de variación de velocidad: La instalación de compresores con control de velocidad variable (VSD) permite ajustar la velocidad del compresor según la demanda, lo que puede generar ahorros significativos de energía en comparación con los compresores de velocidad fija.
6. Almacenamiento de energía: Emplear sistemas de almacenamiento de energía, como tanques de aire comprimido, para evitar la operación de compresores durante los períodos de baja demanda y permitir un funcionamiento más eficiente.
7. Control de fugas de aire: Realizar inspecciones regulares para detectar y reparar fugas de aire en la red de tuberías y conexiones. Las fugas pueden ser una fuente importante de pérdida de energía.
8. Sistemas de control avanzados: Implementar sistemas de control avanzados y automatización para monitorear y gestionar los compresores y la demanda de manera eficiente.
9. Formación y concienciación: Brindar preparación a los operadores y personal de mantenimiento sobre las mejores prácticas en la operación y mantenimiento de sistemas de compresión eficientes energéticamente.
10. Auditorías energéticas: Realizar auditorías energéticas periódicas para evaluar el rendimiento de los sistemas de compresión y encontrar áreas de mejora.

Identificar ineficiencias y oportunidades de ahorro es fundamental para la optimización continua.

11. Monitorización y seguimiento: Implementar sistemas de monitorización en tiempo real para controlar el rendimiento de los sistemas de compresión y asegurar que se mantengan en óptimas condiciones de eficiencia.

Al aplicar estrategias y prácticas, puedes mejorar la eficiencia energética de los sistemas de compresión, reducir los costos operativos y minimizar el impacto ambiental. La inversión inicial en tecnologías y prácticas eficientes energéticamente a menudo se traduce en ahorros a largo plazo y una mayor competitividad.

2.2.4 Impacto ambiental y económico

La eficiencia energética en sistemas de compresión, como compresores industriales, sistemas de refrigeración, y sistemas de aire acondicionado, tiene un impacto significativo tanto en el medio ambiente como en la economía.

Impacto ambiental

- Reducción de emisiones de gases de efecto invernadero: Mejorar la eficiencia energética reduce la cantidad de energía necesaria para realizar la compresión, lo que a su vez disminuye las emisiones de gases de efecto invernadero, como el dióxido de carbono (CO₂). Esto contribuye a la mitigación del cambio climático.
- Conservación de recursos naturales: Reduce la demanda de recursos naturales, como combustibles fósiles y electricidad. Esto ayuda a conservar los recursos finitos y a minimizar la extracción y el consumo de combustibles no renovables.
- Reducción de contaminantes locales: La eficiencia energética puede disminuir las emisiones de contaminantes locales, como óxidos de nitrógeno (NO_x) y partículas, lo que mejora la calidad del aire y reduce la contaminación atmosférica.
- Menor demanda de energía: Disminuye la demanda de energía general, lo que reduce la necesidad de construir nuevas instalaciones de generación de energía y la presión sobre los ecosistemas.

Impacto económico

- Ahorro de costos: La mejora de la eficiencia energética en los sistemas de compresión conlleva ahorros significativos en costos operativos. Se reduce el consumo de energía y, por lo tanto, se disminuyen los gastos en electricidad o

combustibles, lo que puede ser especialmente relevante en operaciones industriales.

- Aumento de la productividad: Los sistemas de compresión más eficientes pueden funcionar de manera más efectiva y confiable, lo que puede aumentar la productividad y reducir los costos asociados con paradas no planificadas y mantenimiento.
- Cumplimiento de regulaciones: La eficiencia energética a menudo está respaldada por regulaciones gubernamentales y estándares que fomentan su implementación. Cumplir con estas regulaciones puede evitar sanciones y multas, lo que ahorra costos.
- Oportunidades de mercado: Las empresas que adoptan prácticas sostenibles y eficientes energéticamente pueden mejorar su imagen de marca y acceder a nuevos mercados o clientes que valoran la responsabilidad ambiental.

2.2.5 Sistema de Gestión de Energía ISO 50001

Las normativas y regulaciones sobre la eficiencia energética varían según el país y la región, y a menudo están diseñadas para promover prácticas sostenibles y la reducción del consumo de energía.

ISO 50001 es la norma de gestión de la energía empresarial más utilizada en el mundo. La certificación de un Sistema de Gestión de Energía según la ISO 50001, ayuda a las organizaciones a implantar una política energética y a gestionar adecuadamente los aspectos energéticos derivados de su actividad, como son los servicios, instalaciones, productos, etc., lo que se traduce en un ahorro real y cuantificable del coste energético en las organizaciones. La ISO 50001 proporciona las herramientas necesarias para identificar las actividades que consumen más energía y que suponen una “fuga energética y económica”. Una vez identificadas, las organizaciones activan un plan de medidas para minimizar los consumos energéticos de sus propias instalaciones y sistemas de forma integrada, maximizando al mismo tiempo la eficiencia energética de las mismas. Ello contribuye a un uso de la energía eficiente y más sostenible, y otorga máxima confianza en el sistema de gestión ISO 50001 (Lázaro Flores Díaz, 2016).

2.2.5.1 Beneficios de la implantación

Si bien contar con un sistema para administrar los procesos de negocios es beneficioso, existen beneficios específicos en la implantación de un SGE certificado en ISO 50001 (ESSS, 2023):

- ✓ **Marco para la gestión energética.** Un SGE efectivo alineado con la estrategia comercial de una organización, permitirá la visibilidad del uso y áreas donde se puede mejorar el

rendimiento energético. Proporciona políticas estructuradas, procesos, procedimientos y planes de acción para implementar oportunidades de ahorro de energía. Por lo tanto, se logra una mejora continua en la gestión energética.

- ✓ **Reducción de costes.** Cualquier reducción de energía identificada a través de un SGE, a su vez, ofrecerá ahorros demostrables en las facturas de energía, lo que reducirá los gastos generales de una empresa. Hay muchos ejemplos de reducción de costes en el primer año que son iguales o mayores que los costes iniciales de implementación de la norma.
- ✓ **Reducción energética.** La reducción de costes y la reducción de energía van de la mano. Al establecer, implementar, mantener y mejorar continuamente un SGE, una organización será capaz de lidiar no solo con las oportunidades iniciales de ahorro de energía, sino que también será capaz de identificar y administrar dónde, cuándo y cómo se consume la energía e identificar mejoras y reducciones de eficiencia energética.
- ✓ **Reducción de la huella de carbono.** Muchas empresas informan sobre su producción de dióxido de carbono (CO₂) o "huella de carbono". Si bien la reducción de CO₂ no se puede citar realmente como una razón principal para la ISO 50001, cualquier reducción energética tendrá una correlación directa con la reducción de la huella de carbono.
- ✓ **Compromiso organizativo.** El enfoque de "arriba hacia abajo" dentro de la ISO 50001 asegura que las principales partes interesadas dentro de la organización entienden el SGE y, por lo tanto, estén motivados para lograr sus objetivos. La ISO 50001 también se puede utilizar para impulsar la participación en la gestión de la energía, dado que puede proporcionar a otros miembros de la organización un enfoque estructurado para gestionar el uso de energía.
- ✓ **Análisis comparativo.** La ISO 50001 requiere que una organización establezca una línea de base para actuar como un indicador del rendimiento energético. Al identificar una línea de base, la eficiencia energética se puede rastrear con el tiempo.
- ✓ **Cumplimiento regulatorio.** Al igual que con otras normas ISO, la ISO 50001 requiere que una organización identifique y tenga acceso a los "requisitos legales y de otro tipo" aplicables en relación con su eficiencia energética, uso de energía, consumo de energía y su SGE. En Reino Unido, la ISO 50001 se puede utilizar para cumplir directamente con el Esquema de Oportunidades de Ahorro de Energía (ESOS). El gobierno estableció ESOS para implementar el Artículo 8 (4 a 6) de la Directiva de Eficiencia Energética de la UE (2012/27 / UE). En general, ESOS se aplica a las grandes empresas del Reino Unido y sus grupos corporativos. La ESOS requieren que las organizaciones revisen el uso total de energía y la eficiencia energética de la organización e identifiquen oportunidades rentables de ahorro de energía mediante la realización de una auditoría

energética. Sin embargo, si una organización tiene un SGE certificado según ISO 50001, se logra el cumplimiento directo con ESOS.

- ✓ **Reputación.** Lograr la ISO 50001 puede ofrecer beneficios reputacionales al demostrar a las partes interesadas que la organización está totalmente comprometida con la gestión del consumo energético y que busca formas de aumentar su eficiencia energética. Cuando una organización se certifica, puede mostrar los logotipos de NQA en los materiales apropiados (acorde a las pautas de NQA/UKAS). Esto no solo puede publicitar las credenciales de una organización, sino que también puede proporcionar información gráfica sobre la gestión energética.
- ✓ **Comercial.** Es una tendencia cada vez mayor que, cuando se busca suministrar bienes y servicios al sector empresarial (particularmente al sector Público), se requieren sistemas acreditados como la ISO 50001, para cumplir con los criterios de la licitación previos al contrato.

2.2.5.2 Ciclo PHVA

El ciclo PHVA es un enfoque de cuatro etapas para lograr la mejora continua. Implica probar sistemáticamente las posibles soluciones, evaluar los resultados e implementar las que funcionan. El núcleo de este enfoque es el liderazgo. La importancia del liderazgo, especialmente a nivel de la gerencia es vital para operar un SGE con éxito, para lograr los niveles de rendimiento requeridos y generar una mejora continua.

En el contexto del SGE, el ciclo PHVA se traduce en:

- **Planificar:** Comprenda el contexto de la organización, establezca una política energética, comprenda los riesgos y las oportunidades y emprenda una revisión energética mediante la recopilación, el análisis y la interpretación de los datos energéticos. Esto ayudará a establecer tendencias, usos de la energía, indicadores de rendimiento de la línea de base energética, objetivos, metas y acciones. Es fundamental asegurar la aceptación de la gerencia y evaluar la necesidad de consultores competentes.



Ilustración 12. Alcance del Sistema de Gestión de la Energía.

- **Hacer:** Implemente los planes de acción y actúe sobre el análisis de los datos para impulsar nuevos estándares de rendimiento energético.
- **Verificar:** Controle, mida, analice, evalúe, audite y realice revisiones energéticas del rendimiento energético en función de objetivos y metas, e informe los resultados.
- **Actuar:** Aquí es donde se toman medidas, dirigidas por la gerencia, para garantizar la mejora continua del SGE y abordar la no conformidad.

2.3 PRINCIPIO Y FUNCIONAMIENTO DE COMPRESORES CENTRIFUGOS

La tendencia en la industria de procesos químicos es construir plantas cada vez más grandes con equipo de un solo componente, más grande y confiable.

La confiabilidad del equipo rotatorio siempre se debe definir en términos de la duración esperada de la planta y el tiempo de amortización requerido para producir utilidades al propietario. Muchas plantas de productos químicos tienen una duración esperada de cinco años o menos, pues el proceso ya será anticuado al cabo de ese tiempo, mientras que las refinerías y las plantas petroquímicas tienen un tiempo de amortización de 10 a 15 años o más (Greene, Compresores, Selección, Uso y Mantenimiento, 1989).

El corazón de muchos procesos y el que más problemas puede ocasionar es el compresor. Cuando se selecciona un tipo de compresor es indispensable contar con todas las condiciones del proceso para su examen. Si hay algún especialista en la planta debe estar informado de esas condiciones, no hacerlo, ha ocasionado una infinidad de problemas.

En la ilustración 10 se muestran los límites de funcionamiento de los compresores de mayor empleo en la IPQ (Industria Petroquímica).

Los compresores centrífugos, también llamados compresores radiales, son un tipo especial de turbomaquinaria; de forma ideal, un compresor centrífugo aumenta la presión del fluido a base de comunicarle energía cinética/velocidad con el rotor.

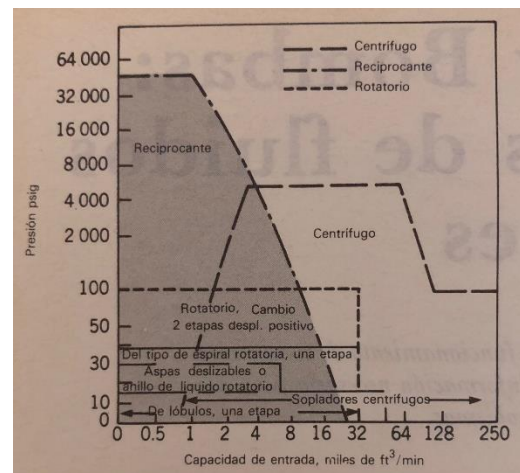


Ilustración 13. Límites de funcionamiento de los compresores en la IPQ.

En un compresor centrífugo se produce la presión al aumentar la velocidad del gas que pasa por el impulsor y, luego, al recuperarla en forma controlada para producir el flujo y presión deseados. En la ilustración 11 se observan un impulsor y difusor típicos. La forma de la curva característica dependen del ángulo de los alabes del impulsor en el diámetro exterior del mismo y también del tipo de difusor. Estos compresores suelen ser unitarios, salvo que el flujo sea muy grande o que las necesidades del proceso exijan otra cosa.

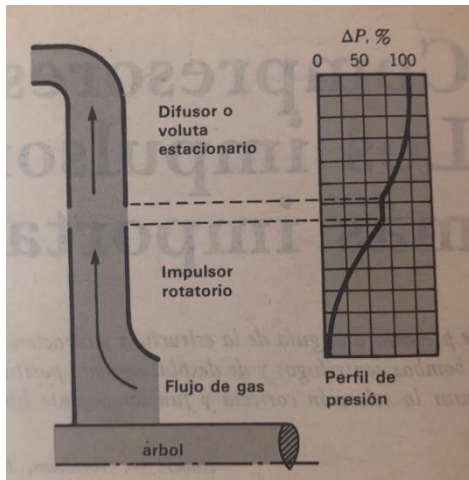


Ilustración 14. Flujo de gas en un compresor centrífugo.

La mayor parte de los impulsores para la IPQ son del tipo de inclinación hacia atrás o inversa, que permite mejor control porque su curva de rendimiento tiene mayor pendiente. La velocidad en las puntas de un impulsor convencional suele ser de 800 a 900 ft/s. Esto significa que el impulsor podrá producir alrededor de 9500 ft de carga, lo que depende del gas que se comprima. Si se requieren valores más altos, se emplean compresores de etapas múltiples. Los gases pesados como el propano, el propileno o freón necesitan una reducción en la velocidad en las puntas, porque estos gases tienen velocidades sónicas más bajas, comparadas con el aire. Para ellos, el número de Mach relativo en el lado del impulsor está limitado a 0.8.

Cuando se evalúa un compresor centrífugo, se debe prestar mucha atención al porcentaje de aumento en la presión, desde el punto normal de funcionamiento hasta el punto de oscilación. Este punto se define como el lugar en donde una reducción adicional en el flujo ocasionará inestabilidad en forma de flujo a pulsaciones y pueden ocurrir daños por sobrecalentamiento, fallas de los cojinetes por la inversión de empuje o por vibración excesiva (Greene, Compresores, Selección, Uso y Mantenimiento, 1989).

Debido a las altas velocidades de los compresores centrífugos, se debe tener más cuidado con el balanceo del rotor. La industria ha aceptado, en general, la siguiente fórmula para los límites de vibración permisibles en el eje o árbol del compresor.

$$z = \sqrt{\frac{12000}{n}}$$

En donde z es el límite de vibración permisible, pico a pico, en mils (milésimas de pulgada) y n es la velocidad, en rpm. Z tiene un límite máximo de 2.0 mils a cualquier velocidad. Debido a las altas velocidades, muchos usuarios especifican la instalación de

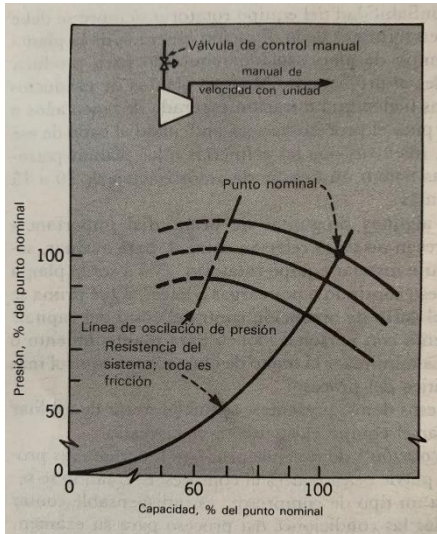


Ilustración 15. La resistencia al flujo se debe sólo a la fricción.

monitoreo de vibraciones del tipo sin contacto para detectar las vibraciones excesivas del eje.

Según sea el sistema para el proceso, se necesitan diversos controles contra oscilaciones para evitar que el compresor llegue al valor en el cual se producen. Por lo general, se debe incluir un factor de seguridad de 5 a 10% para los controles automáticos. Los circuitos de resistencia simple quizá no necesitarán controles contra oscilaciones porque nunca se llegará a la línea en que se producen.

Cuando se aplica una contrapresión fija en el compresor, se debe tener cuidado especial para seleccionar una curva de rendimiento de pendiente pronunciada, es decir, un aumento en la carga de alrededor de 10 a 15% desde el punto nominal hasta el punto de oscilación o inestabilidad. Cuando se recircula el gas en el circuito contra oscilaciones, hay que enfriarlo antes de devolverlo a la entrada del compresor. Además, si se desea velocidad variable, se utiliza un control de presión para regular la velocidad de la unidad motriz.

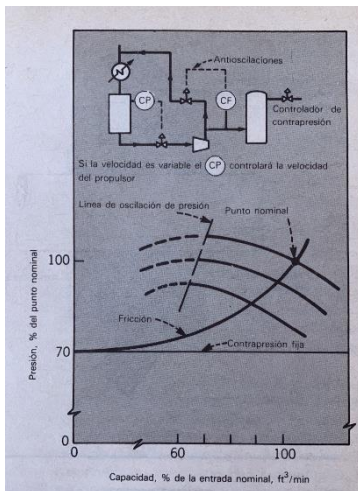


Ilustración 17. El control antioscilaación maneja la contrapresión fija.

Cuando se requieren contrapresión y caída por fricción fijas, se necesita un sistema contra oscilaciones, en especial si pueden haber grandes variaciones en el flujo y la presión. El aumento en la carga desde el punto nominal hasta el de oscilación debe ser cuando menos del 10% para tener buena estabilidad. El sistema de control es el mismo que el de la figura 13, y por lo general, estará basado en la medición del flujo en el compresor. También, en este caso, se debe enfriar el flujo en derivación (bypass) antes de devolverlo al compresor.

Para el proceso, el compresor centrífugo tiene la ventaja de que envía gas libre de aceite y que no hay piezas que se desgasten en la corriente del compresor. Hay disponibles varios tipos de sellos de extremo. La selección depende de

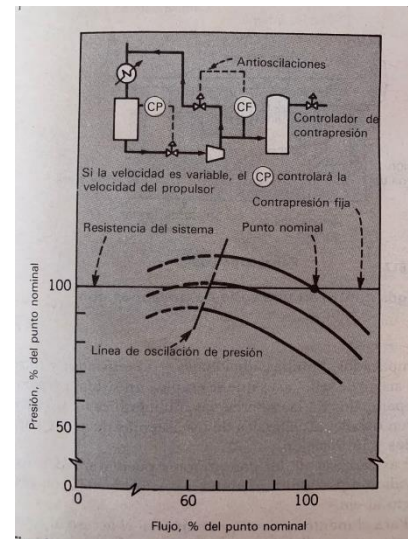


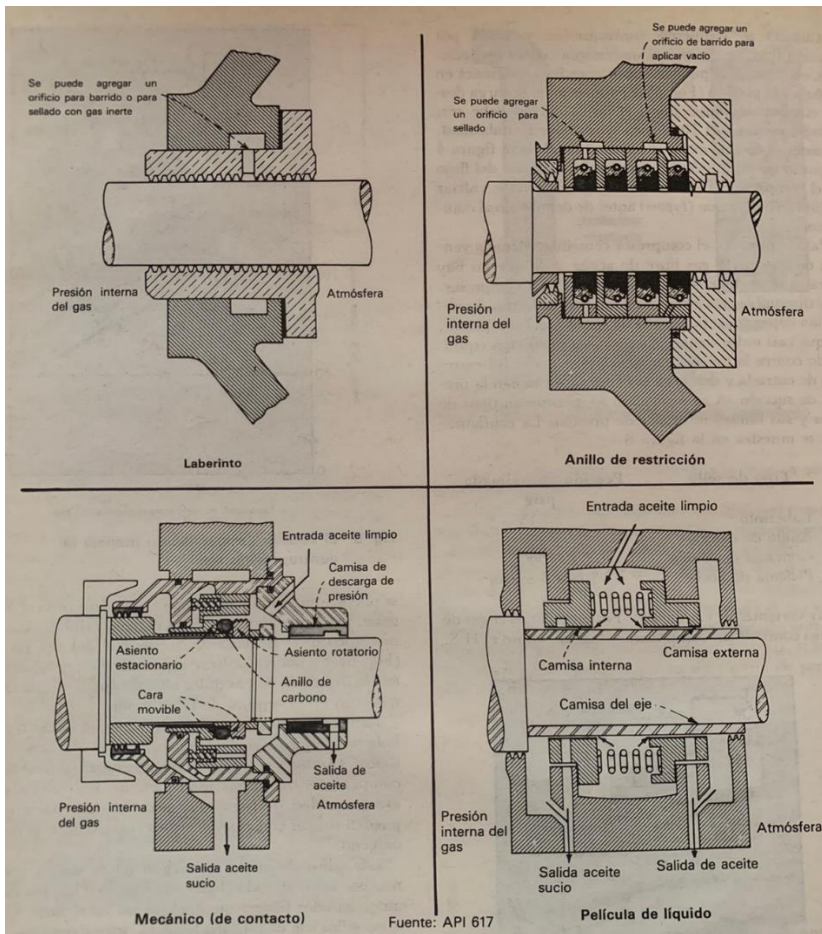
Ilustración 16. La contrapresión fija requiere control cuidadoso.

la presión de succión del compresor, porque casi todos tienen el extremo de descarga equilibrado contra la presión de succión, es decir, los extremos de entrada y descarga del compresor tienen la presión de succión. En la ilustración 18 de muestran la configuración de los sellos mencionados en la tabla 9.

Tipo de sello	Presión aproximada
	Psig
Laberinto	15
Anillo de carbón	100
Contacto mecánico	300
Película de aceite	3000 o mayor

Tabla 9. Tipos de sello y límites normales de presión.

Hay variantes de estos sellos. Por ejemplo, si el gas de proceso contiene un



componente "agrio" como el H₂S, se puede utilizar un gas dulce o neutro como el nitrógeno para amortiguar la zona entre el sello de contacto mecánico o de película de aceite y el gas del proceso. Se podría utilizar un eductor en combinación con la inyección de gas dulce a fin de que las fugas externas sean en el sentido de la educación.

La ventaja del sello de laberinto es que es del tipo de holgura sin piezas con rozamiento y es el más sencillo de todos.

Ilustración 18. Configuración de sellos.

También se utiliza entre las etapas (pasos) de los compresores de etapas múltiples. Su desventaja es la gran cantidad de fugas que permite, las cuales no se pueden tolerar con gases costosos como el nitrógeno o el oxígeno.

Los sellos de anillo de carbón no se suelen utilizar mucho, salvo cuando el gas está limpio o hay un medio amortiguador limpio que incluya un lubricante. Como estos sellos son de mínima holgura, sufren desgaste. Son de menos costo que los sellos de película de aceite o de contacto mecánico y tienen la ventaja de que impiden las fugas externas del gas comprimido.

En el sello de contacto mecánico hay una película de aceite que se mantiene entre sus caras estacionaria y giratoria. Tiene la ventaja de que minimiza el paso de aceite hacia el lado del gas. También es más o menos insensible a la presión diferencial entre la presión de succión del gas y la presión del aceite para sello. Su desventaja es una posible pérdida de la película de aceite, lo cual puede ocasionar serios daños en las caras pareadas.

En el sello de película de aceite, como en el de contacto mecánico, se emplea la película para sellar el gas comprimido de la atmosfera. Al contrario del sello de contacto mecánico, es del tipo con holgura reducida y se necesita una diferencia muy precisa entre la presión de succión y la de sellamiento para minimizar las fugas internas de aceite. Cuando el aceite para el sello es parte del sistema de lubricación, podrían ocurrir pérdidas excesivas y problemas de mantenimiento para eliminar el aceite contaminado y volver a llenar el sistema de lubricación. Este tipo de sello se utiliza por las altas presiones de succión que son comunes en la IPQ (Industria Petroquímica).

La desventaja de los sistemas de sellos de película de aceite y de contacto mecánico es que necesitan controles complicados, bombas adicionales y un enfriador y filtro del aceite de sello, si es que se emplea un sistema separado para ello.

Las carcasas de los compresores pueden ser del tipo dividido o partido, horizontal o verticalmente, con respecto al eje.

Para el mantenimiento es más fácil el acceso al rotor con la carcasa dividida horizontalmente que con la que lo está en forma vertical. Sin embargo, la de tipo horizontal tiene capacidad limitada de presión debido a la gran superficie de sellamiento en la unión. Cuando se utiliza carcasa dividida en sentido vertical, se debe dejar espacio para sacar la carcasa interna y el rotor.

La selección del material para las carcasas y rotores depende del gas que se comprima. Algunos estudios recientes indican que los gases que contienen sulfuro de hidrogeno ocasionan corrosión por esfuerzo en las piezas muy forzadas. Para

contrarrestarlo se necesitan materiales más blandos en el impulsor, lo cual requiere menores velocidades en las puntas del impulsor. En algunos casos, debido a esta reducción de velocidad, habrá que seleccionar el tamaño del compresor inmediato mayor. Esto quiere decir que se debe informar al fabricante del compresor de todos los componentes del gas y las condiciones de operación.

Las ventajas del empleo de un compresor centrífugo son:

1. En el intervalo de 2 000 y 200 000 ft³/min, y según sea la relación de presión, este compresor es económico porque se puede instalar una sola unidad.
2. Ofrece una variación bastante amplia en el flujo con un cambio pequeño en la carga.
3. La ausencia de piezas rozantes en la corriente de compresión permite trabajar un largo tiempo entre intervalos de mantenimiento, siempre y cuando los sistemas auxiliares de aceite lubricante y aceite de sellos estén correctos.
4. Se pueden obtener grandes volúmenes en un lugar de tamaño pequeño. Esto puede ser una ventaja cuando el terreno es muy costoso.
5. Cuando se genera suficiente vapor en el proceso, un compresor centrífugo será adecuado para moverlo con una turbina de vapor de conexión directa.
6. Su característica es un flujo suave y libre de pulsaciones.

Las desventajas son:

1. Los centrífugos son sensibles al peso molecular del gas que se comprime. Los cambios imprevistos en el peso molecular pueden hacer que las presiones de descarga sean muy altas o muy bajas.
2. Se necesitan velocidades muy altas en las puntas para producir la presión. Con la tendencia a reducir el tamaño y a aumentar el flujo, hay que tener mucho más cuidado al balancear los rotores y con los materiales empleados en componentes sometidos a grandes esfuerzos.
3. Un aumento pequeño en la caída de presión en el sistema de proceso puede ocasionar reducciones muy grandes en el volumen del compresor.
4. Se requiere un complicado sistema para aceite lubricante y aceite para sellos.

2.3.1 Selección de compresores centrífugos

Los compresores centrífugos son el tipo que más se emplea en las industrias de procesos químicos porque su construcción sencilla, libre de mantenimiento, permite un funcionamiento continuo durante largos periodos.

El compresor centrífugo más sencillo es el suspendido, de una sola etapa. Los hay disponibles para flujos desde alrededor de 3 000 hasta 150 000 PCMS. El impulsor convencional, cerrado o con placas se utiliza para cargas adiabáticas hasta de unas 12 000 (ft-lb)/lb. El impulsor abierto, de alabes radiales produce más cargas con los mismos diámetros y velocidad, sus variantes, con inductor o con alabes tridimensionales produce hasta 20 000 (ft-lb)/lb de carga.

Se utilizan diseños similares, hechos con materiales más resistentes y a velocidades más altas, en aplicaciones especiales como compresores de aire con engranes integrales, para aplicaciones aeroespaciales, en los turbocargadores para motores de combustión, compresores de carga, etc.

2.3.2 Compresores centrífugos de etapas múltiples

Cuando la carga requerida es muy grande para un solo impulsor, la solución lógica son dos o más impulsores en serie, que forman los compresores de etapas múltiples, que tienen muchas aplicaciones. El más común es el de carcasa dividida horizontalmente con impulsores en serie, cuyo número puede variar de tres a ocho con o sin interenfriamiento. Hay disponibles algunos para flujos desde 1 000 hasta 100 000 PCMS, con cargas politrópicas totales de 20 000 a 100 000 (ft-lb)/lb con base en el número de impulsores o etapas en cada carcasa. Estas carcasas, a veces, están dispuestas por impulsores opuestos para la compensación parcial del empuje y para simplificar los problemas de diseño de cojinetes de empuje, tambores de compensación y sellos para los ejes.

En las carcasas divididas verticalmente o de barril, hechas con acero soldado, fundido o forjado, se utiliza una disposición similar en los impulsores; estas carcasas son las adecuadas para altas presiones que las de divisiones horizontales.

La actual Norma API 617 para Compresores Centrífugos especifica que las carcasas tipo barril se deben utilizar para presiones superiores a unas 200 o 250 psig si el contenido de hidrógeno de la mezcla de gases es del 70% o mayor para evitar las fugas; sus capacidades son entre 1 000 y 100 000 PCMS, y se han construido carcasas para presiones hasta de 10 000 psig.

El servicio con gases, en especial si son corrosivos, tóxicos o están sucios, los impulsores están montados sobre ejes de piñones que giran a diferentes velocidades en las etapas sucesivas. Esto le permite al diseñador lograr óptimas dimensiones y eficiencia con



Ilustración 19. Impulsores de una etapa para compresores.

un volumen de aire o de gas que se reduce en forma continua debido a la compresión. Esto permite que el compresor sea más eficiente que los convencionales de un solo eje para gas o aire.

Un derivado del compresor de etapas múltiples, que se utilizan mucho, es el tipo de carcasa con tornillos externos o modular, destinado a servicio con aire o gas a baja presión, se utiliza para flujos de entre 400 y 20 000 PCMS con cargas de hasta 18 000 y 20 000 (ft-lb)/lb. La carcasa se ensambla por módulos, que son anillos en forma de rosca que contienen, cada uno, una sección de difusor y un impulsor; funciona de 3 000 a 4 000 rpm, lo que permite el empleo de cojinetes de bolas con anillo de aceite o lubricados con grasa. Además, las bajas velocidades en las puntas permiten emplear impulsores de aluminio fundido o fabricado, en vez de los más costosos de acero forjado que se utilizan en compresores para velocidades más altas.

También hay tipos modulares para velocidades más altas, para flujos de 500 a 15 000 ft³/min y cargas hasta de 60 000 ft, con una sola carcasa. Este tipo modular tiene cojinetes, sellos, eje e impulsor para alta velocidad, pero cuesta mucho menos que el de etapas múltiples con carcasa dividida con sentido horizontal.

Todos estos tipos tienen limitaciones mecánicas, debidas a la rigidez del eje y cojinetes, flexión del eje, velocidad crítica y problemas dinámicos con el rotor. Cuando el proceso requiere mayor carga en la que se puede producir con el número máximo de impulsores en una sola carcasa, se pueden utilizar dos o tres carcasas en serie hasta con 25 o 30 impulsores en serie. La selección de esta combinación también

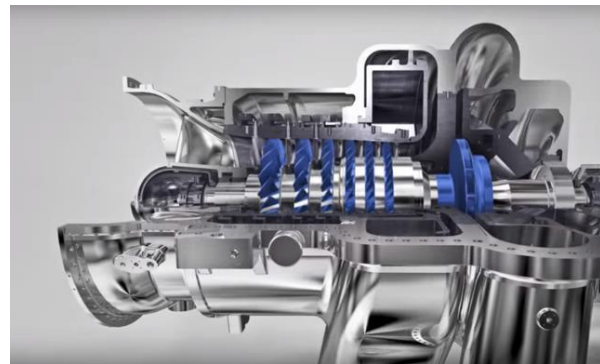


Ilustración 20. Impulsores en serie de un compresor centrífugo múltiple.

requiere determinar lo siguiente, es decir, a) calcular los PCMS (ft³/min en la succión) con cualquier carcasa que se considere, b) carga adiabática o politrópica total en esa etapa o sección, y c) hacer concordar los tamaños y velocidades o sin ellos, para obtener la serie completa de carcasa.

Antes de seleccionar un compresor de etapas múltiples, hay que tener muy en cuenta el aumento de temperatura durante la compresión. Si las temperaturas de descarga son superiores a 350 °F, se debe incluir algún sistema para enfriar el gas, con el fin de evitar el riesgo con los gases calientes de descarga o problemas con los materiales de construcción a altas temperaturas. Por lo general, se necesitan interenfriadores para los gases después

de cada etapa, antes de que haya compresión adiabática (en algunos tipos) o después de cada cierto número de etapas.

2.3.3 Auxiliares para compresores centrífugos

Los distribuidores y consolas para los aceites lubricantes y para sellos ocupan un espacio grande cerca o debajo de los compresores.

El distribuidor para lubricación (Ilustración 18) envía aceite a los cojinetes del compresor. Es un sistema a presión constante, de circulación forzada con bombas de engranaje, enfriadores y filtros de aceite que no son pequeños ni sencillos. Desde el compresor, el aceite va por gravedad hasta el tanque de almacenamiento, por lo que su entrada debe quedar más abajo que el compresor (Ilustración 19). Se necesita espacio para acceso a un gran número de válvulas para desmontar los tubos del intercambiador y para operación y mantenimiento.

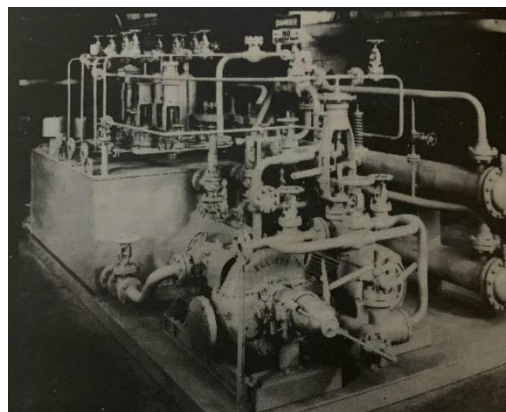


Ilustración 21. Sistema de lubricación de un compresor centrífugo.



Ilustración 22. Disposición de compresor centrífugo con salida por debajo.

En algunos casos, la bomba de aceite se cola fuera del compresor y se cuenta con una bomba auxiliar para el arranque y el paro.

El distribuidor de aceite para sellos, similar al de la figura #, envía aceite limpio y filtrado a los sellos hidráulicos del compresor a presión y temperatura constantes. Los sellos en el extremo del árbol evitan las fugas del gas comprimido a la atmosfera. El aceite para sellos entra a presión entre los anillos de sello en ambos extremos del árbol del compresor, a una presión un poco más alta que la del gas comprimido. El aceite que escapa hacia el lado de baja presión del sello vuelve al tanque y recircula. El que escapa por el lado de alta presión pasa por trampas automáticas. El paso del aceite hacia el gas que se comprime se impide con sellos de laberinto entre el sello de aceite y la carcasa del impulsor (Greene, Compresores, Selección, Uso y Mantenimiento, 1989).

Los componentes de los distribuidores de aceite están integrados a sus tanques, y un distribuidor puede servir para varios compresores, según lo recomiende el fabricante.

2.4 INGENIERÍA DE DETALLE DEL MOTOCOMPRESOR GB-5

2.4.1 Descripción general del conjunto e instrucciones para su uso.

2.4.1.1 Descripción general del conjunto eléctrico del compresor

Las principales partes componentes del conjunto del compresor se describen a continuación:

- Compresor centrífugo de gas. Etiqueta de artículo GB-5C.
- Engranaje de aumento de velocidad ubicado entre el compresor y el motor eléctrico - Tipo BHS T50.
- Motor eléctrico. Etiqueta TC-3637-2BF02-Z.
- Sistema de aceite lubricante común a los distintos componentes del grupo compresor.
- Sistema de sellado de película de aceite.
- Equipos de seguridad y control.

2.4.1.2 Material de los principales componentes

Compresor centrífugo de gas.

<i>Componente</i>	<i>Material</i>
- Caja	Acero fundido
- Difusor de láminas	Acero inoxidable
- Impulsor	Aleación de acero
- Eje	Aleación de acero
- Bancada	Acero

Engranaje de aumento de velocidad.

<i>Componente</i>	<i>Material</i>
- Base y cubierta	Hierro fundido
- Rueda de engranaje	Aleación de acero
- Piñón	Aleación de acero

Sistema de aceite lubricante.

<i>Componente</i>	<i>Material</i>
- Tanque de aceite	Acero al carbón
- Tubería de aceite	Acero al carbón

Sistema de sellado de película de aceite.

<i>Componente</i>	<i>Material</i>
- Tanque de aceite	Acero al carbón
- Tubería de aceite	Acero al carbón

2.4.1.3 Pesos aproximados de las piezas principales componentes

Compresor centrífugo de gas.

- Rotor (con cabezal de acoplamiento): 480 kg.

Engranaje de aumento de velocidad.

- Engranaje de aumento de velocidad: 2 700 kg.
- Acoplamiento dentado entre compresor y engranaje incrementador de velocidad: 50 kg.

Motor eléctrico.

- Motor eléctrico: 15 200 kg.
- Acoplamiento flexible dentado entre engranaje incrementador de velocidad y motor eléctrico: 360 kg.

Sistema de aceite lubricante.

- Tanque de aceite: 2 250 kg.

Sistema de sellado de película de aceite.

- Tanque de aceite: 2 250 kg

2.4.2 Descripción de los distintos componentes

2.4.2.1 Compresor centrifugo de gas

Características de operación

• Manejado con gas (%mol):	N2:	0.244
	CO2:	0.754
	C1:	95.328
	C2:	3.501
	C3:	0.166
	iC4:	0.005
	nC4:	0.002

- Tasa de flujo: 126 700 lb/h -> 57 469.85 kg/h
- Capacidad (en condiciones de entrada): 3 690 cfm -> 6 270.06 m³/h
- Condiciones de entrada:
 - Presión: 190 psia -> 13.36 kg/cm²a
 - Temperatura: 60 °F -> 15.56 °C
- Condiciones de salida:
 - Presión: 530 psia -> 37.26 kg/cm²a
 - Temperatura: 260 °F -> 126.67 °C
- Velocidad normal: 11 000 rpm
- 1ra velocidad crítica: 5 200 rpm
- 2da velocidad crítica: 17 380 rpm
- Potencia absorbida en el acoplamiento: 5 820 BHP

(Ver curvas características del compresor – Dibujo No. CP. 825505)

Descripción

El compresor es del tipo centrífugo multietapa, de diseño partido horizontal y es accionado por un motor eléctrico.

- **Casing.** La carcasa hecha de acero se partió en la línea central horizontal para formar una base y una cubierta. En ambos extremos se proporciona un manguito estacionario que aloja los sellos tipo película de aceite. Internamente, la carcasa lleva los diafragmas entre etapas que se insertan en ranuras de ubicación de la carcasa correspondientes y se bloquean en cada mitad de la carcasa. Los diafragmas forman las paredes del difusor y los canales de retorno para guiar el gas a la entrada del siguiente impulsor. La carcasa se apoya en cuatro puntos mediante unos pies fundidos solidariamente con la mitad inferior de la carcasa y que descansan sobre las dos carcasas de cojinetes que a su vez están ancladas a una bancada común al compresor y al engranaje incrementador de velocidad. En el extremo de succión, la carcasa descansa sobre el muñón y el alojamiento del cojinete de empuje y puede expandirse libremente sólo en dirección transversal. La alineación de la carcasa con respecto a la carcasa del cojinete se determina mediante una chaveta transversal que permite la libre expansión en dirección vertical. En el extremo de descarga (extremo de acoplamiento), la carcasa descansa sobre la carcasa del cojinete de apoyo y puede expandirse libremente en dirección transversal y longitudinal. La alineación de la carcasa con respecto a la carcasa del cojinete se determina mediante una llave que permite la libre expansión de la carcasa en dirección vertical.
- **Cojinete.** El rotor se lleva sobre dos cojinetes de acero revestidos con Babbitt y lubricados con aceite a presión. El cojinete de empuje montado en la carcasa del

extremo libre tiene la doble función de mantener el rotor axialmente en posición y transportar el empuje residual, debido a las presiones diferenciales en los impulsores, que es parcialmente compensado por el tambor de equilibrio del empuje. Esta compensación se obtiene conectando el tambor equilibrador de empuje con la aspiración del compresor a través de dos tubos colocados sobre la tapa de la carcasa. El collarín de empuje es de acero y está encogido en el rotor. Para El sistema de lubricación del compresor es común al engranaje de aumento de velocidad y al motor eléctrico.

- **Rotor.** El rotor consta de:
 - 1 Forjado de aleación de acero con impulsores, tambor de equilibrio de empuje, manguitos espaciadores y collar de empuje.
 - 6 Impulsores de acero aleado con diseño cerrado de flujo inverso, compuestos por un disco central, álabes soldados y un disco protector. Los impulsores se encogen en el extremo del eje y se bloquean mediante chavetas.
- **Sellos.** Los sellos entre etapas son de tipo laberinto metálico y están ubicados en el eje, los impulsores y el tambor de equilibrio para evitar la recirculación interna. Se proporciona el mismo tipo de sellos en ambos extremos del eje para minimizar las fugas a la atmosfera. Los sellos tipo película de aceite están ubicados cerca de las salidas del rotor de la carcasa y evitan fugas de gas al ambiente. Los anillos de sellado están fabricados de acero revestido con una aleación especial antifricción. El sellado se logra utilizando aceite del sistema de sellado de aceite para llenar el espacio libre entre las superficies del eje y del anillo de sello. El aceite que sale de estas superficies fluye axialmente hacia el eje en ambas direcciones. El aceite que fluye hacia afuera y que no ha entrado en contacto con la corriente de gas se recircula al sistema de sellado de aceite. El aceite que fluye hacia el interior pasa a través de un separador de gas y un filtro y es enviado al tanque de aceite contaminado a través de una trampa automática.
- **Acoplamiento.** El compresor está conectado al engranaje de aumento de velocidad a través de un acoplamiento flexible MAAG, tipo ZED-3, que se lubrica con aceite del sistema de lubricación.

2.4.2.2 Engranaje de aumento de velocidad

El engranaje de aumento de velocidad de eje paralelo de una etapa BHS tipo T50 está ubicado entre el compresor de gas y el motor eléctrico.

Características de operación

- Clasificación normal: 4500 kW

- Clasificación máxima: 5060 kW
- Velocidad de la rueda dentada: 1770 RPM
- Velocidad del piñón: 11018 RPM
- Factor de servicio: 1.3

Descripción

Las cajas de engranajes que aumentan la velocidad están hechas de hierro fundido y están divididas a lo largo de la línea horizontal. Es una construcción de tipo a prueba de goteo. Los cojinetes están fabricados en acero revestido con babbitt y lubricados con aceite a presión. La posición axial de los engranajes de doble hélice se mantiene mediante collares de acero.

2.4.2.3 Motor eléctrico

El motor asíncrono trifásico es de fabricación SIEMENS, tipo 1 TC 3637-2 BF-O2-Z.

Características de operación

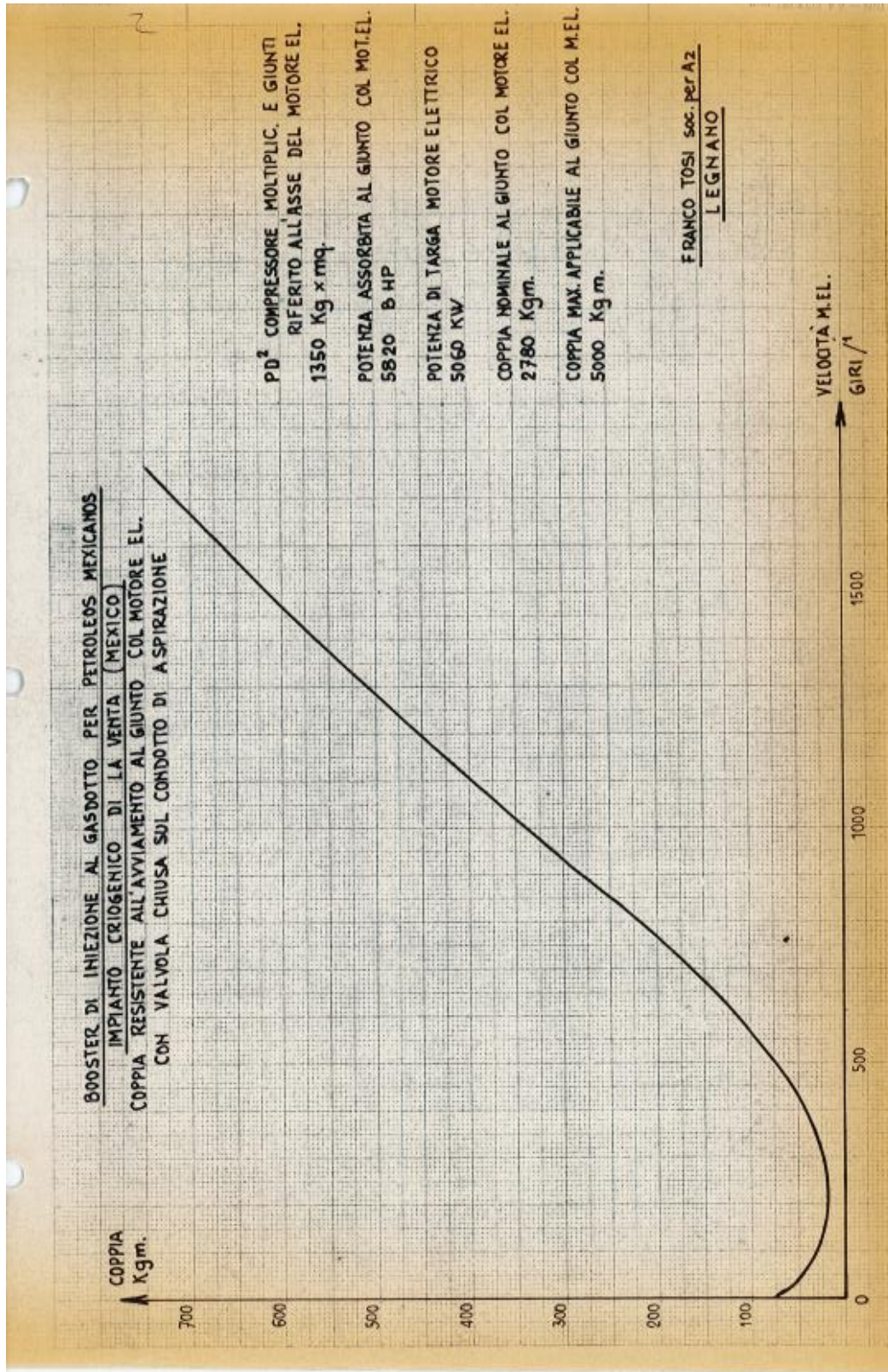
- Clasificación de salida: 5060 kW
- Voltaje del estator: 13200 V
- Frecuencia: 60 Hz
- Corriente del estator: 259 A
- Factor de potencia (P.F): 0.88
- Velocidad: 1794 RPM

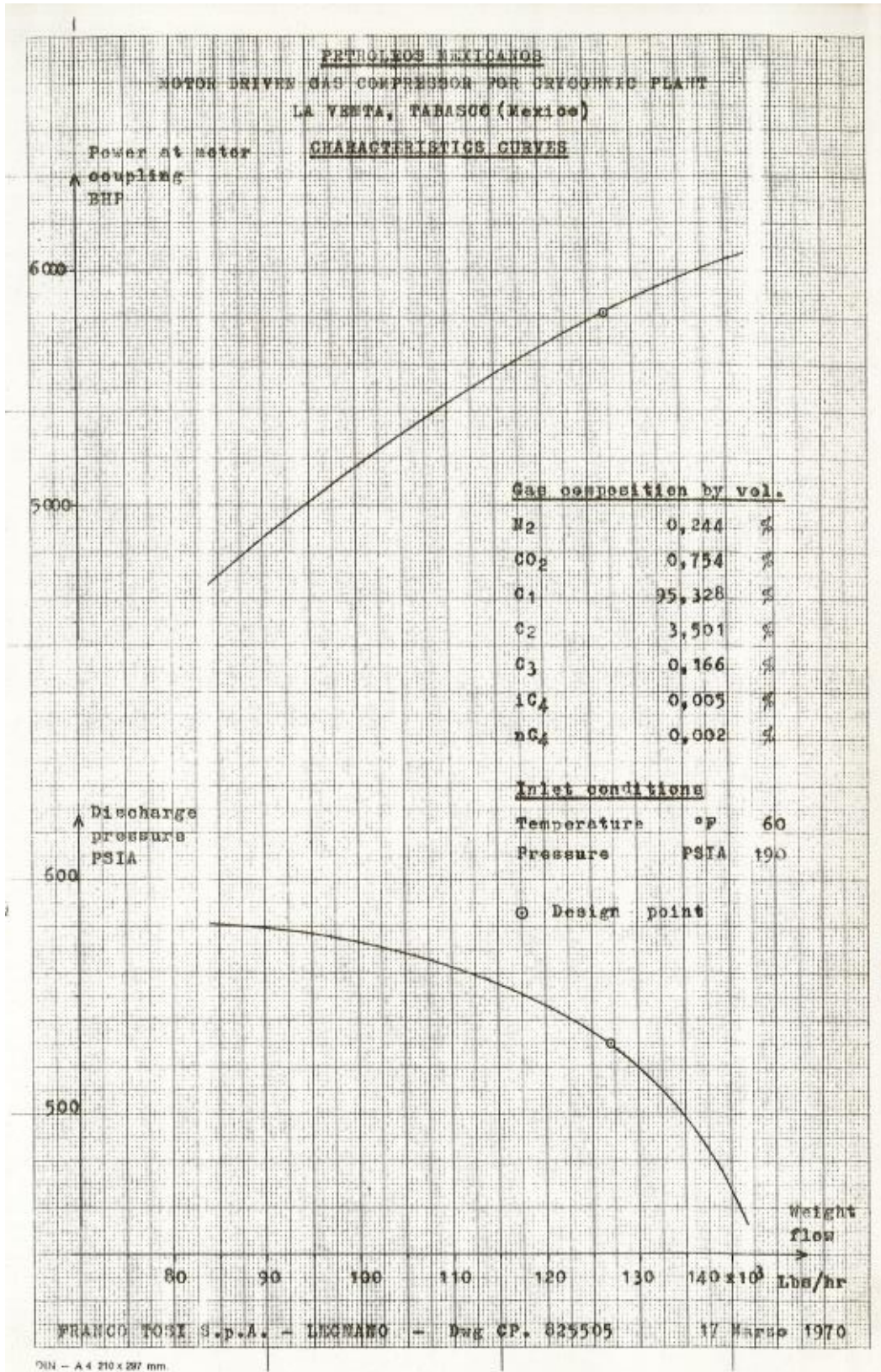
Descripción

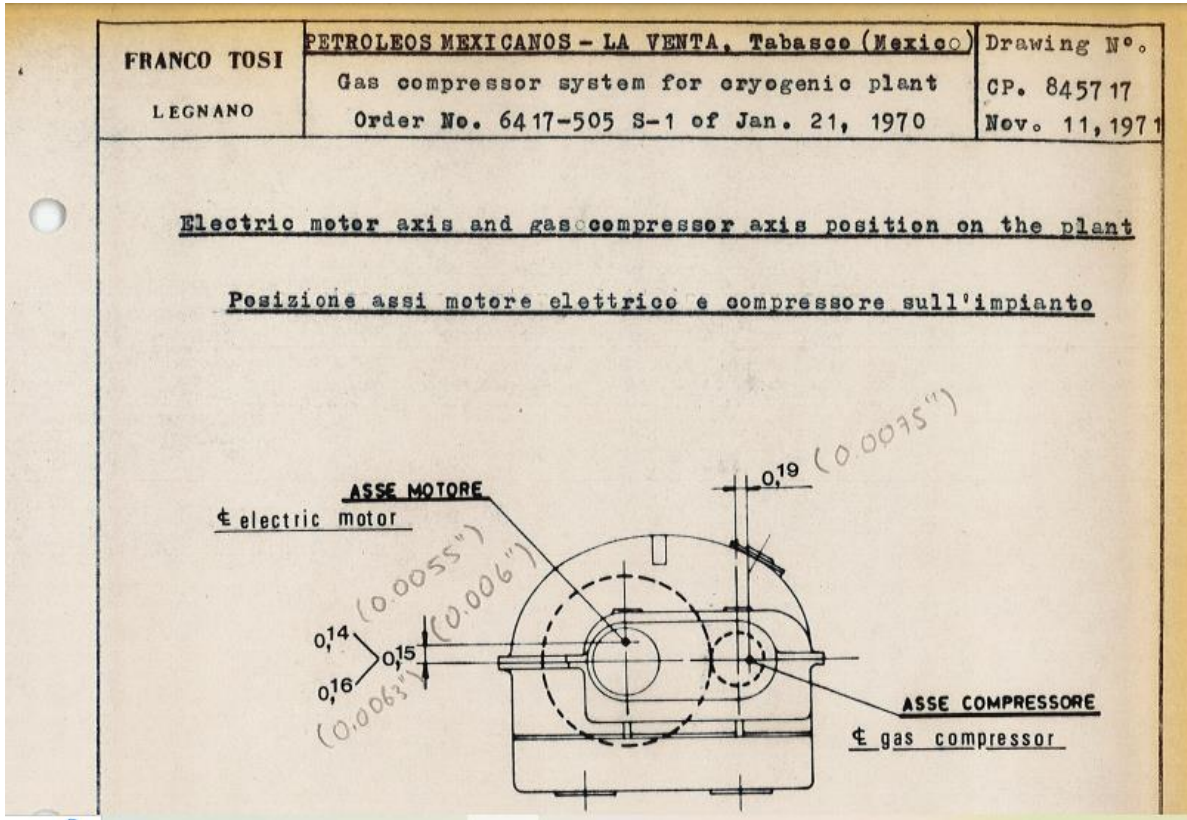
La construcción del motor con rotor de jaula de ardilla es del tipo autoventilado y resistente a la intemperie. Los rodamientos son del tipo manguito radial con lubricación por avance forzado.

El motor eléctrico está acoplado al engranaje incrementador de velocidad a través de un acoplamiento dentado flexible Tacke tipo SBR 180. El motor está anclado a una placa atornillada a la bancada del incrementador de velocidad del compresor.

2.4.3 Curvas características y dibujos del equipo







PETROLEOS MEXICANOS - LA VENTA, Tabasco (Mexico)
 Gas compressor system for cryogenic plant
 Order No. 1078-500 PP-850 of Sept. 7, 1973

Allowable forces and moments on the machine nozzles
Free movements of machine nozzles due to thermal effects

Electric Motor

Speed incr. gear

Air Compr.

F_i = forces Kg.
 M_i = moments Kgm
 x, y, z = movements mm.

	F_x	F_y	F_z	F_T	M_x	M_y	M_z	M_t	x	y	z
	Kg	Kg	Kg	Kg	Kgm	Kgm	Kgm	Kgm	mm	mm	mm
inlet	+ 120	+ 250	+ 120	+ 290	+ 125	+ 60	+ 160	+ 200	-0,03	0,55	0
outlet	+ 100	+ 200	+ 100	+ 230	+ 125	+ 60	+ 160	+ 200	-0,76	0,55	-0,24

Drawing No. CP. 825526

2.5 GUÍA TÉCNICA DE CONFIABILIDAD OPERACIONAL PARA LA MEJOR PRÁCTICA: VENTANAS OPERATIVAS

La confiabilidad operacional se refiere a la capacidad de un sistema, equipo o proceso para realizar sus funciones de manera continua y sin fallos durante un período de tiempo específico bajo las condiciones de operación previstas. En otras palabras, la confiabilidad operacional es la medida de la probabilidad de que un sistema o equipo funcione correctamente durante un determinado período, sin experimentar fallas o interrupciones no planificadas.

El sistema de confiabilidad de Pemex se representa en la siguiente tabla.

Confiabilidad	Mejores Prácticas
Confiabilidad de diseño	1) Costos y ciclos de vida
	2) Mantenibilidad
Confiabilidad humana	3) Capacitación y certificación de habilidades
	4) Compromiso y liderazgo
	5) Orden y Limpieza
Confiabilidad de proceso	6) Plan de producción
	7) Ventanas operativas
	8) Funciones protectoras instrumentadas
	9) Administración de libranzas y reparaciones
Confiabilidad de equipos	10) Administración del trabajo
	11) Censo de equipos y taxonomía
	12) Mantenimiento centrado en confiabilidad
	13) Inspección basa en riesgo
	14) Almacenes y suministros

Tabla 10. Sistema de confiabilidad de Pemex.

La **Guía técnica de confiabilidad operacional para la mejor práctica: ventanas operativas** es un documento que proporciona recomendaciones y directrices técnicas para optimizar la operación y mantenimiento de equipos industriales, sistemas o procesos. En este contexto, las "Ventanas Operativas" generalmente se refieren a intervalos específicos de tiempo o condiciones bajo las cuales se ejecutan actividades de mantenimiento o inspección en un equipo o sistema para garantizar su confiabilidad y rendimiento.

2.5.1 Disposiciones generales

2.5.1.1 Objetivo

Su objetivo es: *“Establecer el proceso y definir los elementos clave, que aseguren el funcionamiento de las unidades y/o activos dentro de los rangos operativos y permitan alcanzar la mayor efectividad y Confiabilidad Operacional conforme a lo establecido en el diseño para cada parámetro.”*

2.5.1.2 Alcance

El alcance de este documento está dirigido hacia la operación óptima y segura de cualquier activo y/o sistema conforme a su diseño. La aplicación de la metodología de VO incluye (sin ser limitativo), los siguientes aspectos:

- Entender la relevancia de las VO para optimizar el desempeño de las operaciones.
- Crear y actualizar las VO incorporando los diferentes aspectos del desempeño en: SSPA, Integridad Mecánica, Confiabilidad, Margen económico, Energía, Pérdidas, etc.
- Manejar las desviaciones (captura y generación de informes de incidentes y No Conformidades) como una manera de asegurar el proceso de mejora continua.

2.5.1.3 Ámbito de aplicación y normativa

Esta guía es de aplicación general y de observancia obligatoria en todos los centros de proceso de Petróleos Mexicanos y Organismos Subsidiarios. Su normativa se compone de la Ley Federal del Trabajo y la NOM-028-STPS-2004 para la Organización del Trabajo-Seguridad en los Procesos de Sustancias Químicas.

2.5.1.4 Definiciones

Frecuencia. Periodo de tiempo entre la ocurrencia de un evento planeado o no.

Beneficio económico. Es la riqueza que obtiene el actor de un proceso económico. Se calcula como los ingresos totales menos los costos totales de producción. En el caso más común, es la diferencia entre el valor que tienen los bienes resultado del proceso productivo (productos) y los que se emplearon en el mismo (insumos).

Gráfica Shewhart. Es un gráfico desarrollado inicialmente por W. Shewhart en 1931, con el objetivo de investigar si un proceso se encuentra bajo control estadístico. El elemento clave en el gráfico es la muestra de control, que nos sirve para construirlo y monitorear si es estable en el tiempo.

Rango de máxima eficiencia. Rango de operación en que un proceso es más estable, confiable y rentable.

Rango de operación. Conjunto de parámetros dentro de los cuales la operación se lleva a cabo de manera sistemática y que permiten establecer un medio ambiente para convertir la materia prima en productos terminados, garantizando una operación segura, efectiva y confiable.

Centro de Trabajo. Aquella entidad constituida por organizaciones e instalaciones interrelacionadas e interdependientes entre sí, que persiguen un mismo fin, el cual en la mayoría de los casos es productivo, pero que no está limitado sólo a éste; el fin puede ser transportar productos o personas, proporcionar servicios, tales como los servicios médicos o de inspección o administrar ciertos recursos. En un Centro de Trabajo, las organizaciones realizan funciones preponderantemente administrativas, mientras que las instalaciones realizan actividades preponderantemente productivas.

Ventanas Operativas. Conjunto de condiciones y variables que intervienen en la operación de una instalación, ajustadas a rangos que permiten operar de manera confiable. Variables a considerar:

- Proceso: Temperatura, Presión, Densidad, Viscosidad, Contaminantes, etc.
- Servicio: Agua de Enfriamiento, Flushing, Vapor, Lubricación, etc.
- Aspectos Físicos: Vibración, Velocidad, Amperaje, Temperatura, etc.

2.5.1.5 Abreviaturas

CEO: Condiciones Esperadas de Operación.

CT: Centro de Trabajo.

DO: Disciplina Operativa.

LSO: Límite Seguro de Operación.

SASP: Subsistema de Administración de la Seguridad de los Procesos.

SSPA: Seguridad Salud y Protección Ambiental.

VO. Ventanas Operativas.

2.5.2 Disposiciones específicas

2.5.2.1 Introducción

Las Ventanas Operativas (VO) establecen rangos de operación controlados en un proceso industrial donde los insumos son transformados en productos, a través de una operación segura y responsable, optimizada económicamente, sin interrupciones o paros no planeados y permitiendo maximizar el ciclo de vida de los activos.

Un elemento clave de la Seguridad de los Procesos es mantener la integridad mecánica de los activos, entendiendo que esto se alcanza cuando un activo se desempeña, opera y mantiene como fue especificado en el diseño, de forma tal que el riesgo a las personas, al medio ambiente y a otros activos se minimiza y se mejora la imagen de la empresa.

Es por eso que dentro de SSPA en la “Guía Técnica para Procedimientos de Operación y Prácticas Seguras”, 800/16000/DCO/GT/007/10 del SASP una de las principales acciones es la definición y establecimiento de los rangos de operación (límites máximo y mínimo de las variables del proceso).

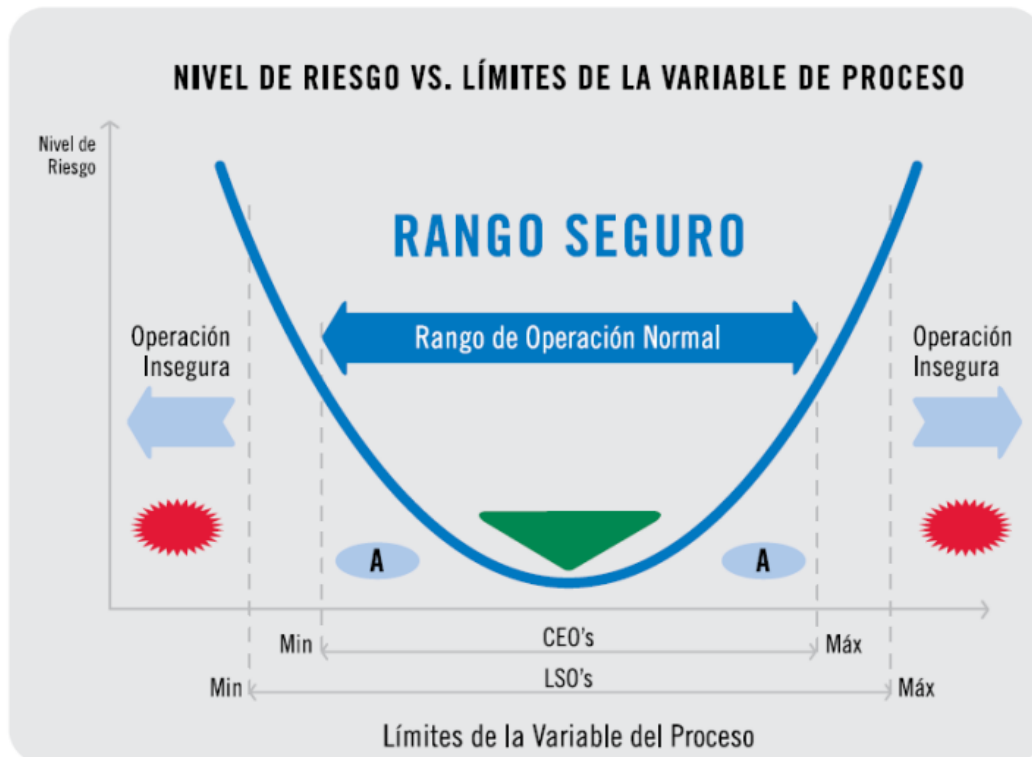


Ilustración 23. Rangos de Operación.


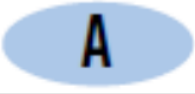

	Mantener valores de las variables de proceso.
	Corregir desviaciones de inmediato. Autorizar la operación temporal o permanente implica Análisis de Riesgo de Proceso y Administración del Cambio.
	Corrección inmediata, paro de emergencia o conducirá a un accidente.

Tabla 11. Nivel de riesgo vs. Límites de la variable de proceso.

Las CEO (Condiciones Esperadas de Operación), son valores de las variables de proceso que aseguran una operación estable del mismo, fuera de estos valores se produce una inestabilidad que, de mantenerse, puede provocar que equipos o instalaciones operen fuera de sus Límites Seguros de Operación (LSO). Las variables de proceso deben mantenerse dentro del área considerada CEO, lo que nos permite una operación estable de las instalaciones, estos valores deben ser suministrados en el paquete de Tecnología del Proceso (Datos del Proceso), a partir de esto cualquier cambio de estas variables debe estar documentado por medio de Administración del Cambio.

Los LSO (Límites Seguros de Operación), representan los límites físicos seguros en los que un equipo o instalación pueden operar, estos valores deben ser suministrados en el Paquete de Tecnología del Proceso (Datos de Diseño de los Equipos), se deben tomar acciones de inmediato para retornar a las CEO. Si por cualquier otra razón se requiere operar de manera temporal o permanente dentro del área de LSO se debe autorizar solo por medio de Administración del Cambio.

Operar fuera de los LSO nos puede provocar una pérdida de contención de las instalaciones o equipos involucrados, por lo que inmediatamente deben tomarse acciones para retornar a CEO o en dado caso debe realizarse un paro de emergencia de las instalaciones.

Las condiciones esperadas de operación definidas en la “Guía Técnica para Procedimientos de Operación y Prácticas Seguras”, 800/16000/DCO/GT/007/10 del SASP se refieren a los límites de las variables de proceso, en la guía se hace extensivo a los aspectos de calidad, servicios principales y a las condiciones físicas de las unidades o equipos.

Dentro de las CEO existe un rango en el que se optimiza la efectividad y la eficiencia de los activos, tomando en cuenta los costos, los riesgos y los beneficios, a este rango se refiere la guía y se le denomina Ventana Operativa.

2.5.2.2 Desarrollo

El desarrollo de la mejor práctica de VO se dividió en cuatro temas principales.

Determinar la mejor opción de operación de la unidad y/o equipo.

Considerar todos los aspectos del diseño y aquellos que de acuerdo a las condiciones actuales de operación puedan provocar ineficiencia, ineficacia o la no operación de las instalaciones, como pueden ser:

- Emisión no controlada de contaminantes que violen las normas ambientales (máximo azufre en gasolinas, máxima cantidad de emisiones a la atmósfera).
- La degradación de los equipos o sistemas que afecten la integridad de las instalaciones (ductos con espesores cercanos al límite de retiro).
- La calidad, cantidad de carga y producto (disponibilidad de crudo, nitrógeno en el gas), etc.

Identificar la alternativa de operación que proporcione el mejor balance entre la productividad, la seguridad de los procesos y del personal; tomando en cuenta los costos, los riesgos en la seguridad, el ambiente y los beneficios esperados. Para esto se debe:

- Revisar de acuerdo a lo establecido en el diseño, el objetivo o función de los equipos.
- Definir el rango de máxima eficiencia.
- Definir el período de validez de los rangos.
- Considerar en qué punto del ciclo de la corrida se encuentra el equipo o unidad.
- Vincular todos los factores considerados con costos.

Establecer las Ventanas Operativas.

- Jerarquizar los activos (instalaciones y equipos) por su IPNP y el impacto a la seguridad, al ambiente y económico de sus paros, a fin de determinar el orden en que se implementarán las VO, considerando con mayor criticidad aquellos cuyas fallas tienen un mayor impacto a la seguridad, al ambiente y económico en la operación de la instalación.
- Para los activos de mayor criticidad se establecerán puntos de control críticos, los cuales, son las variables de la planta y sus equipos, que deben ser monitoreadas y controladas frecuentemente, para garantizar que sean confiables y tengan el mejor desempeño.

Los puntos de control críticos están relacionados con diversas áreas de desempeño entre las que se encuentran SSPA, integridad mecánica, eficiencia, margen de operación, confiabilidad, calidad, etc. y pueden ser:

- Variables de proceso (temperatura, presión, diferencial de presión/ temperatura, flujo, pH, velocidad de inyección de químicos, concentración, etc.).
- Aspectos de calidad de la materia prima, productos intermedios y finales, catalizadores, etc. (ejemplo: % azufre, sodio, contaminantes, concentración de aditivos, punto de ebullición final, punto de inflamación, etc.).
- Condiciones de los equipos (vibración, velocidad, temperaturas de pared, temperatura del lubricante, diferencia de presión, % de carga/apertura, etc.).
- Servicios principales (presión y temperatura de vapor a turbinas, temperatura del agua de enfriamiento, etc.).
- Determine los límites de operación de los puntos de control críticos en base a:
 - Rangos operativos de acuerdo a manuales del fabricante, la normatividad, la experiencia y el conocimiento local en los límites operacionales de proceso.
 - Metas establecidas para las unidades (calidad, consumo de energía, rendimientos y beneficios, etc.).
 - Resultado de estudios de MCC, IBR, corrosión, etc.
 - El diagrama de flujo de proceso, lista de válvulas de relevo, etc.
 - Datos de diseño del proceso, calidad de las alimentaciones, productos intermedios y finales.
 - Manuales de diseño y operacionales.
 - Descripciones del sistema de Salvaguarda y Mitigación, Filosofía de Control y Alarmas, lógica de control y los sistemas de control (interlocks y paros automáticos), y descripciones funcionales de los sistemas de control distribuido.

A medida que se implanten las VO, se adicionarán los activos de acuerdo con su criticidad.



Ilustración 24. Ventanas Operativas.

- Una vez definida la VO, el Grupo Natural del Centro de Trabajo deberá definir el tipo de monitoreo que se le aplicará. Operación que se puede clasificar en 2 niveles:
 - Nivel 1.- Son monitoreados por el personal de turno.
 - Nivel 2.- Son monitoreados por los ingenieros de proceso.La frecuencia del monitoreo de la VO deberá ser al menos cada dos horas.
- Utilice el control estadístico del proceso para verificar que se encuentre dentro de la VO, y grafique los parámetros a través del tiempo mediante la gráfica Shewhart, tome los valores que están entre los límites inferior y superior de control de las VO, **de los cuales se permite una diferencia de 3 veces la desviación estándar del promedio.**

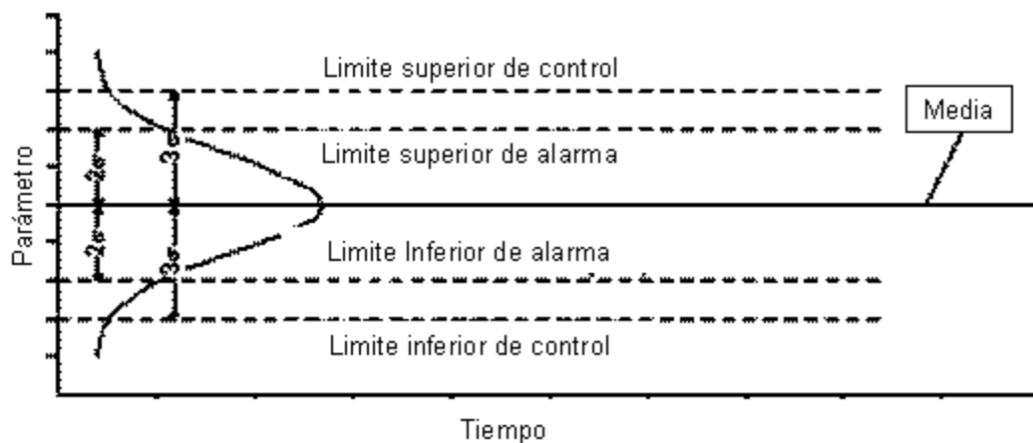


Ilustración 25. Gráfico Shewhart.

- Una vez que se establecen las Ventanas Operativas, el Grupo Natural del Centro de Trabajo elaborará o ajustará los procedimientos operativos, que describan los ajustes admisibles de los parámetros que afectan los puntos de control críticos, para auxiliar a los operadores a obtener una operación segura, confiable y eficiente. Si la operación de los equipos se mantiene en los valores admisibles, el proceso se mantendrá estable y los equipos se podrán programar a mantenimiento de una manera más precisa y confiable.
- El Grupo Natural del Centro de trabajo aplicará DO para difundir y capacitar los procedimientos operativos al personal de operación que se encarga del control de proceso, hasta asegurar su total entendimiento.

Seguimiento al cumplimiento de las VO.

- Al tener implementadas las VO, se deberán monitorear de forma continua, de excederse sus límites por un tiempo prolongado o de manera recurrente, se

considerará como un incidente que conducirá a una disminución del beneficio en la seguridad, medio ambiente y al negocio de la instalación.

- En caso de que no se excedan los límites de operación, difundir los resultados en la Organización de la evaluación de la efectividad en la utilización de las VO.
- Las desviaciones en la aplicación de los procedimientos operativos deben generar un aviso de no conformidad (si es posible generarlo automáticamente en algún medio electrónico), el cual deberá ser revisado frecuentemente por el Grupo Natural del Centro de Trabajo en las reuniones de seguimiento. Se deben elaborar informes de incidentes para casos de no conformidad tales como:
 - Parámetros que repetidamente resultan fuera de los límites de control de las VO. Desviaciones de parámetros que generan una pérdida real o potencial considerable.
 - Cualquier desviación continua de los procedimientos operativos, debido a paros de emergencias o irregularidades serias causadas por la pérdida de un equipo, etc.

En caso de que no existan desviaciones continuas en los parámetros de operación, se deberán aplicar las acciones correctivas pertinentes y el análisis de brechas respectivo para identificar las acciones de mejora, con la finalidad de evitar que las desviaciones sean recurrentes.

- Si se conocen las causas de las desviaciones en las condiciones de operación, aplique las acciones correctivas necesarias para prevenir o mitigar su recurrencia.
- Si las causas de las desviaciones son desconocidas, determinar la causa raíz que llevó a operar fuera de las VO, o a no aplicar los procedimientos operativos, para proponer y desarrollar las acciones correctivas que prevengan o mitiguen su recurrencia.
- Analizar las brechas existentes contra el diseño a fin de identificar mejoras para llevar las unidades a obtener su máxima eficacia y eficiencia.
- Difundir los resultados a la Organización de la evaluación del análisis de brechas existentes de la efectividad en la utilización de las VO.

Implementación de acciones de mejora.

Documentar las mejoras a la gestión de VO, resultado de las actividades de la etapa de seguimiento, elaborar el plan de implantación de las mismas, e incluir, como mínimo, la designación de los ejecutores, la asignación de recursos, las prioridades y las fechas de ejecución.

Cualquier cambio de proceso o de ingeniería permanente deberá ser identificado, y se le realizará el análisis del riesgo de proceso y la administración del cambio

correspondiente, de acuerdo con la “Guía Técnica para Administración de Cambios de Tecnología”, 800/16000/DCO/GT/008/10, del SASP.

Cualquier cambio de proceso o de ingeniería no permanente, deberá ser identificado y registrado como temporal, al cual le realizará el análisis del riesgo de proceso y la administración del cambio respectiva, y en este sentido se le dará un riguroso seguimiento hasta su retorno a la condición original de acuerdo con la “Guía Técnica para Administración de Cambios de Tecnología”, 800/16000/DCO/GT/008/10, de SASP. Se considera que un cambio temporal dejará de serlo hasta que el mismo haya sido removido por completo o el proceso retornado a su condición original.

2.5.2.3 Ejecución y seguimiento

En esta fase se establecen los mecanismos para asegurar el cumplimiento y correcta ejecución de las actividades resultantes de la aplicación de las VO, para incrementar la eficiencia, la seguridad, la confiabilidad de las instalaciones y su beneficio sea cuantificado.

Las acciones requeridas, incluyendo los requerimientos de recursos y las fechas de inicio y terminación, tienen que ser comunicados a cada una de las personas responsables.

Los mecanismos para asegurar el cumplimiento y correcta ejecución de los planes de mejora resultantes del análisis de las VO son:

- Contratación y/o adquisición de recursos.- Ejecutar los programas para adquisición de refacciones, materiales y herramientas especiales, así como la contratación de mano de obra o servicios requeridos para la ejecución del plan.
- Procedimientos.- Aplicar DO para incluir y/o modificar los procedimientos necesarios para la ejecución de las tareas recomendadas.
- Capacitación.- Ejecutar los programas de entrenamiento y/o reentrenamiento que aseguren contar con personal calificado y/o certificado en la ejecución de las tareas.
- Planes y programas en SIV.- Capturar los planes y programas de las actividades para la implementación de mejoras resultantes del análisis de las VO en los SIV.

2.5.2.4 Herramientas informáticas

Para llevar el seguimiento de las VO se requiere la implementación de una base de datos centralizada en la que se encuentre contenida toda la información referente a VO.

Las herramientas para el seguimiento de las VO deben cumplir con los siguientes requisitos:

- Obtener la información de forma directa de las plataformas informáticas, mediante interfaces de comunicación.
- Su estructura de configuración será acorde a la Taxonomía Institucional de Petróleos Mexicanos. Considerar lo establecido en la “Guía Técnica de Confiabilidad Operacional de Censo de Equipos y Taxonomía”, Clave 800/16700/DCO/SCM/ GT/011, o los procedimientos específicos derivados del documento antes mencionado en el CT.

2.5.2.5 Entregables

Los entregables de esta Guía son:

- Los límites máximos y mínimos en los que opera de manera efectiva, rentable y confiable los equipos o unidades a los que aplicará esta práctica.
- El programa de implementación de VO en los equipos o unidades del CT.
- Los reportes trimestrales de las evaluaciones de VO.
- El reporte de brechas identificadas en la operación respecto al diseño.

2.5.3 Disposiciones finales

2.5.3.1 De la Interpretación.

Corresponderá a la Dirección Corporativa de Operaciones por conducto de la Subdirección de la Coordinación de Mantenimiento, la interpretación para efectos técnicos y administrativos de la presente Guía Técnica considerando la opinión de los usuarios involucrados en el ejercicio de las disposiciones descritas en este documento.

2.5.3.2 De la Supervisión y Control.

Las Subdirecciones Operativas, las Gerencias de Operación y Mantenimiento de los Organismos Subsidiarios así como las Gerencias de los Centros de Trabajo en el ámbito de sus respectivas competencias son las encargadas de llevar el control y seguimiento de la aplicación de la presente Guía Técnica.



CAPÍTULO 3

DESARROLLO Y METODOLOGÍA

El presente proyecto se realiza con la finalidad de llevar un control operativo con uso y consumo significativo de la energía de los motocompresores GB-5 de la Planta Criogénica del CPGLV en el cual se pueda visualizar el comportamiento operativo del equipo así como su rendimiento energético.

Es importante que en el control operativo se observe la estabilidad de las condiciones de operación y verificar así la seguridad de los operadores al mantener en los límites seguros de operación las variables clave del compresor.

3.1 CONTROL OPERATIVO DEL COMPRESOR

En la búsqueda continua de un rendimiento óptimo y seguro del motocompresor GB-5, se lleva a cabo un análisis detallado del comportamiento de las variables clave a lo largo de un periodo mensual. Este análisis se basa en la **“Guía Técnica de Confiabilidad Operacional para la Mejor Practica: Ventanas Operativas”** y se realiza mediante la generación de gráficas que ofrecen una representación visual clara de las variaciones en la presión, permitiendo una evaluación estadística de las condiciones de operación.

Las variables clave del motocompresor GB-5 son:

- Flujo másico de gas procesado
- Presión de succión
- Presión de descarga
- Temperatura de succión
- Temperatura de descarga
- Amperaje del motor eléctrico

De acuerdo a las ventanas operativas del motocompresor centrífugo de gas residual (seco) GB-5 del CPG La Venta, se sabe que:

Variable clave	Limites Seguros de Operación (LSO)	Condiciones Esperadas de Operación
Flujo volumetrico	20 a 80 MMSCFD	35 a 75 MMSCFD
Presión de succión	9 a 19.2 kg/cm ²	10 a 15.5 kg/cm ²
Presión de descarga	26 a 40 kg/cm ²	28 a 38 kg/cm ²
Temperatura de succión	8 a 40 °C	10 a 35 °C
Temperatura de descarga	90 a 180 °C	100 a 150 °C

Amperaje	150 a 280 A	170 a 260 A
----------	-------------	-------------

Tabla 12. Ventanas Operativas del motocompresor GB-5.

3.1.1 Generación de gráficas

Se utilizan herramientas especializadas en el Software Microsoft Excel para crear gráficas que ilustren el comportamiento de la variable clave en el período de un mes. La representación gráfica se realiza en función del tiempo (por día), proporcionando una visión temporal de las fluctuaciones en las variables clave.

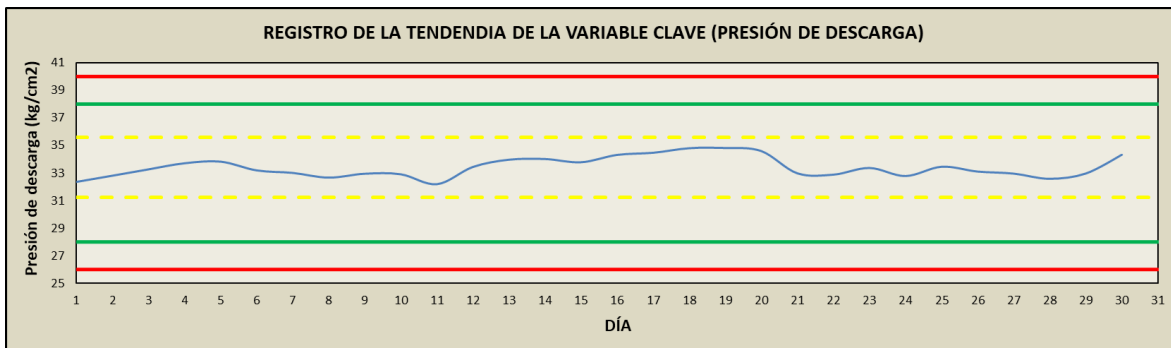


Ilustración 26. Ejemplo: Registro de la tendencia de Pdesc de GB-5.

3.1.2 Inclusión de Límites Seguros de Operación (LSO)

Se incorporan en las gráficas los límites seguros de operación para las variables claves. Estos límites están definidos por los estándares de seguridad según las ventanas operativas y las especificaciones del fabricante del motocompresor. La inclusión de estos límites permite una rápida identificación de cualquier desviación que pueda acercarse o exceder los rangos seguros establecidos. En la Ilustración 26 se pueden observar los LSO representados con la línea roja.

LSO

3.1.3 Representación de Condiciones Esperadas de Operación (CEO)

Además de los límites seguros, se incluyen líneas que representan las condiciones esperadas de operación. Estas condiciones se derivan de datos históricos y patrones observados durante el funcionamiento normal del motocompresor. Facilitan la identificación de tendencias típicas y ayudan a distinguir entre variaciones normales y anomalías que podrían requerir atención. En la Ilustración 26 se pueden observar las CEO representadas con la línea verde.

CEO

3.1.4 Análisis de tendencias y desviaciones

A través de los datos de las variables clave obtenidos mensualmente, se lleva a cabo un análisis detallado de las tendencias y variabilidad de éstas de acuerdo a las Ventanas Operativas. Las desviaciones significativas de las condiciones esperadas o la aproximación a los límites seguros son identificadas y evaluadas en busca de posibles problemas operativos.

Como se menciona anteriormente en el Capítulo 2, la “**Guía Técnica de Confiabilidad Operacional para la Mejor Practica: Ventanas Operativas**” indica:

*Utilice el control estadístico del proceso para verificar que se encuentre dentro de la VO, y grafique los parámetros a través del tiempo mediante la gráfica Shewhart, tome los valores que están entre los límites inferior y superior de control de las VO, de los cuales se permite **una diferencia de 3 veces la desviación estándar del promedio.***

Considerando esto, se emplean las siguientes ecuaciones estadísticas las cuales nos proporcionan los índices de control de proceso utilizados para evaluar la variabilidad y la capacidad del proceso de producción en relación con los rangos operativos esperados y seguros de las variables clave del motocompresor centrífugo GB-5.

3.1.4.1 Índices de Control de Proceso

Estas fórmulas calculan la capacidad del proceso utilizando los límites de las Condiciones Esperadas de Operación (CEO) y los Límites Seguros de Operación (LSO).

CpK1 evalúa cuánto se desvía el valor máximo del rango CEO o LSO por encima del promedio, mientras que CpK2 evalúa cuánto se desvía el valor mínimo por debajo del promedio.

Cuanto mayor sea el valor de CpK1 o CpK2, menor será la variabilidad en comparación con el rango CEO o LSO, lo que indica un proceso más controlado y predecible.

- Para CEO:

$$CpK1 = \frac{CEO_{Max} - \bar{V}_C}{3\sigma_{V.C}}$$

Ecuación 30

$$CpK2 = \frac{\bar{V}_C - CEO_{Min}}{3\sigma_{V.C}}$$

Ecuación 31

Donde:

- CEO_{Max} representa el valor máximo del rango CEO.
- CEO_{Min} representa el valor mínimo del rango CEO.
- \bar{V}_C representa la media aritmética de los valores diarios registrados de la Variable Clave.
- $\sigma_{V.C}$ representa la desviación estándar de los valores diarios registrados de la Variable Clave.

- Para LSO:

$$CpK1 = \frac{LSO_{Max} - \bar{V}_C}{3\sigma_{V.C}}$$

Ecuación 32

$$CpK2 = \frac{\bar{V}_C - LSO_{Min}}{3\sigma_{V.C}}$$

Ecuación 33

Donde:

- LSO_{Max} representa el valor máximo del rango LSO.
- LSO_{Min} representa el valor mínimo del rango LSO.
- \bar{V}_C representa la media aritmética de los valores diarios registrados de la Variable Clave.
- $\sigma_{V.C}$ representa la desviación estándar de los valores diarios registrados de la Variable Clave.

Asimismo, se evalúa la capacidad global del proceso, Cp , considerando tanto la variabilidad como la amplitud del rango CEO y LSO.

$$Cp = \frac{CEO_{Max} - CEO_{Min}}{6\sigma_{V.C}}$$

Ecuación 34

$$Cp = \frac{LSO_{Max} - LSO_{Min}}{6\sigma_{V.C}}$$

Ecuación 35

Un valor de cualquier índice de Control de Proceso ($CpK1$, $CpK2$, Cp) igual a 1 indica que la variabilidad del proceso es adecuada para cumplir con el diseño.

Si el índice es menor que 1, indica que el proceso no es adecuado para cumplir con el diseño debido a una variabilidad excesiva.

Si el índice es mayor que 1, indica que el proceso es más adecuado y tiene capacidad suficiente.

3.1.4.2 Ventana Estadística (V.E)

A diferencia de los rangos CEO y LSO, el rango de la Venta Estadística no se conoce, por el contrario, se desea calcular mediante las anteriores ecuaciones encontrando una solución de VE_{Max} y VE_{Min} que nos resuelva un CpK1, CpK2 y Cp igual a 1.

Utilizando como base las anteriores ecuaciones, se sabe que:

$$CpK1 = \frac{VE_{Max} - \bar{V}_C}{3\sigma_{V.C}} = 1$$

Ecuación 36

$$CpK2 = \frac{\bar{V}_C - VE_{Min}}{3\sigma_{V.C}} = 1$$

Ecuación 37

$$Cp = \frac{VE_{Max} - VE_{Min}}{6\sigma_{V.C}} = 1$$

Ecuación 38

Si se despeja de las ecuaciones 36 y 37 a VE_{Max} y VE_{Min} respectivamente, se obtendrán los valores del rango para la Ventana Estadística. De tal modo que:

$$VE_{Max} = 3\sigma_{V.C} + \bar{V}_C$$

$$VE_{Min} = \bar{V}_C - 3\sigma_{V.C}$$

La idea detrás de la búsqueda de la "Ventana Estadística" (VE) es establecer un rango operativo que optimice la capacidad del proceso, según los índices CpK1, CpK2 y Cp. En este caso, se ajusta la VE para que estos índices sean iguales a 1, lo que significa que la variabilidad del proceso es justa en relación con la amplitud del rango operativo.

Así también, establece los valores críticos que no deben sobrepasar las variables clave, ya que cualquier valor mayor de VE_{Min} dará un CpK2 menor a 1, mientras que cualquier valor menor de VE_{Max} dará un CpK1 menor a 1, y por tanto, un valor menor para Cp.

3.1.5 Acciones correctivas y optimización

Los resultados del análisis sirven como base para la implementación de acciones correctivas y estrategias de optimización. Se busca mantener la operación del

motocompresor dentro de las condiciones esperadas de operación, al tiempo que se buscan oportunidades para mejorar la eficiencia y minimizar el desgaste de los componentes.

3.1.6 Documentación y reportes

Todos los resultados, gráficos y análisis se documentan de manera detallada en el informe mensual, proporcionando una referencia clara para la toma de decisiones futuras, la planificación de mantenimiento preventivo y la optimización continua del rendimiento del motocompresor GB-5. Este enfoque proactivo garantiza una operación confiable, eficiente y segura a lo largo del tiempo.

3.2 EVALUACIÓN ENERGÉTICA DEL COMPRESOR

Los compresores son equipos utilizados ampliamente en la industria; sin embargo, su operación requiere de grandes cantidades de energía y sus costos energéticos pueden llegar a ser mayores al 90% de los costos totales de una planta industrial. El estudio exergético brinda información de la disponibilidad de energía para generar trabajo en un sistema termodinámico. Un parámetro importante para la evaluación del desempeño energético de un compresor, es la eficiencia politrópica. Este parámetro relaciona al trabajo suministrado con el trabajo de flujo de compresión; no depende de la relación de presiones, ni si el proceso es diabático o adiabático; además, aporta información importante sobre las pérdidas energéticas del proceso, como son: la fricción, fugas, deslizamiento, etc.

En este trabajo se presentan modelos matemáticos que parten del análisis de los cambios de entropía de un proceso politrópico, con el fin de determinar la eficiencia energética en función de la eficiencia politrópica para un proceso de compresión, utilizando gas natural seco como fluido de trabajo.

Es de suma importancia puntualizar que las propiedades se determinan de acuerdo a la siguiente composición del gas natural seco:

Componente	Fracción molar en %
Nitrogeno, N ₂	0.244
Dioxido de Carbono, CO ₂	0.754
Metano, CH ₄	95.328
Etano, C ₂ H ₆	3.501
Propano, C ₃ H ₈	0.166

i-Butano, C ₄ H ₁₀	0.005
n-Butano, C ₄ H ₁₀	0.002
Peso molecular del gas	16.82

Tabla 13. Composición del gas natural seco procesado por GB-5.

Las ecuaciones se describen y explican en los fundamentos teóricos (Capítulo 2), por lo que en este capítulo se explica únicamente el orden de aplicación de los modelos matemáticos y la utilización de simuladores para adquirir factores y variables específicas. Todos los cálculos se realizan en el formato de Excel adjunto.

3.2.1 Factor de compresibilidad

Se emplea el modelo termodinámico de la ecuación de estado SRK para determinar el factor de compresibilidad del gas natural de acuerdo a la composición, temperatura y presión del gas.

La ecuación de estado SRK (Soave-Redlich-Kwong) es una ecuación utilizada para describir el comportamiento de gases. Fue propuesta por R. Soave en colaboración con E. Redlich y A. Kwong. La ecuación SRK es una mejora de la ecuación de estado de Redlich-Kwong (RK) y ha demostrado ser más precisa en la predicción de propiedades termodinámicas de sustancias.

El procedimiento matemático emplea diversos factores de correlación. A continuación se describen las ecuaciones aplicadas de dicho modelo termodinámico.

$$\Omega_a = 0.42748 \quad \Omega_b = 0.08664$$

$$\alpha = \Omega_a \frac{(RT_c)^2}{P_c}$$

Ecuación 39

$$b = \Omega_a \frac{(RT_c)}{P_c}$$

Ecuación 40

$$f_w = 0.48 + 1.57w - 0.176w^2$$

Ecuación 41

$$a_c = [1 + f_w(1 - \sqrt{T_r})]^2$$

Ecuación 42

$$a = \alpha \cdot a_c$$

Ecuación 43

$$a_m = (y\sqrt{a})^2$$

Ecuación 44

$$b_m = y \cdot b$$

Ecuación 45

$$A_M = \frac{a_m P}{(RT)^2}$$

Ecuación 46

$$B_M = \frac{b_m P}{RT}$$

Ecuación 47

$$z^3 - z^2 + (A_M - B_M - B_M^2)z - (A_M B_M) = 0$$

Ecuación 48

Donde:

- R es la constante de los gases ideales, $R = 8.314 \text{ kJ/kmol} - ^\circ\text{C}$
- T_c es la temperatura crítica del gas natural
- P_c es la presión crítica del gas natural
- w es el factor acéntrico del gas natural
- T_r es la temperatura reducida del gas natural, se calcula con la ecuación 6.
- y es la fracción de vapor en la mezcla de hidrocarburos del gas natural, que es igual a 1 ya que toda la mezcla es gaseosa.
- P es la presión del gas natural a la succión del compresor
- T es la temperatura del gas natural a la succión del compresor

Es importante mencionar que los valores de T_c , P_c y w se calculan de acuerdo a la composición molar del gas natural, es decir, la propiedad termodinámica del gas natural será la sumatoria de la fracción molar del hidrocarburo por su respectiva propiedad termodinámica como gas puro. Sea X la propiedad termodinámica (temperatura crítica, presión crítica, factor acéntrico) y HC simbolice el hidrocarburo que compone al gas natural:

$$X_{gas\ natural} = \sum_1^n y_{HC} X_{HC}$$

Ecuación 49

Los datos de temperatura crítica, presión crítica y factor acéntrico utilizados en el programa de Excel se obtuvieron de libros con propiedades termodinámicas.

Finalmente se tiene la ecuación 39, la cual es una ecuación cubica que se resuelve mediante el método de Newton Raphson empleando la siguiente formula:

$$x_{(n+1)} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)}$$

Ecuación 50

En términos de factor de compresibilidad:

$$z_{(n+1)} = z_n - \frac{f(z_n)}{f'(z_n)}$$

Ecuación 51

Donde

$$f(z_n) = z^3 - z^2 + (A_M - B_M - B_M^2)z - (A_M B_M) = 0$$

$$f'(z_n) = 3z^2 - 2z + (A_M - B_M - B_M^2) = 0$$

Se supone un valor inicial para el factor de compresibilidad (z_n) que será 1 ya que es el máximo valor número que puede adquirir esta propiedad termodinámica, posteriormente se evalúan las funciones $f(z_n)$ y $f'(z_n)$ con este valor inicial y se calcula el nuevo valor de z (z_{n+1}). Éste valor calculado pasa a ser el nuevo valor supuesto para z_n y se repiten las operaciones, de tal forma que se emplea un cálculo iterativo hasta que $z_n = z_{n+1}$.

3.2.2 Flujo volumétrico actual

La entrada de flujo del gas en el Complejo Procesador de Gas La Venta se cuantifica en millones de pies cúbicos estándar por día (MMSCFD).

Los millones de pies cúbicos estándar por día (MMSCFD) es una unidad de medida utilizada en la industria del gas para expresar el volumen de gas natural producido, consumido o transportado. Un MMSCFD representa un millón de pies cúbicos de gas natural por día, medidos en condiciones estándar de temperatura y presión (STP).

Las condiciones estándar se definen comúnmente como una temperatura de 60 grados Fahrenheit (15.56 grados Celsius, 519.67 grados Rankine) y una presión de 14.73 libras por pulgada cuadrada (psi) o 1 atmósfera. En estas condiciones, un MMSCFD de gas natural ocuparía un volumen de un millón de pies cúbicos.

Es importante convertir los volúmenes de gas medidos en condiciones estándar a condiciones actuales cuando se trabaja con gas natural en el mundo real, ya que las condiciones de temperatura y presión pueden variar significativamente. Este ajuste es necesario para obtener una representación precisa de la cantidad real de gas que se está manejando.

La conversión de MMSCFD a condiciones actuales implica el uso de factores de conversión para ajustar el volumen de gas a las condiciones específicas de temperatura y presión en las que se encuentra. Esta corrección es esencial para el cálculo preciso del contenido energético del gas y para asegurar que las mediciones reflejen con precisión la cantidad real de gas que se está utilizando o produciendo en condiciones de operación específicas.

Para realizar la conversión se utiliza la ecuación 12.

$$Q_s = (CFM) = \left[\frac{(MMSCFD) \times 10^6}{60 \times 24} \right] \left(\frac{14.7}{P_s} \right) \left(\frac{T_s}{60} \right) \left(\frac{Z_s}{1.0} \right)$$

Para esta fórmula P_s está en psi y T_s en °F.

3.2.3 Densidad, ρ

Para determinar la densidad se utiliza el software Aspen HYSYS V10. Se obtienen valores a diferentes temperaturas dentro del rango de límites seguros de operación, de tal forma que se tiene un valor de ρ para cada valor de temperatura. Estos datos se grafican formando una curva de diseño para densidad según la temperatura de succión del motocompresor GB-5.

De acuerdo a la tabla 10 de las ventanas operativas del motocompresor GB-5, se sabe que los LSO de la temperatura de succión del compresor son de 15 a 40 °C, por lo que la alimentación al compresor puede tener temperaturas de operación dentro de este rango, de modo que la curva de diseño para la densidad del gas natural procesado por el compresor es realizada dentro de estos parámetros.

De acuerdo a la gráfica obtenida, se encuentra la ecuación definida y se emplea en el Excel. A continuación se muestran los datos tabulados de temperatura y C_p .

Temperatura, °C	Densidad, lb/ft ³
15	0.5154
17	0.5115
19	0.5076
21	0.5039
23	0.5001
25	0.4965
27	0.4929
29	0.4893
31	0.4858
33	0.4824
35	0.479
37	0.4756
39	0.4723
41	0.4691

Tabla 14. Tabulación de datos de densidad vs. T del gas natural seco.

Al graficar resulta

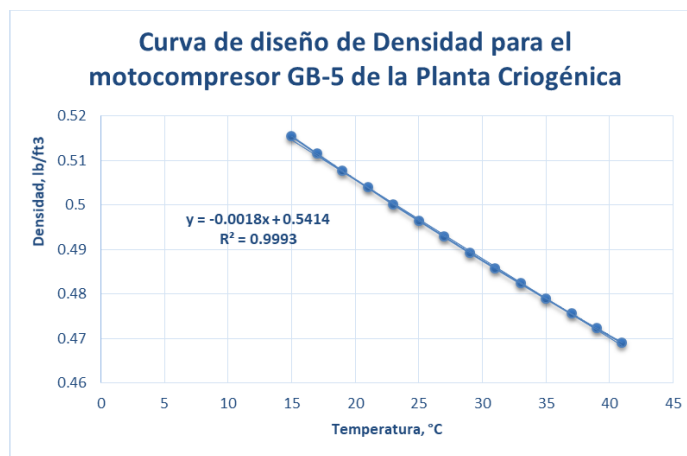


Ilustración 27. Curva de diseño de densidad para el motocompresor GB-5

3.2.4 Relación de presiones

Para determinar la relación de presiones se emplea la ecuación 13.

$$r_c = \frac{P_{(Z+1)}}{P_1} = \frac{P_2}{P_1}$$

Donde P_2 es la presión de descarga del compresor y P_1 la presión de succión.

3.2.5 Calor específico a presión constante, C_p

Para determinar el Calor específico a presión constante se utiliza el software Aspen HYSYS V10. Se obtienen valores a diferentes temperaturas dentro del rango de límites seguros de operación, de tal forma que se tiene un valor de C_p para cada valor de temperatura. Estos datos se grafican formando una curva de diseño para calor específico según la temperatura de succión del motocompresor GB-5.

De acuerdo a la tabla 10 de las ventanas operativas del motocompresor GB-5, se sabe que los LSO de la temperatura de succión del compresor son de 15 a 40 °C, por lo que la alimentación al compresor puede tener temperaturas de operación dentro de este rango, de modo que la curva de diseño para el calor específico del gas natural procesado por el compresor es realizada dentro de estos parámetros.

De acuerdo a la gráfica obtenida, se encuentra la ecuación definida y se emplea en el Excel. A continuación se muestran los datos tabulados de temperatura y C_p .

Temperatura, °C	Calor específico, kJ/kg-°C
15	2.233
17	2.236
19	2.24
21	2.243
23	2.246
25	2.25
27	2.254
29	2.257
31	2.261

33	2.265
35	2.269
37	2.273
39	2.277
41	2.281

Tabla 15. Tabulación de datos de C_p vs. T del gas natural seco.

Al graficar resulta

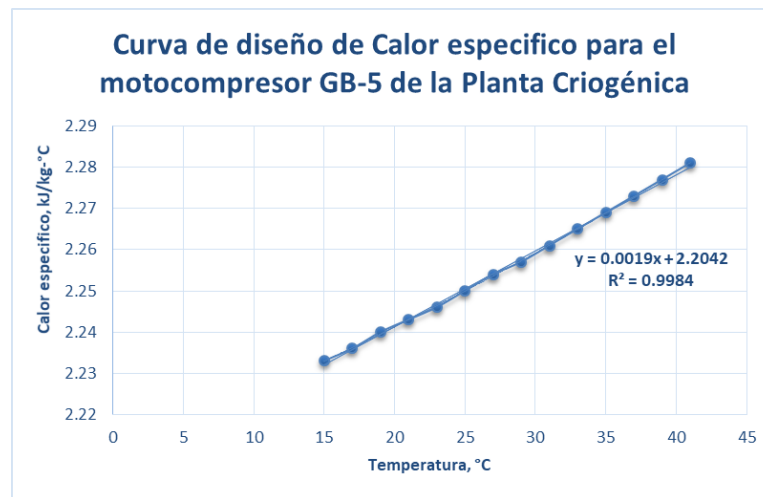


Ilustración 28. Curva de diseño de C_p para el motocompresor GB-5.

3.2.6 Calor específico a volumen constante, C_v

Utilizando la ecuación 18 podemos determinar lo siguiente:

$$C_p - C_v = R$$

$$C_v = C_p - R$$

Considerando un valor de

$$R = 8.3145 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol } ^\circ\text{C}} (M_w)$$

$$R = 8.3145 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol } ^\circ\text{C}} \left(\frac{1 \text{ kmol}}{16.82 \text{ kg}} \right) = 0.49432 \frac{\text{kJ}}{\text{kg } ^\circ\text{C}}$$

3.2.7 Exponente adiabático, γ

Con los valores de C_p y C_v se procede a determinar el exponente adiabático con la ecuación 5, de modo que:

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v}$$

3.2.8 Exponente politrópico, n

Dado que el exponente politrópico (n) es una propiedad del proceso politrópico en sí mismo, generalmente no se determina directamente a partir de propiedades termodinámicas básicas, sino que se obtiene a través de datos experimentales o simulaciones que modelan específicamente el comportamiento del gas y el proceso en cuestión. No hay una fórmula única o directa que proporcione n directamente desde propiedades termodinámicas básicas.

Para calcular el exponente politrópico, se emplea el software de simulación Aspen HYSYS V10 de acuerdo a las condiciones de temperatura y presión de succión y descarga del compresor.

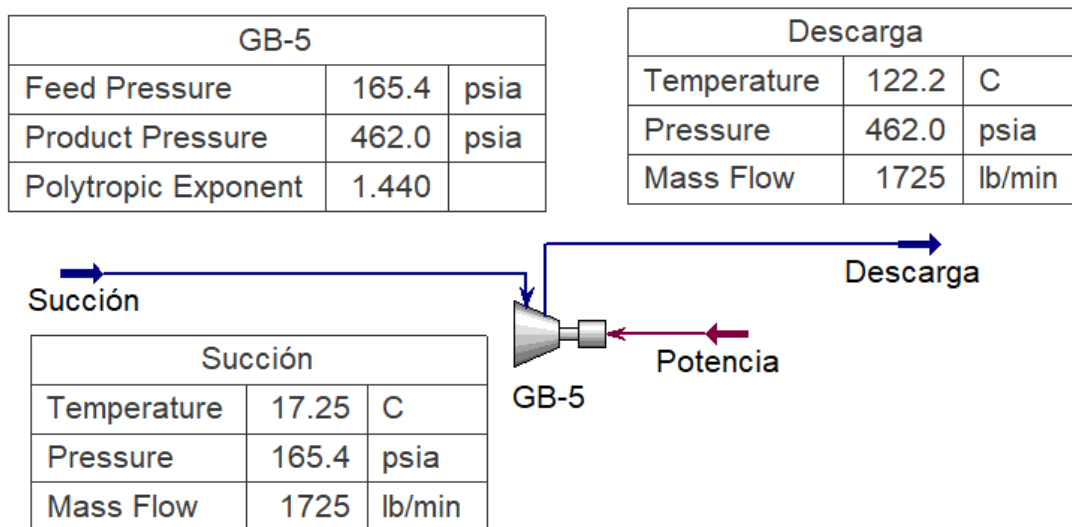


Ilustración 29. Exponente politrópico en Aspen HYSYS V10.

3.2.9 Eficiencia isentrópica de compresión, η_{isen}

Para calcular la eficiencia isoentrópica o isentrópica se emplea la ecuación 21.

$$\eta_{isen} = \frac{(r_{rc})^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1}{(r_{rc})^{\frac{n-1}{n}} - 1}$$

3.2.10 Eficiencia politrópica de compresión, η_{poli}

Para obtener la eficiencia politrópica de compresión se emplea la ecuación 22.

$$\eta_{poli} = \frac{w_f}{w_c} = \left(\frac{n}{n-1} \right) \left(\frac{\gamma-1}{\gamma} \right)$$

Esta ecuación nos define la eficiencia de compresión real en el equipo. Es una herramienta útil para modelar procesos de compresión puesto que refleja de manera más realista las condiciones del mundo real en comparación con los modelos adiabáticos o isentrópicos. En el contexto de un compresor centrífugo, la eficiencia politrópica tiene en cuenta las pérdidas de calor, la fricción y otras irreversibilidades que pueden ocurrir durante el proceso de compresión.

Las principales razones por las cuales la eficiencia politrópica es una representación más precisa de la eficiencia verdadera en compresores centrífugos incluyen:

- Considera pérdidas de calor: En un compresor centrífugo, el proceso de compresión no es adiabático (sin transferencia de calor). Ocurren pérdidas de calor hacia el entorno o ganancias de calor internas debido a la fricción y otros factores. La eficiencia politrópica tiene en cuenta estas pérdidas o ganancias de calor, lo que proporciona una descripción más precisa del comportamiento real.
- Incluye irreversibilidades: Los procesos en compresores reales a menudo incluyen irreversibilidades, como la fricción y la resistencia del flujo. La eficiencia politrópica, al no asumir condiciones ideales, permite modelar de manera más realista estos efectos no deseados.
- Se ajusta mejor a condiciones reales: En la práctica, los compresores centrífugos pueden experimentar variaciones en la velocidad, fluctuaciones de carga y cambios en las condiciones del gas. La eficiencia politrópica es más flexible y puede adaptarse mejor a diferentes condiciones de operación en comparación con modelos adiabáticos o isentrópicos más restrictivos.

3.2.11 Trabajo de compresión ideal, W_s

El trabajo de flujo se obtiene a través de la ecuación 19.

$$w_s = h_{(z+1)s} - h_1 = \left(\frac{k}{k-1}\right) RZ_1 T_1 \left[(r_c)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]$$

3.2.12 Trabajo de compresión real, W_c

Una vez obtenida la eficiencia politrópica y el trabajo de flujo, se puede determinar el trabajo de compresión real mediante la ecuación 22 que nos dice que:

$$\eta_{poli} = \frac{w_s}{w_c}$$

$$w_c = \frac{w_s}{\eta_{poli}}$$

3.2.13 Eficiencia mecánica

Determinar la eficiencia mecánica en un compresor centrífugo implica calcular la relación entre la potencia de entrada (energía suministrada al compresor) y la potencia de salida (energía entregada al gas comprimido). La eficiencia mecánica se expresa como un porcentaje y se calcula de la siguiente manera:

$$\eta_{mec} = \frac{\text{Energía entregada al gas comprimido}}{\text{Energía suministrada al compresor}} \times 100 = \frac{w_{sal}}{w_{ent}} \times 100$$

Ecuación 52

La potencia de entrada se refiere al trabajo (energía) proporcionada al compresor para que funcione. Puede calcularse a partir de la potencia eléctrica consumida o la potencia del motor que impulsa el compresor. Para determinarla se emplea la siguiente ecuación:

$$w_{ent} = \frac{V \cdot I \cdot \sqrt{3} \cdot \cos \phi}{1000}$$

Ecuación 53

Donde:

- V es la tensión eléctrica, en Voltios. La tensión que alimenta al motor eléctrico del compresor GB-5 es de 13800 V.
- I es la intensidad de corriente eléctrica en Amperios.
- $\sqrt{3}$ es un factor para sistemas trifásicos.
- ϕ es el factor de potencia del motor. El factor de potencia del motor eléctrico de GB-5 es de 0.88 (Ver tema 2.4.2 Descripción de los distintos componentes, Motor eléctrico en el Capítulo 2).

- P_{ent} es la potencia de entrada, en kW.

El trabajo real de compresión es la energía entregada al gas comprimido y se relaciona con la potencia de salida, por lo que se puede determinar la potencia de salida si se conoce el trabajo real de compresión por unidad de masa mediante la siguiente ecuación:

$$w_{sal} = W \cdot w_c$$

Ecuación 54

Donde:

- W es el flujo másico, en kg/s.
- w_c es el trabajo real de compresión, en kJ/kg.
- w_{sal} es la Potencia de salida, en kW.

3.2.14 Eficiencia global del motocompresor GB-5

La eficiencia global de un compresor se define por el producto de la eficiencia de compresión (también conocida como eficiencia politrópica, η_{poli}) y la eficiencia mecánica del compresor, (η_{mec}). La eficiencia global representa cuánta energía se conserva durante el proceso de compresión, teniendo en cuenta tanto la eficiencia termodinámica como la mecánica. De tal forma que, relacionando las anteriores ecuaciones resulta:

$$\eta_{GB-5} = \eta_{poli} \cdot \eta_{mec}$$

Ecuación 55

$$\eta_{GB-5} = \frac{w_f}{w_c} \cdot \frac{w_{sal}}{w_{ent}} = \frac{w_f}{w_c} \cdot \frac{W \cdot w_c}{w_{ent}} = W \frac{w_f}{w_{ent}} \times 100$$



CAPÍTULO 4

RESULTADOS

En este capítulo, se presentan y discuten los resultados obtenidos durante el período de monitoreo de 31 días del motocompresor centrífugo de gas residual (gas seco), identificado como GB-5.

La recopilación meticulosa de datos y la representación gráfica de las variables clave proporcionan una visión detallada del comportamiento operativo del equipo a lo largo del tiempo.

Durante el periodo de desarrollo de este proyecto se realizó un formato de control operativo denominado **“Reporte de control operativo del equipo con uso y consumo significativo de la energía de motocompresores GB-5’s”**.

PEMEX TRANSFORMACIÓN INDUSTRIAL		COMPLEJO PROCESADOR DE GAS LA VENTA UNIDAD DE NEGOCIOS UNO PLANTA CRIOGÉNICA RECUPERADORA DE LICUABLES		REPORTE DEL CONTROL OPERATIVO DEL EQUIPO CON USO Y CONSUMO SIGNIFICATIVO DE LA ENERGÍA MOTOCOMPRESORES GB-5's	
		GB-5B REPORTE DE OCTUBRE 2023		Una operación por día	
6	- Flow rate : lba/h 126,700 -			0,000 \$	
7	- Capacity (at inlet conditions) : cfm 3690 -			0,754 \$	
8				95,128 \$	
9				3,501 \$	
10				0,166 \$	
11	Inlet conditions:			0,005 \$	
12	- Pressure : PSIA 190 -			0,002 \$	
13	- Temperature : *F 60 -				
14					
15	Outlet conditions:				
16	- Pressure : PSIA 530 -				
17	- Temperature : *F 260 -				
18					

En este formato se exponen los componentes necesarios para llevar un registro del control operativo mensual del equipo.



**COMPLEJO PROCESADOR DE GAS LA VENTA
UNIDAD DE NEGOCIOS UNO
PLANTA CRIOGÉNICA RECUPERADORA DE LICUABLES**

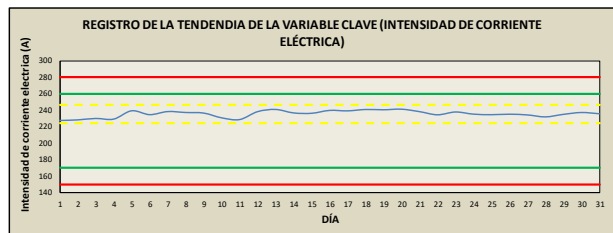
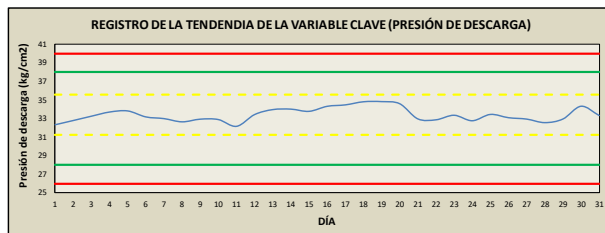
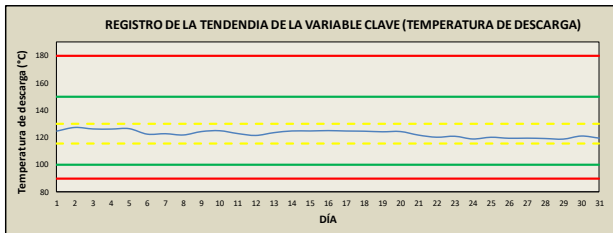
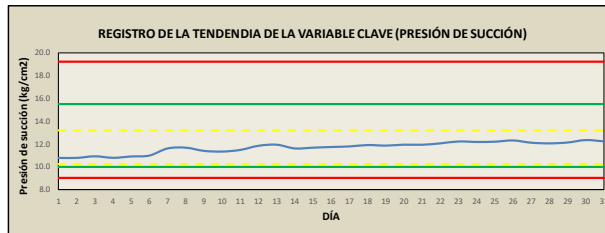
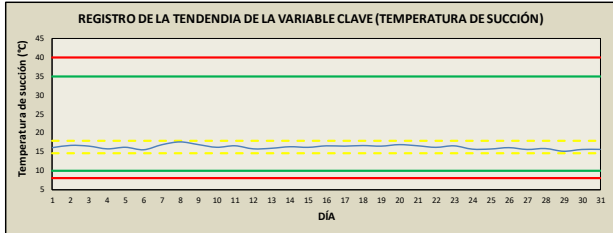
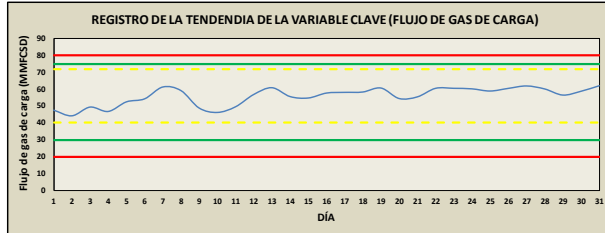
REPORTE DEL CONTROL OPERATIVO DEL EQUIPO CON USO Y CONSUMO SIGNIFICATIVO DE LA ENERGÍA MOTOCOMPRESORES GB-5's



GB-5B REPORTE DE OCTUBRE 2023

- Flow rate	: lbs/h	126,700
- Capacity (at inlet conditions)	: cfm	3690
Inlet conditions:		
- Pressure	: PSIA	190
- Temperature	: °F	60
Outlet conditions:		
- Pressure	: PSIA	530
- Temperature	: °F	260

Gas composition by vol.		
N ₂	0,844	%
CO ₂	0,754	%
O ₂	95,328	%
C ₂	3,501	%
C ₃	0,166	%
iC ₄	0,005	%
nC ₄	0,002	%



VARIABLES DE CONTROL CLAVES

DIA	UNIDAD	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
Flujo volumétrico	MMFCSO	47.61	44.26	49.43	46.84	52.52	54.31	61.32	59.19	48.85	46.25	49.60	56.88	60.80	55.65	54.80	57.73	58.14	58.35	60.71	54.49	55.48	60.53	60.54	60.23	58.94	60.50	61.93	60.17	56.54	58.79	62.05
Pasucción	Kg/Cm2	10.79	10.79	10.93	10.80	10.92	11.00	11.63	11.70	11.42	11.36	11.50	11.87	11.96	11.63	11.70	11.76	11.81	11.93	11.88	11.97	11.96	12.08	12.25	12.21	12.23	12.34	12.14	12.08	12.16	12.38	12.26
Podescarga	Kg/Cm2	32.36	32.81	33.27	33.71	33.83	33.19	33.01	32.67	32.95	32.91	32.19	33.44	33.97	34.02	33.78	34.32	34.47	34.80	34.82	34.59	32.98	32.88	33.37	32.78	33.46	33.11	32.96	32.58	32.97	34.33	33.34
Tuación	°C	16.08	16.71	16.50	15.75	16.18	15.50	16.90	17.67	16.92	16.18	16.60	15.75	15.91	16.33	16.17	16.58	16.50	16.67	16.50	16.92	16.60	16.17	16.58	15.67	15.71	16.08	15.58	15.83	15.08	15.58	15.60
Todescarga	°C	124.75	127.32	126.25	126.17	126.46	122.56	122.90	122.00	124.42	125.00	123.00	121.67	123.64	124.83	124.83	125.06	124.80	124.67	124.25	124.42	121.90	120.42	121.08	119.17	120.38	119.67	119.75	119.50	119.08	121.25	119.75
Amperaje	A	227.75	228.42	230.08	229.33	239.00	234.50	238.10	237.00	236.33	230.82	238.00	240.55	236.50	236.50	236.08	239.42	238.90	240.50	240.17	240.83	238.00	234.33	237.58	235.08	234.46	235.00	234.17	231.92	234.83	237.00	235.56
Eficiencia de Compresión	%	70.52	70.48	71.03	72.29	71.93	71.97	68.54	68.49	68.83	68.19	67.23	67.93	67.45	69.06	68.10	75.00	69.15	69.35	69.76	69.03	66.86	66.53	66.50	65.94	66.64	65.92	66.30	66.19	66.24	67.01	66.47
Eficiencia Mecánica	%	85.37	80.48	87.36	84.54	89.89	91.22	94.78	90.05	78.62	77.49	80.98	85.83	91.57	88.47	86.76	82.44	89.83	88.32	92.26	81.80	82.65	89.60	87.38	87.21	86.28	86.70	91.11	89.41	82.64	84.88	89.78
Eficiencia del motorcompresor GB-5	%	60.20	56.72	62.05	61.12	64.65	65.65	64.96	61.68	54.11	52.84	54.44	58.30	61.77	61.10	59.08	61.83	62.12	61.25	64.36	56.47	55.28	59.61	58.11	57.50	57.50	57.15	60.40	59.18	54.74	56.88	59.68

	FLUJO DE GAS COMPRIMIDO MMFCSO				PRESION DE SUCCIÓN Kg/Cm2				PRESION DE DESCARGA Kg/Cm2				TEMPERATURA DE SUCCIÓN °C				
	Rango	CPk1	CPk2	CP	Rango	CPk1	CPk2	CP	Rango	CPk1	CPk2	CP	Rango	CPk1	CPk2	CP	
VE	40.2	a	71.7	1.0	1.0	10.2	a	13.2	1.0	1.0	1.0	31.3	a	35.6	1.0	1.0	
CEO	30.0	a	75.0	1.2	1.6	1.4	10.0	a	15.5	2.5	1.2	1.8	28.0	a	38.0	2.1	2.5
LSO	20	a	80	1.5	2.3	1.9	9	a	19.2	5.0	1.8	3.4	26	a	40	3.1	3.4

	TEMPERATURA DE DESCARGA °C				INTENSIDAD DE CORRIENTE ELÉCTRICA Amperios							
	Rango	CPk1	CPk2	CP	Rango	CPk1	CPk2	CP				
VE	115.6	a	130.3	1.0	1.0	224.1	a	246.9	1.0	1.0	1.0	
CEO	100.0	a	150.0	3.7	3.1	150.0	a	260.0	2.2	5.7	3.9	
LSO	90.0	a	180	7.8	4.5	6.1	150.0	a	280	3.9	7.5	5.7

CP=1 Capacidad del Proceso adecuado para lo que fue diseñado
 CP>1 No es adecuado para cumplir con el diseño
 CP<1 Capacidad del Proceso más adecuado
 CP(LSO)>CP(CEO)>CP(VE)

(V.E.): Ventana Estadística
 (C.E.O.): Condiciones Esperadas de Operación
 (L.S.O.): Límites Seguros de Operación

COMENTARIOS Y OBSERVACIONES

EN EL MES DE OCTUBRE DEL 2023 EL MOTOCOMPRESOR GB-5B OPERÓ DENTRO DE LAS CONDICIONES ESPERADAS DE OPERACIÓN LAS PRINCIPALES VARIABLES CLAVES DESCRITAS EN ESTE FORMADO, SE AGREGAN LOS DATOS Y TENDENCIAS DE LAS MISMAS, Y SU CALCULO DE CPK1, CPK2 Y CAPACIDAD DE PROCESO PRINCIPAL

Elaboro	Revisó	Autorizó
Ing. Dana Belén Chiñas Barrios	Ing. Rafael Guadalupe Cruz Jiménez	Ing. Luis Baeza Alor
Residente Profesional	Ing. De Producción	Coordinador de Producción UN-1

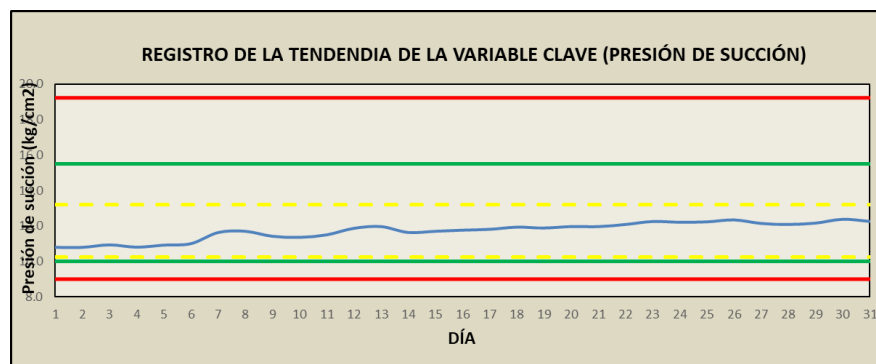
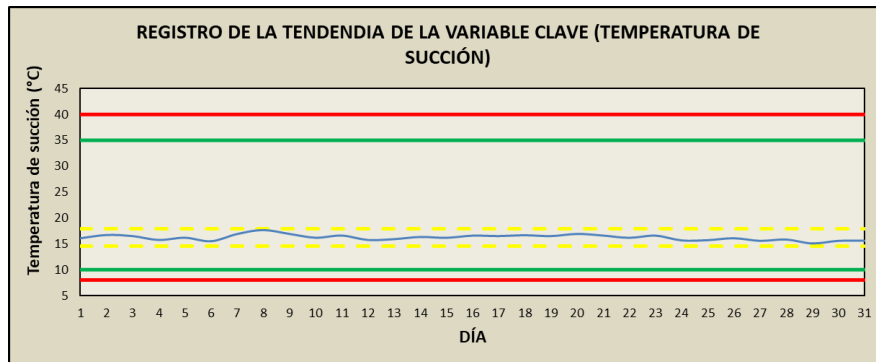
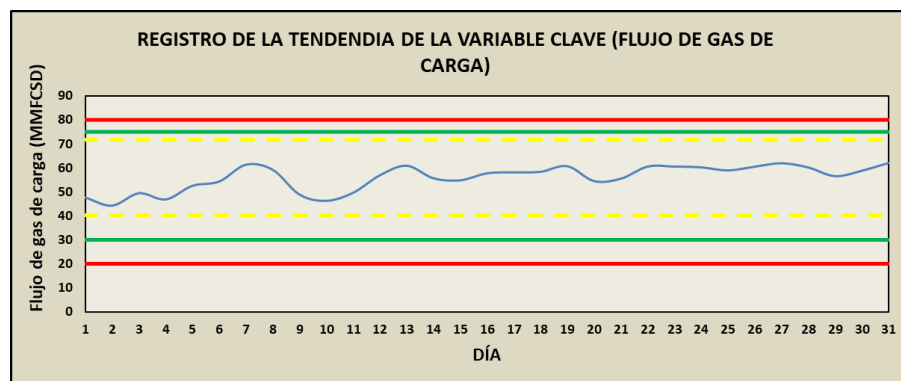
LV-CRIT-005 Formato 03

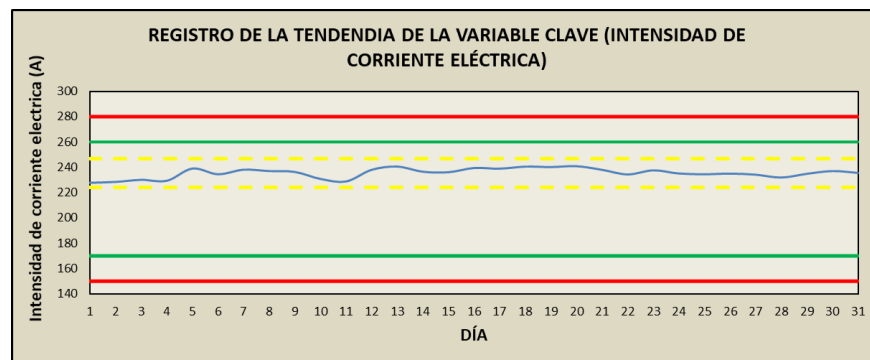
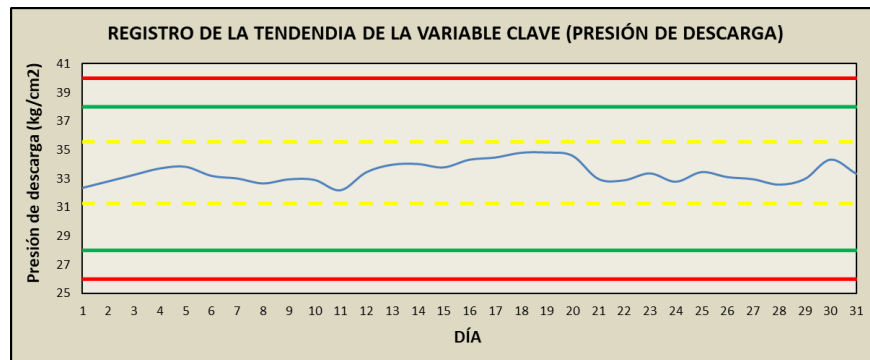
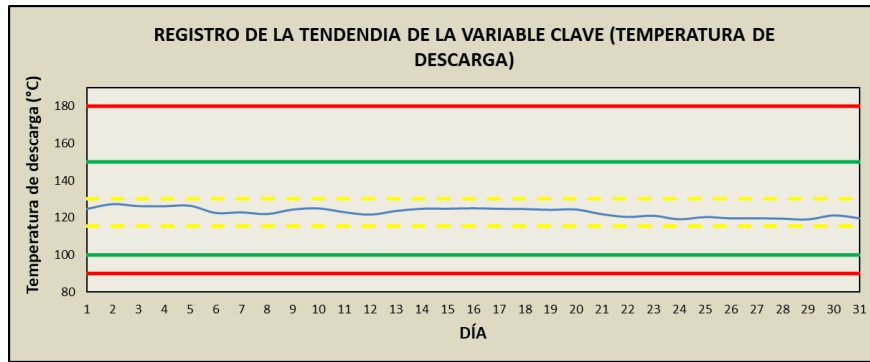
"En PTI continúa la mejora, transformando su cultura empresarial con eficiencia y rentabilidad en sus procesos; manteniendo la seguridad de las operaciones con criterios de sustentabilidad para competir eficazmente"

4.1 TENDENCIA DE LAS VARIABLES CLAVE

4.1.1 Descripción de resultados

Para comprender la dinámica del motocompresor, se han registrado y analizado las variables clave de éste, incluyendo la presión de succión y descarga, temperatura de succión y descarga, flujo de gas alimentado al compresor y amperaje del motor eléctrico. Estos parámetros han sido trazados, como lo indica la **“Guía técnica de confiabilidad operacional para la mejor práctica: ventanas operativas”**, mediante gráficos Shewhart donde la variable independiente es el día del mes y la variable dependiente es la variable clave, permitiendo una evaluación visual de su rendimiento en un lapso de 31 días.





En ellas se grafican los Límites Seguros de Operación (rojo), las Condiciones Esperadas de Operación (verde) y la Ventana Estadística (amarillo punteado) explicadas en el Capítulo 3. La línea azul representa el comportamiento de la variable clave a lo largo del mes.

4.1.2 Interpretación de resultados

Las gráficas de Shewhart proporcionan una herramienta visual efectiva para evaluar la estabilidad y consistencia del comportamiento operativo del motocompresor GB-5 durante el período de 31 días. Cada gráfica presenta la variación diaria de una variable clave, permitiendo identificar patrones inusuales o tendencias que podrían indicar problemas potenciales.

Las gráficas presentadas de las variables clave del mes de octubre presentan oscilaciones significativas principalmente en el flujo de gas de carga, presión de succión y

presión de descarga del compresor, sin embargo, son inherentes al proceso y no representan anomalías significativas ya que se mantienen dentro de los límites seguros y condiciones esperadas de operación. Cualquier desviación significativa fuera de estos límites podría requerir una revisión más detallada, pero en general, la estabilidad en el tiempo es evidente.

Por otro lado, las gráficas correspondientes a la temperatura de succión, temperatura descarga y amperaje del motor eléctrico revelan una variación menor alrededor de la media establecida, indicando que las variables mantienen un comportamiento consistente a lo largo del tiempo. La ausencia de picos o caídas abruptas sugiere un funcionamiento estable del motor eléctrico y un control adecuado de las temperaturas.

La interpretación de las gráficas de control de Shewhart correspondientes al mes de octubre proporciona resultados satisfactorios según lo expuesto en la **“Guía técnica de confiabilidad operacional para la mejor práctica: ventanas operativas”** que garantiza una operación segura y confiable.

Se evidencia de manera consistente un comportamiento operativo adecuado del motocompresor GB-5 puesto que las variables clave exhiben una variación natural dentro de los límites establecidos en las Ventanas Operativas del equipo. Durante este período, no se identificaron patrones sistemáticos, anomalías significativas ni desviaciones que indiquen problemas operativos. Las gráficas revelan una estabilidad en el tiempo, reflejando la capacidad del motocompresor para mantener condiciones operativas coherentes y predecibles a lo largo de los 31 días de monitoreo.

4.2 ÍNDICES DE CONTROL DE PROCESO

4.2.1 Descripción de resultados

Para constatar una operación segura de los motocompresor de gas seco GB-5, se han calculado y analizado índices de capacidad de operación respecto a los rangos establecidos por las Ventanas Operativas, es decir, Condiciones Esperadas de Operación y Límites Seguros de Operación, incluyendo así un nuevo rango llamado “Ventana Estadística”. Estos índices han sido calculados mediante modelos estadísticos que se ajustan a las indicaciones establecidas en la **“Guía técnica de confiabilidad operacional para la mejor práctica: ventanas operativas”**, la cual establece la variabilidad aceptable de las variables clave, permitiendo una evaluación estadística de su rendimiento en un lapso de 31 días.

FLUJO DE GAS COMPRIMIDO MMFCSD						
	Rango		CPk1	CPk2	CP	
VE	40.2	a 71.7	1.0	1.0	1.0	
CEO	30.0	a 75.0	1.2	1.6	1.4	
LSO	20	a 80	1.5	2.3	1.9	

PRESION DE SUCCIÓN Kg/Cm2						
	Rango		CPk1	CPk2	CP	
VE	10.2	a 13.2	1.0	1.0	1.0	
CEO	10.0	a 15.5	2.5	1.2	1.8	
LSO	9	a 19.2	5.0	1.8	3.4	

PRESIÓN DE DESCARGA Kg/Cm2						
	Rango		CPk1	CPk2	CP	
VE	31.3	a 35.6	1.0	1.0	1.0	
CEO	28.0	a 38.0	2.1	2.5	2.3	
LSO	26	a 40	3.1	3.4	3.3	

TEMPERATURA DE SUCCIÓN °C						
	Rango		CPk1	CPk2	CP	
VE	14.6	a 17.9	1.0	1.0	1.0	
CEO	10.0	a 35.0	11.4	3.8	7.6	
LSO	8.0	a 40	14.4	5.0	9.7	

TEMPERATURA DE DESCARGA °C						
	Rango		CPk1	CPk2	CP	
VE	115.6	a 130.3	1.0	1.0	1.0	
CEO	100.0	a 150.0	3.7	3.1	15.1	
LSO	90.0	a 180	7.8	4.5	6.1	

INTENSIDAD DE CORRIENTE ELÉCTRICA Amperios						
	Rango		CPk1	CPk2	CP	
VE	224.1	246.9	1.0	1.0	1.0	
CEO	170.0	a 260.0	2.2	5.7	3.9	
LSO	150.0	a 280	3.9	7.5	5.7	

Cp=1 Control del Proceso adecuado para lo que fue diseñado
 Cp<1 Control de Proceso no adecuado para cumplir con el diseño
 CP>1 Control de Proceso más adecuado y predecible
 CP(LSO)>CP(COE)>CP(V.E.)

En las respectivas tablas se presentan los índices de control de proceso de acuerdo a las Condiciones Esperadas de Operación y Límites Seguros de Operación, así mismo, se presentan los rangos calculados de la Ventana Estadística.

4.2.2 Interpretación de resultados

La eficacia operativa del motocompresor se evalúa mediante índices de control de proceso que demuestran la conformidad de las variables clave con las condiciones esperadas y los límites seguros de operación. Estos índices proporcionan una medida cuantitativa de la estabilidad y eficiencia del sistema, respaldando la confiabilidad y seguridad de las operaciones.

CpK1 evalúa cuánto se desvía el valor máximo del CEO o LSO por encima del promedio, mientras que CpK2 evalúa cuánto se desvía el rango valor mínimo por debajo del promedio.

Cuanto mayor sea el valor de CpK1 o CpK2, menor será la variabilidad en comparación con el rango CEO o LSO, lo que indica un proceso más controlado y predecible.

El ajuste de la VE para que Cp sea igual a 1 se realiza con la finalidad de encontrar un rango operativo donde la variabilidad del proceso sea precisa y adecuada para cumplir con los objetivos de diseño. La Ventana Estadística busca optimizar tanto la eficiencia del proceso como la seguridad operativa. Un rango operativo bien ajustado garantiza que el compresor GB-5 opere dentro de límites seguros y predecibles.

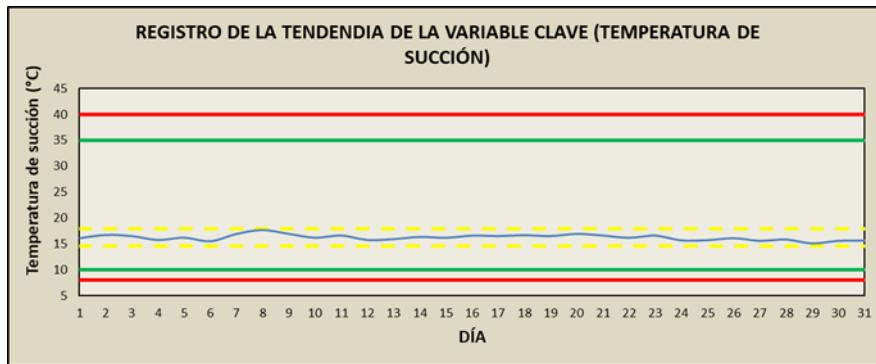
La VE puede adaptarse para acomodar cambios en las condiciones operativas o requerimientos del compresor. Esto puede ser particularmente valioso en entornos industriales donde las condiciones pueden variar.

Los índices de Control de Proceso obtenidos en el mes de octubre del 2023 revelan que, durante el periodo de monitoreo, el compresor opero bajo condiciones controladas y seguras. Se puede observar que los índices de Control de Proceso de los LSO son mayores que los de las CEO, y estos, a su vez, mayores que los de la VE, lo que nos indica que la variabilidad de las variables clave se vuelve menos influyente en el rango de LSO a diferencia de las CEO.

La razón de este comportamiento se debe a la capacidad del rango de cada uno; dado que los LSO tienen un rango más amplio que las CEO, la dispersión de los valores de las variables clave a lo largo del mes representan un efecto menor en la amplitud del rango, y por tanto, simbolizan un control de proceso más eficiente. Esta regla siempre debe cumplirse ya que la amplitud del rango LSO siempre será mayor al de CEO, y éste, mayor al rango calculado de VE.

Si se analiza específicamente los Índices de Control de Proceso para la temperatura de succión, podemos observar que Cpk1 es mucho mayor a Cpk2, lo que nos indica que la temperatura de succión, en el mes de octubre, tomó valores más cercanos al valor mínimo de los rangos de las Ventanas Operativas. En la gráfica de Shewhart correspondiente a esta variable clave se puede visualizar la tendencia de la temperatura de succión y comprobar el análisis planteado.

TEMPERATURA DE SUCCIÓN						
°C						
	Rango		CPk1	CPk2	CP	
VE	14.6	a	17.9	1.0	1.0	1.0
CEO	10.0	a	35.0	11.4	3.8	7.6
LSO	8.0	a	40	14.4	5.0	9.7



Los índices correspondientes a la presión de succión, temperatura de succión y temperatura de descarga del compresor revelan una tendencia a los límites menores de las Ventanas Operativas, mientras que los índices del flujo de gas alimentado al compresor, presión de descarga y la intensidad de corriente eléctrica del motor exponen una tendencia hacia los límites máximos de las Ventanas Operativas.

Sin embargo, las variables críticas correspondientes al mes de octubre se mantuvieron dentro de las Condiciones Esperadas de Operación obteniendo índices de control de proceso, Cp, mayores a 1 cumpliendo con la variabilidad permitida. Esta interpretación proporciona resultados satisfactorios según lo expuesto en la “Guía técnica de confiabilidad operacional para la mejor práctica: ventanas operativas” que garantiza una operación segura y confiable.

“Las CEO (Condiciones Esperadas de Operación), son valores de las variables de proceso que aseguran una operación estable del mismo, fuera de estos valores se produce una inestabilidad que, de mantenerse, puede provocar que equipos o instalaciones operen fuera de sus Límites Seguros de Operación (LSO). Las variables de proceso deben mantenerse dentro del área considerada CEO, lo que

nos permite una operación estable de las instalaciones, estos valores deben ser suministrados en el paquete de Tecnología del Proceso (Datos del Proceso), a partir de esto cualquier cambio de estas variables debe estar documentado por medio de Administración del Cambio.”

“Utilice el control estadístico del proceso para verificar que se encuentre dentro de la VO, y grafique los parámetros a través del tiempo mediante la gráfica Shewhart, tome los valores que están entre los límites inferior y superior de control de las VO, de los cuales se permite una diferencia de 3 veces la desviación estándar del promedio.”

4.3 EFICIENCIAS ENERGÉTICAS

4.3.1 Descripción de resultados

La evaluación detallada del compresor centrífugo del Complejo Procesador de Gas La Venta, requirió recopilación de las lecturas diarias de las variables clave. Durante cada jornada de 8 horas se monitorean cada 2 horas, por lo que al total del día se tienen 12 lecturas de cada variable; para obtener un valor por día se determinó el promedio de las 12 lecturas obteniendo una visión integral de su rendimiento durante el mes analizado.

Con los respectivos datos se realizaron cálculos termodinámicos explicados en el Capítulo 2 y Capitulo 3 con el objetivo de conocer las eficiencias energéticas con las que trabaja al día el compresor GB-5.

Las eficiencias energéticas de un compresor se componen de:

- Eficiencia de compresión
- Eficiencia mecánica
- Eficiencia global

Estos parámetros revelan aspectos importantes sobre la operación del compresor.

VARIABLES DE CONTROL CLAVES																																
DIA	UNIDAD	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
Flujo volumétrico	MMPCSD	47.61	44.26	49.43	46.84	52.52	54.31	61.32	59.19	48.85	46.25	49.60	56.88	60.90	55.85	54.80	57.73	58.14	58.35	60.71	54.49	55.48	60.53	60.54	60.23	58.94	60.50	61.93	60.17	56.54	58.79	62.05
Psucción	Kg/Cm2	10.79	10.79	10.93	10.80	10.92	11.00	11.63	11.70	11.42	11.36	11.50	11.87	11.96	11.63	11.70	11.76	11.81	11.93	11.88	11.97	11.96	12.08	12.25	12.21	12.23	12.34	12.14	12.08	12.16	12.38	12.26
Pdescarga	Kg/Cm2	32.36	32.81	33.27	33.71	33.83	33.19	33.01	32.67	32.95	32.91	32.19	33.44	33.97	34.02	33.78	34.32	34.47	34.80	34.82	34.59	32.98	32.88	33.37	32.78	33.46	33.11	32.96	32.58	32.97	34.33	33.34
Tsucción	°C	16.08	16.71	16.50	15.75	16.18	15.50	16.90	17.67	16.92	16.18	16.60	15.75	15.91	16.33	16.17	16.58	16.50	16.67	16.50	16.92	16.60	16.17	16.58	15.67	15.71	16.08	15.58	15.83	15.08	15.58	15.60
Tdescarga	°C	124.75	127.32	126.25	126.17	126.46	122.58	122.90	122.00	124.42	125.00	123.00	121.67	123.64	124.83	124.83	125.08	124.80	124.67	124.25	124.42	121.90	120.42	121.08	119.17	120.38	119.67	119.75	119.50	119.08	121.25	119.75
Amperaje	A	227.75	228.42	230.08	229.33	239.00	234.50	238.10	237.00	236.33	230.82	228.80	238.00	240.55	236.50	236.08	239.42	238.90	240.50	240.17	240.83	238.00	234.33	237.58	235.08	234.46	235.00	234.17	231.92	234.83	237.00	235.56
EFICIENCIAS ENERGÉTICAS																																
Eficiencia de Compresión	%	70.52	70.48	71.03	72.29	71.93	71.97	68.54	68.49	68.83	68.19	67.23	67.93	67.45	69.06	68.10	75.00	69.15	69.35	69.76	69.03	66.86	66.53	66.50	65.94	66.64	65.92	66.30	66.19	66.24	67.01	66.47
Eficiencia Mecánica	%	85.37	80.48	87.36	84.54	89.89	91.22	94.78	90.05	78.62	77.49	80.98	85.83	91.57	88.47	86.76	82.44	89.83	88.32	92.26	81.80	82.65	89.60	87.38	87.21	86.28	86.70	91.11	89.41	82.64	84.88	89.78
Eficiencia del motocompresor GB-5	%	60.20	56.72	62.05	61.12	64.65	65.65	64.96	61.68	54.11	52.84	54.44	58.30	61.77	61.10	59.08	61.83	62.12	61.25	64.36	56.47	55.26	59.61	58.11	57.50	57.50	57.15	60.40	59.18	54.74	56.88	59.68

En la tabla anterior se muestran los datos promedio por día de las variables clave, así como, las eficiencias energéticas bajo las que opero el compresor en el mes de octubre.

4.3.2 Interpretación de resultados

Las eficiencias energéticas ofrecen una medida cuantitativa de la efectividad con la que el compresor realiza su trabajo. Esto ayuda a evaluar si el compresor está operando de manera óptima y cumpliendo con su función principal de comprimir el gas de manera eficiente. Así mismo, permite calcular y comprender el consumo real de energía del compresor. Esto es crucial para la gestión de costos operativos y la planificación eficiente de recursos energéticos.

Al comparar las eficiencias con valores de referencia o estándares industriales, es posible identificar ineficiencias y áreas de mejora. La identificación temprana de problemas potenciales puede ayudar a prevenir fallas y reducir costos asociados a la operación subóptima.

De acuerdo con los fundamentos teóricos de Heinz P.:

“La eficiencia global de un compresor centrífugo suele estar en el rango del 60% al 88%. La eficiencia de compresión (Politrópica o Isentrópica) generalmente tiene un alcance del 70% al 90%, dependiendo de las características del compresor y las condiciones de operación, por otro lado, la eficiencia mecánica considera valores típicos que pueden estar dentro del 90% al 98%.”

Se observa que las eficiencias de operación obtenidas en el mes de octubre del 2023 se encuentran por debajo de los rangos permitidos. Los valores promedio del mes son los siguientes:

- Eficiencia de compresión: 68.55%
- Eficiencia mecánica: 86.64%
- Eficiencia global: 59.38%

Esta interpretación revela resultados desfavorables del funcionamiento operacional del motocompresor GB-5. Esta ineficiencia puede ocasionarse por diversas causas: variación en las condiciones operativas y las características específicas del gas, mal desempeño del personal operativo, falta de mantenimiento y vida útil del equipo. Dado que la Planta Criogénica empezó a operar desde 1963, el compresor ha sufrido deterioro y el motor eléctrico ha sido reparado y remplazado un par de veces, por lo que la ineficiencia energética se debe principalmente al desgaste de vida útil del equipo.

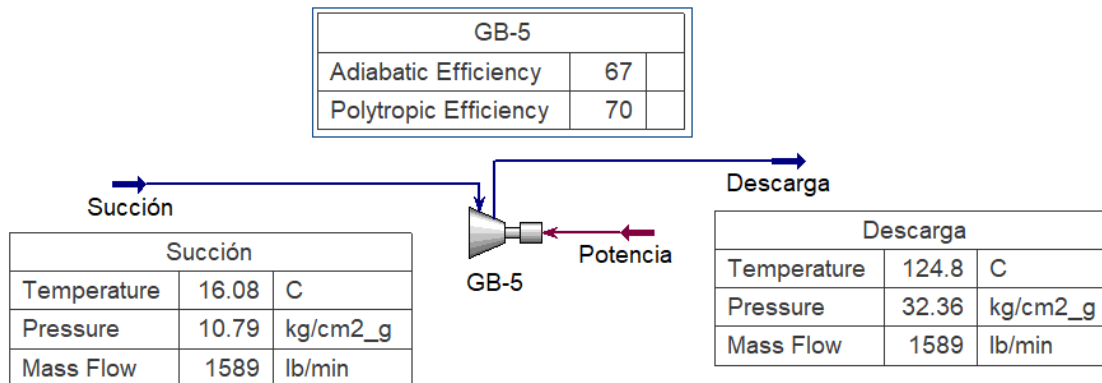
Por otro lado, es importante mencionar que en los cálculos realizados se determina la eficiencia de compresión isentrópica y politrópica, la segunda proporciona el valor deseado siendo este mayor al primero, por lo que se comprueba lo expuesto en los fundamentos teórico que indican lo siguiente:

La elección de la eficiencia politrópica (como eficiencia de compresión) sobre la isentrópica en la evaluación de compresores centrífugos se debe a que la primera tiene en cuenta las pérdidas y la realidad de las condiciones del mundo real en el funcionamiento del compresor. Esto proporciona una representación más precisa de la eficiencia del compresor bajo condiciones reales.

Así mismo, estos valores que comprobaron mediante el simulador Aspen HYSYS V10 para garantizar resultados confiables. Tomando como referencia el día 1 del mes de octubre, obtenemos una eficiencia isentrópica del 66.86% y politrópica del 70.52% en el programa Excel, mientras que el simulador arroja los siguientes datos:

4 VARIABLES DE CONTROL CLAVES			
5	DIA	UNIDAD	1
6	Flujo volumetrico	MMPCSD	47.61
7	Psucción	Kg/Cm2	10.79
8	Pdescarga	Kg/Cm2	32.36
9	Tsucción	°C	16.08
10	Tdescarga	°C	124.75
11	Amperaje	A	227.75

55 Eficiencia de compresión	
56	η_{isen} 0.6686054
57	η_{poli} 0.7051751



El porcentaje de error de la eficiencia politrópica es de 0.74%, es decir, una diferencia insignificante, por lo que se concluye que los cálculos y ecuaciones utilizadas son correctas y satisfacen el estudio.



CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIÓN

El presente proyecto de residencia ha representado una inmersión profunda y sistemática en el control operativo y la eficiencia energética de los motocompresores de gas residual GB-5 en la Planta Criogénica. La aspiración fundamental de este trabajo ha sido optimizar el uso y consumo significativo de la energía, estableciendo una base sólida para la operación eficiente y sostenible de estos equipos fundamentales.

En el marco del objetivo general de elaborar un control operativo integral, se ha llevado a cabo un exhaustivo análisis de las condiciones reales de operación de los motocompresores GB-5. Este análisis se ha ejecutado mediante métodos gráficos que permiten visualizar con claridad el comportamiento de variables clave a lo largo del tiempo. La aplicación de las ventanas operativas ha brindado un marco de referencia esencial para evaluar la conformidad con los rangos permitidos y ha revelado patrones y tendencias fundamentales para la toma de decisiones informadas.

La cuantificación del consumo de energía actual ha sido una tarea esencial para entender la magnitud de la demanda energética asociada con los motocompresores GB-5. Este proceso ha arrojado luz sobre los puntos críticos de consumo y ha proporcionado datos clave para la evaluación de eficiencia energética.

La determinación de las eficiencias energéticas de los motocompresores GB-5 ha sido un componente central de este proyecto. A través de métodos detallados de cálculo y análisis, se ha obtenido una comprensión profunda de cómo estos equipos convierten la energía y desempeñan su función de compresión. La elección consciente de evaluar la eficiencia poltropa ha permitido una representación más realista y ajustada a las condiciones operativas del compresor centrífugo.

La evaluación del cumplimiento de la meta establecida en la eficiencia energética ha sido un hito crucial. Los resultados obtenidos han proporcionado una base para la toma de decisiones estratégicas y la implementación de medidas correctivas, si es necesario, con el objetivo de alinear el rendimiento actual con las metas preestablecidas.

En la fase final de este proyecto, se ha establecido un sistema de reportes mensuales de control operativo. Este sistema, fundamentado en la evaluación de eficiencia energética, brinda una herramienta dinámica y proactiva para monitorear continuamente el rendimiento de los motocompresores GB-5. Los informes generados serán esenciales para la gestión de mantenimiento predictivo, la identificación de oportunidades de mejora y la optimización constante de la eficiencia operativa.

En conjunto, este proyecto no solo ha alcanzado sus objetivos planteados, sino que ha sentado las bases para una gestión eficiente y sostenible de la energía en el contexto específico de los motocompresores GB-5. La combinación de análisis gráficos, cuantificación de consumo, evaluación de eficiencias y establecimiento de un sistema de reportes mensuales crea una plataforma integral que contribuirá significativamente a la eficiencia operativa y a la consecución de metas energéticas a largo plazo. Este proyecto no solo representa un logro académico sino también un paso concreto hacia prácticas operativas más eficientes y sostenibles en el Complejo Procesador de Gas La Venta.

5.2 RECOMENDACIONES

Basado en los hallazgos y experiencias obtenidas a lo largo de este proyecto de residencia, se formulan varias recomendaciones clave para mejorar la eficiencia operativa y la gestión de los motocompresores de gas residual GB-5:

- Optimización continua: Implementar un enfoque de mejora continua mediante la revisión regular de los datos operativos y el ajuste de parámetros para maximizar la eficiencia y reducir el consumo de energía.
- Programa de mantenimiento predictivo: Establecer un programa de mantenimiento predictivo basado en las tendencias identificadas durante el análisis de eficiencias, permitiendo intervenciones planificadas para prevenir posibles fallos y maximizar la disponibilidad del equipo.
- Capacitación del personal: Proporcionar capacitación regular al personal involucrado en la operación y supervisión de los motocompresores, enfocándose en las mejores prácticas, seguridad y el manejo óptimo de los equipos.
- Integración de tecnologías de monitoreo en tiempo real: Explorar la implementación de tecnologías de monitoreo en tiempo real para permitir una supervisión constante y alertas automáticas ante desviaciones significativas en las variables operativas.
- Reevaluación de metas de eficiencia energética: Considerar la posibilidad de ajustar las metas de eficiencia energética en función de la experiencia adquirida, vida útil del equipo y estándares de la industria en constante evolución.
- Fomentar la cultura de seguridad: Reforzar la importancia de la cultura de seguridad en el lugar de trabajo, destacando la necesidad continua de adherirse a los protocolos de seguridad y utilizar adecuadamente el equipo de protección personal.



- Explorar oportunidades de eficiencia en sistemas auxiliares: Investigar posibles mejoras en sistemas auxiliares, como sistemas de refrigeración y lubricación, para identificar oportunidades adicionales de eficiencia y ahorro energético.
- Monitoreo ambiental: Incorporar un sistema de monitoreo ambiental para evaluar y minimizar cualquier impacto ambiental asociado con la operación de los motocompresores, asegurando el cumplimiento de regulaciones ambientales.

Estas recomendaciones buscan potenciar la operación de los motocompresores GB-5, fomentando la eficiencia, la seguridad y la sostenibilidad a largo plazo.



CAPÍTULO 6

COMPETENCIAS DESARROLLADAS

El desarrollo de este proyecto de residencia ha representado una experiencia integral que ha contribuido significativamente al fortalecimiento y adquisición de diversas competencias profesionales. A lo largo de la investigación y aplicación práctica, se han desarrollado habilidades clave que abarcan áreas técnicas, analíticas y de gestión, consolidando así un conjunto diverso de competencias.

✓ ***HABILIDADES TÉCNICAS ESPECIALIZADAS***

El análisis detallado de las condiciones de operación de los motocompresores GB-5 ha permitido el perfeccionamiento de habilidades técnicas especializadas en el ámbito de la ingeniería de procesos. La interpretación de gráficas de control de Shewhart y la evaluación de eficiencias energéticas han requerido una comprensión profunda de los principios termodinámicos y la mecánica de compresión. Esta experiencia ha fortalecido mi capacidad para aplicar conocimientos teóricos a situaciones prácticas complejas en el campo de la ingeniería.

✓ ***COMPETENCIAS ANALÍTICAS Y DE RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS***

La evaluación detallada de las eficiencias energéticas ha fomentado competencias analíticas sólidas. La capacidad para analizar y sintetizar datos complejos provenientes de diversas fuentes, como lecturas de variables clave y cálculos de eficiencia, ha sido fundamental para identificar patrones, tendencias y posibles áreas de mejora. Este enfoque analítico ha impulsado la toma de decisiones informadas y la resolución efectiva de desafíos técnicos.

✓ ***GESTIÓN DE PROYECTOS Y PLANIFICACIÓN ESTRATÉGICA***

La elaboración del control operativo de los motocompresores GB-5 ha requerido una gestión de proyecto efectiva. Desde la planificación inicial hasta la implementación y la generación de informes mensuales, la habilidad para gestionar recursos, establecer metas y cumplir plazos ha sido fundamental. Este proceso ha fortalecido mi capacidad para llevar a cabo proyectos de ingeniería de manera eficiente y organizada.

✓ ***HABILIDADES DE COMUNICACIÓN TÉCNICA***

La redacción de informes técnicos detallados, como el presente documento, ha mejorado mis habilidades de comunicación técnica. La capacidad para expresar de manera clara y precisa los hallazgos, resultados y conclusiones es esencial para la efectiva transmisión de información a colegas y superiores. Este proceso ha perfeccionado mi capacidad para comunicar conceptos técnicos de manera accesible.

✓ ***CONOCIMIENTOS EN NORMATIVAS Y BUENAS PRÁCTICAS***

La evaluación de eficiencias energéticas ha requerido una comprensión profunda de normativas y buenas prácticas en ingeniería y gestión de energía.

El conocimiento y aplicación de estándares relevantes ha sido esencial para asegurar que los resultados del proyecto cumplan con los requisitos y expectativas de la industria.

✓ **DESARROLLO DE PENSAMIENTO CRÍTICO Y TOMA DE DECISIONES**

El análisis continuo de datos y la interpretación de resultados han fomentado el desarrollo de habilidades de pensamiento crítico. La capacidad para cuestionar, evaluar y tomar decisiones basadas en evidencia ha sido crucial en la identificación de áreas de mejora y en la implementación de estrategias efectivas para optimizar la eficiencia operativa.

✓ **TRABAJO EN EQUIPO**

La realización de este proyecto ha destacado mi capacidad para colaborar de manera efectiva en equipos multidisciplinarios. La interacción constante con colegas, ingenieros, y personal técnico ha fortalecido mi habilidad para comunicarme y coordinar esfuerzos de manera eficiente. Contribuir al análisis de datos, participar en discusiones técnicas y compartir responsabilidades en la implementación de estrategias ha sido parte integral de este proyecto. Esta experiencia ha enriquecido mi capacidad para trabajar armoniosamente en un entorno colaborativo, aprovechando la diversidad de habilidades y perspectivas para lograr objetivos comunes.

✓ **TRABAJO EN LÍNEA DE MANDO**

El proyecto ha proporcionado una oportunidad valiosa para desarrollar habilidades en la gestión de responsabilidades dentro de una línea de mando. La elaboración del control operativo y la toma de decisiones estratégicas han requerido una comprensión clara de roles y jerarquías. Colaborar con supervisores y líderes de la empresa ha fortalecido mi habilidad para recibir orientación, gestionar tareas asignadas y rendir cuentas en un entorno estructurado. Esta experiencia ha mejorado mi aptitud para trabajar de manera efectiva dentro de una cadena de mando, asumiendo responsabilidades de manera proactiva y contribuyendo al logro de los objetivos organizacionales.

✓ **SALUD Y SEGURIDAD EN EL TRABAJO**

El desarrollo de este proyecto ha subrayado mi compromiso y competencia en la promoción de la salud y seguridad en el entorno de trabajo, reconociendo especialmente la importancia del uso adecuado del equipo de protección personal (EPP) en el área de proceso. La aplicación de prácticas seguras ha incluido la constante consideración de protocolos de seguridad, así como la participación activa en la identificación proactiva de riesgos potenciales. La incorporación y correcto uso del EPP, desde equipos de protección ocular hasta vestimenta específica para condiciones de trabajo, ha sido una prioridad

constante. Esta competencia se traduce en la capacidad para salvaguardar no solo mi propia integridad, sino también la de mis compañeros de trabajo, reconociendo que las prácticas seguras son esenciales para mitigar riesgos y mantener un entorno laboral seguro.

✓ **INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL DEL PROCESO**

La ejecución de este proyecto ha consolidado mi destreza en el manejo de sistemas de instrumentación y control en el contexto industrial. La recopilación y análisis de datos, así como la interpretación de lecturas provenientes de sensores y dispositivos de control, han sido actividades centrales. La competencia en la configuración y supervisión de instrumentación ha sido esencial para garantizar la precisión y eficacia en la obtención de datos relevantes. Esta experiencia ha mejorado mi capacidad para trabajar con sistemas complejos de instrumentación y control, fundamentales en el ámbito de la ingeniería de procesos.

Este proyecto de residencia no solo ha contribuido al avance del conocimiento técnico en el ámbito de la ingeniería de procesos, sino que también ha enriquecido y fortalecido un conjunto diverso de competencias profesionales y laborales. Desde habilidades técnicas especializadas hasta competencias analíticas, de gestión y de comunicación; cada aspecto del proyecto ha sido una oportunidad para el desarrollo integral, preparándome de manera efectiva para enfrentar desafíos futuros en el campo de la ingeniería.

Este capítulo refleja la evolución y crecimiento de habilidades y competencias durante el curso de la residencia, subrayando la importancia de la experiencia práctica y el aprendizaje continuo en el desarrollo profesional.



CAPÍTULO 7

FUENTES DE INFORMACIÓN



- Andrade, A. G. (2019). La exergía en función de la eficiencia politrópica de un compresor centrífugo multietapa. *JEEOS, Volumen 3*.
- Bloch, H. P. (2011). *Compressors: How to Achieve High Reliability & Availability*. Mc Graw Hill.
- Cengel, Y. A. (2012). *Termodinámica* (7ma ed., Vol. Capítulo 8). Mc Graw Hill.
- Cengel, Y. A. (2012). *Termodinámica* (7ma ed., Vol. Capítulo 1). Mc Graw Hill.
- Cengel, Y. A. (2012). *Termodinámica* (7ma ed., Vol. Capítulo 2). Mc Graw Hill.
- Diesendorf, M. (2007). Soluciones de invernadero con energía sostenible. *UNSW Press*, 86.
- Encinas, M. P. (1984). *Turbomaquinas de fluido*. Limusa.
- ESSS. (2023). *Sistema de gestión de energía (SGE): concepto, normas y cómo implementarlo*. Obtenido de Blog ESSS: <https://www.esss.co/es/blog/sistema-de-gestion-de-energia/>
- Greene, R. W. (1989). *Compresores, Selección, Uso y Mantenimiento* (Vol. Sección 1). Mc Graw Hill.
- Greene, R. W. (1989). *Compresores, Selección, Uso y Mantenimiento* (Vol. Sección 2). Mc Graw Hill.
- Hepbasli, A. (2008). Una revisión clave sobre el análisis exergético y la evaluación de los recursos de energía renovables para un futuro sostenible. *Renovar Sustain Energy*, 12, 593-661.
- Lady, E. R. (s.f.). Los Alamos Scientific Laboratory: University of California.
- Lady, E. R. (s.f.). *Los Alamos Scientific Laboratory*. University of California.
- Lázaro Flores Díaz, N. E. (2016). *Manual para la Implementación de un Sistema de Gestión de la Energía*. Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía.
- Matene, A. L. (2021). *Compresión del Gas Natural*. UNIBOL.
- Montejano, C. G. (2008). *Evolución del marco jurídico de Pemex*. Camara de diputados, Subdirección de Política Interna.



Morales, J. O. (2021). *Informe Final de la Actualización del Análisis de Riesgos de Proceso*. Complejo Procesador de Gas La Venta.

Moran, M., & Shapiro, H. (1999). *Fundamentos de termodinámica técnica*. Reverté.

PEMEX. (2014). *El 7 de junio de 1938 se crea Petróleos Mexicanos*. Obtenido de Gobierno de México, Artículos: <https://www.gob.mx/epn/articulos/el-7-de-junio-de-1938-se-crea-petroleos-mexicanos>

Sáenz, R. S. (2011). *Inducción a Pemex Gas y Petroquímica básica*. Instituto Mexicano del Petróleo.

Vásquez, J. G. (2011). *Estudio Elemental de la Química*. Instituto Mexicano del Petróleo, PEMEX.



CAPÍTULO 8

ANEXOS



8.1 CARTA DE AUTORIZACIÓN PARA LA TITULACIÓN



GOBIERNO DE
MÉXICO



CARTA DE AUTORIZACIÓN PARA TITULACIÓN INTEGRAL

La Venta, Tabasco a 08 de febrero del 2024

A quien corresponda:

El que suscribe **Ing. Luis Baeza Alor, Coordinador de Producción UN1 del CPG La Venta** tiene a bien extender la presente AUTORIZACIÓN, con la finalidad de que el C. **Dana Belén Chiñas Barrios**, estudiante del Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, de la carrera de **Ingeniería Química**, quien culminó de manera satisfactoria su Residencia Profesional con el Proyecto denominado "**Evaluación del ahorro de energía de los motocompresores de gas residual GB-5 de la Planta Criogénica en el CPG La Venta**", realice su trámite de Titulación con el proyecto antes mencionado.

Sin otro particular quedo a sus apreciables ordenes

Ing. Luis Baeza Alor
Coordinador de Producción UN1 del CPG La Venta



8.2 FOTOS DURANTE LA ESTADÍA

