

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE PETRÓLEO
ÁREAS ESPECIALES DE GRADO**



**ESTUDIO DE LOS PROCESOS DE OPTIMIZACIÓN DEL
"FENÓMENO DE SURGE" EN COMPRESORES CENTRÍFUGOS**

REALIZADO POR:

Armando Luis Villarroel Bordonos

César Augusto Martínez Parra

Yelitza Aismar Cedeño Rondón

**Trabajo de Grado presentado ante la Universidad de Oriente como
requisito parcial para optar al Título de
INGENIERO DE PETRÓLEO**

Puerto La Cruz, octubre de 2009

UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE PETRÓLEO
ÁREAS ESPECIALES DE GRADO



ESTUDIO DE LOS PROCESOS DE OPTIMIZACIÓN DEL *FENÓMENO*
***DE SURGE* EN COMPRESORES CENTRÍFUGOS**

Ing. Quím. Isvelia Avendaño
ASESOR

Puerto La Cruz, Octubre de 2009

UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE PETRÓLEO
ÁREAS ESPECIALES DE GRADO



ESTUDIO DE LOS PROCESOS DE OPTIMIZACIÓN DEL *FENÓMENO*
***DE SURGE* EN COMPRESORES CENTRÍFUGOS**

Ing. Mec. Gustavo Franceschi
JURADO PRINCIPAL

Ing. Mec. Lisandro Vilorio
JURADO PRINCIPAL

Puerto La Cruz, Octubre de 2009

RESOLUCIÓN

De acuerdo al artículo 44 del Reglamento de Trabajo de Grado:

“Los trabajos de grado son de la exclusiva propiedad de la Universidad de Oriente y sólo podrán ser utilizados para otros fines con el consentimiento del Consejo de Núcleo respectivo, el cual lo participará al Consejo Universitario”.

DEDICATORIA

Este logro se lo dedico por completo a...

A **Armando Luis Villarroel Velásquez** y a **Elina Margarita Bordonos de Villarroel**, mis padres y mejores amigos, por confiar siempre en mí y apoyarme en todo momento de mi carrera y sobre todo en mi vida.

A ese bello ser que **Dios** me dará por **Hijo**, este logro también es para ti mi muchacho; desde ya estoy luchando para darte lo mejor...te amo!!!

Pai, Mai, Hijo...LO LOGRAMOS!!!

Armando Luis Villarroel Bordonos

AGRADECIMIENTOS

Ante todo gracias a **Dios** por llenarme de vida y esperanzas todos los días, por permitirme librar obstáculos para así seguir luchando por el presente y el futuro que anhelo.

Gracias a mi padre **Armando Luis Villarroel Velásquez**, por saber ser buen padre y amigo; por darme todos los consejos que hasta ahora me han servido para mi crecimiento personal, por educarme con principios y con respeto hacia los demás, gracias mi viejo por darme fuerzas para seguir viviendo e intentar llegar a ser por lo menos la mitad del excelente hombre y extraordinario padre que eres. Papá este triunfo es tuyo, te amo!!!

Gracias a mi madre **Elina Margarita Bordonos de Villarroel**, la mejor madre y amiga del mundo; por darme la vida y llenarme de amor, por siempre estar presente, por luchar conmigo, por creer en mí y hacerme creer en mí, gracias mi vieja por recordarme todos los días que las cosas se logran con esfuerzo y dedicación. Mamá este triunfo también es tuyo, te amo!!!

Gracias a mi tío **José Gregorio Bordonos Padrón**, que más que mi tío; es el hermano que nunca tuve.

Gracias a mi novia **Luzmíl del Valle Fermín Hernández**, por permitirme amarla, por su paciencia, respeto y confianza; por cada sonrisa que me regala y me alegra la vida. Te amo enorme mi flaca!!!

Por supuesto gracias al comando borracho por todas las misiones que culminamos con éxito, **Eusmary Rodríguez, Carlos Doslakian, Jesús Suárez y Andrés Hernández**. Creo que la amistad existe, y Uds. son una muestra de ello.

Gracias a mi gran amigo **Carlos Moreno** y a mi vecina la Sra. **Margíl de Noriega**; que aunque ya no están con nosotros; siguen vivos de corazón.

Gracias a mi amigo **Víctor Sanabria**, por su amistad invaluable durante parte de mi carrera y después de ella.

Gracias a mi amiga **Yecenia Troncoso**, a su madre **Yotalvis Yegüez**, a su tía **Amarilis Yegüez**, y por supuesto gracias al jefe de esa tribu; **Efrén Bermúdez**, por su amistad y abrirme las puertas de su casa para siempre recibirme con cariño.

Gracias a mi compañero de grupo y amigo **César Martínez**, su ayuda fue clave para el desarrollo de este proyecto.

Gracias a la Prof. **Isvelia Avendaño** por su paciencia, disposición; y sobre todo por su importante asesoría vital en la realización de esta monografía. Y claro que si Prof. el compromiso es parte primordial del éxito.

Gracias a todos mis amigos y amigas que formaron parte de mi vida en la universidad; a todos de verdad gracias...se les quiere.

Gracias a todos aquellos profesores por los conocimientos brindados, muy necesarios para mi formación profesional.

Y por último, pero nunca menos importante; **GRACIAS** a la vida por regalarme este tan hermoso y esperado momento.

Armando Luis Villarroel Bordones

DEDICATORIA

Principalmente dedico este trabajo a mis padres, papá aunque no estés físicamente conmigo te pienso y siento en mi corazón y siempre lo haré, tú manera de ver y hacer entender las cosas a las personas fue verdaderamente excepcional, te admiraré toda mi vida por eso, y por tu sabiduría. A mi mamá por muchísimas cosas, tantas, que tendría que hacer otro trabajo para plasmarlo, por tu infinito apoyo, dedicación y ejemplo; acciones que me ayudaron a guiar mi camino en todo momento, espero ser tan exitoso como tú lo eres, gracias por todo lo que me has dado y enseñado. Papá y Mamá los amo y los amaré siempre.

A mis Hermanos Henny y Daniel, nunca nadie podrá tener hermanos como ustedes, los quiero muchísimo.

Y a toda mi familia, que agradezco al mundo por ser tan unida.

César Augusto Martínez Parra

AGRADECIMIENTOS

A Dios, guía espiritual presente en mi vida y en la de mis seres queridos, gracias por impulsar en mí los conocimientos adquiridos en el transcurso de mi vida y de mis estudios.

A mis Padres por darme el empuje y enfoque a lo largo de toda mi carrera y estar en todo momento para apoyarme.

A todas las personas, quienes durante mi estadía en la Universidad ayudaron a fortalecer los aprendizajes allí obtenidos.

César Augusto Martínez Parra

DEDICATORIA

A mi madre Ismery Rondón por su impecable papel durante toda mi vida, por ser la motivación en cada paso que realizo para que de alguna manera devolver todo lo que me ha dado, mami esto es para ti, no creo que me alcance la vida para darte todo lo que mereces, a mi padre Pedro Cedeño a quien admiro mucho, por ser ejemplar de inteligencia con sus conocimientos y habilidades académicas, a mi hermano Pedrito, por ser parte de mi vida pasando cada momento y cada aprendizaje desde la niñez, a mi abuela María Rojas por ser como una madre más en mi vida, abuela esto también es para ti porque se que te llena de alegría y satisfacción sincera.

A mis ahijados bellos; por ser motivación en mi vida para crecer profesionalmente y enseñarles y darles lo mejor, se lo merecen por llenarme el pecho de tanto amor; Camilo (mi camarón), Eriangelys, Alejandro, Zorgelys (mi bella), Raumarlys, Andrés Sebastián, esto es para ustedes, dándole el mejor ejemplo para que un día también me den la satisfacción y el orgullo de verlos hechos todos unos profesionales.

A la memoria de quien ya no están en esta tierra, Kervis Eduardo, cumpliendo mi palabra, te dedico esto aunque ya no estás.

Yelitza Aismar Cedeño Rondón

AGRADECIMIENTOS

A mi madre en primer lugar, por estar ahí en todo momento de dichas y desilusiones y tener la entereza y la habilidad para salir adelante juntas en lo económico, lo espiritual, lo emocional y por tener siempre el más alto nivel de comprensión. Gracias mami, por ser la mejor de las madres. A mi padre por la ayuda económica que me brindo durante muchos años de mi carrera, aunque no hayas llegado hasta el final esto es para ti para darte una gran satisfacción, gracias por enseñarme a ser más fuerte y más mujer y muchas cosas de la vida, sé que siempre has querido lo mejor para mí. A mi hermano por estar en los momentos de decisiones más difíciles y presión estudiantil, por sus palabras de aliento junto con su esposa Moraima en los últimos momentos de mi carrera les doy las gracias por cada llamada telefónica para mi fueron alentadora y me ayudaron a ver las cosas con objetividad y seguir luchando por mis metas. A mi abuela María por estar día a día pendiente como una madre más de cada momento que pasaba fuera de mi núcleo familiar rezando cada oración y por ser tan noble de sentimiento y acción. A mi tía madrina Maritza por saber escucharme, estar pendiente en los momentos de enfermedad y tener toda la soltura siempre para ayudarme, gracias tía eres el más grande tesoro de los Rondón. A todos mis primos por ser tan especiales. A mi primo Edguita por su disposición para ayudarme en la realización de esta monografía, a mi prima Wilmarys y a mi primo Duby por nunca abandonarme. A mis amigos especialmente a Farid, Morella y Karina por estar en los momentos más difíciles ustedes son mis hermanos, fueron mi familia mientras estuve lejos de mi casa, además de diversas rumbas que compartimos. A mis amigas Sheily y Daicely, por su valiosa dedicación en el transcurso de las áreas ayudándome con tanto trabajo y a pesar de no ser del grupo demostraron gran interés entre tantas amanecidas en que todo me saliera bien; gracias amigas por su lealtad.

Agradezco a mis amigos y compañeras por ayudarme en lo académico y tener lazos conmigo de hermandad udistas inolvidables Flor, Karly, Mariangel, Felipe por pasar cada momento de mi vida estudiantil además de amistad sincera Miglis, Desiree, Anahis y Yelitza Peinado por el dolor de cabeza del simulador, Cesar Nicorsin y Melissa por haberme hecho reír tanto en nuestras jornadas estudiantiles, Cesar Parra; por su admirable paciencia en la realización de este sueño, a Somar y Tito por hacerme sentir como en mi casa mientras viví con ellos en el momento que más necesitaba esa estabilidad mientras hice paralelo y exceso de materias gracias por todo. A mi prof. Lucas Álvarez por su disponibilidad y gentileza, Rodrigo Rodríguez por su charla y recorrido en PIGAP I, MUSCAR, Jhony PDVSA Anaco (RECAT) por facilitarnos buen material y por último mis encarecidos agradecimientos a mi tutora Ing. Isvelia Avendaño por guiarme y ayudarme a seguir adelante con toda la ética profesional y dedicación exclusiva inclusive en lo personal, a mis ilustres profesores de áreas de grado Mario Briones y José Rondón por sus conocimientos entregados. Gracias a todos, sin ustedes no hubiese sido posible.

Yelitza Aismar Cedeño Rondón

RESUMEN

En la industria del gas natural, después que el gas ha sido deshidratado y endulzado; debe ser sometido al proceso de compresión donde se realizará un trabajo sobre él; cuyo propósito es incrementar su energía total, disminuyendo su volumen para así poder transportarlo con éxito.

Los compresores centrífugos han tenido un gran desarrollo en los últimos años en este campo, debido fundamentalmente al consumo total de energía por unidad de costo y de peso del compresor, estos son máquinas diseñadas para disminuir el volumen de un fluido gaseoso transformando su energía por medio de la fuerza centrífuga. Estas máquinas, por ser de alto precio, requieren un cuidado extenso ya que pueden presentar diversos problemas operacionales siendo uno de ellos el oleaje del flujo, conocido también como *Surge*.

El presente trabajo estudia este fenómeno, el cual es una condición inestable que pudiese ocurrir en el compresor provocando reversión momentánea del flujo, impidiendo el buen funcionamiento y hasta el completo deterioro del mismo. Es por ello que la industria se ve en la necesidad de diseñar controles adecuados que eviten esta inestabilidad antes que afecte irreversiblemente el proceso de compresión.

Por esta razón se estudiará un sistema de control, ejemplificado y detallado en la resolución de esta monografía. En este sistema algunos parámetros como el volumen, la presión y la velocidad, operan de manera conjunta con el fin de evitar la interrupción del proceso de compresión, pérdidas económicas, y en el peor de los casos accidentes laborales fatales debido al fenómeno de *Surge*.

CONTENIDO

| | |
|--|-------|
| RESOLUCIÓN | v |
| DEDICATORIA | vi |
| AGRADECIMIENTOS | vii |
| DEDICATORIA | ix |
| AGRADECIMIENTOS | x |
| DEDICATORIA | xi |
| AGRADECIMIENTOS | xii |
| RESUMEN..... | xiv |
| CONTENIDO | xv |
| LISTA DE FIGURAS | xviii |
| LISTA DE TABLAS | xvi |
| CAPITULO I..... | 17 |
| EL PROBLEMA | 17 |
| 1.1 Introducción | 17 |
| 1.2 Planteamiento del problema..... | 18 |
| 1.3 Objetivos | 20 |
| 1.3.1 Objetivo general..... | 20 |
| 1.3.2 Objetivos específicos | 20 |
| CAPITULO II | 21 |
| FUNDAMENTOS TEÓRICOS | 21 |
| 2.1 Compresión del gas natural..... | 21 |
| 2.2 Generalidades de un compresor | 27 |
| 2.2.1 Usos de los compresores | 28 |
| 2.2.2 Clasificación de los compresores | 29 |
| 2.2.2.1 Compresores de desplazamiento positivo | 29 |
| 2.2.2.1.1 Compresores recíprocos | 30 |

| | |
|--|----|
| 2.2.2.1.2 Compresores rotatorios | 34 |
| 2.2.2.2 Compresores dinámicos | 36 |
| 2.2.2.2.1 Compresores axiales..... | 36 |
| 2.3 Compresores centrífugos..... | 39 |
| 2.3.1 Ventajas y desventajas de los compresores..... | 42 |
| 2.3.2 Características generales de los compresores centrífugos | 43 |
| 2.3.3 Utilidad de los compresores centrífugos | 45 |
| 2.3.4 Forma de trabajo de un compresor centrífugo | 48 |
| 2.3.5 Eficiencia de los compresores centrífugos | 48 |
| 2.3.6 Diseño de un compresor centrífugo | 49 |
| 2.3.7 Principio de operación de un compresor centrífugo | 50 |
| 2.3.8 Limitaciones críticas de un compresor centrífugo | 50 |
| 2.4 Criterios generales que se deben tener en cuenta para la selección de un compresor..... | 54 |
| 2.5 Parámetros importantes a tomar en cuenta para la selección de un compresor | 55 |
| CAPITULO III | 58 |
| METODOLOGIA | 58 |
| 3.1 .Técnicas de investigación | 58 |
| 3.2. Instrumentos de recolección de datos | 59 |
| 3.3. Técnicas de análisis de datos..... | 59 |
| 3.4. Fases de la investigación..... | 59 |
| CAPITULO IV | 61 |
| DESARROLLO | 61 |
| 4.1 Definición de un proceso de compresión | 61 |
| 4.2 Descripción del fenómeno de <i>surge</i> y su efecto en compresores centrífugos..... | 64 |
| 4.3 Sistemas de control para la prevención del fenómeno de <i>surge</i> en compresores centrífugos | 70 |

| | |
|--|----|
| 4.3.1 Línea de control <i>Surge</i> | 71 |
| 4.3.2 Control de la presión a velocidad variable | 73 |
| 4.3.3 Control del volumen a velocidad variable | 74 |
| 4.3.4 Control de la presión a velocidad constante..... | 75 |
| 4.3.5 Control del volumen a velocidad constante | 76 |
| 4.3.6 Válvula control anti- <i>Surge</i> | 77 |
| 4.3.6.1 Control anti- <i>Surge</i> volumen mínimo | 78 |
| 4.3.6.2 Control anti- <i>Surge</i> presión límite..... | 80 |
| 4.4 Clasificación de las desventajas del <i>surge</i> en compresores centrífugos..... | 81 |
| 4.4.1 Desventajas por pérdidas económicas..... | 81 |
| 4.4.2 Desventajas por daños mecánicos..... | 81 |
| CAPITULO V | 83 |
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... | 83 |
| 5.1 Conclusiones | 83 |
| 5.2 Recomendaciones..... | 84 |
| BIBLIOGRAFÍA | 85 |
| ANEXOS | 86 |
| METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:..... | 93 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 2.1 Clasificación de los compresores..... | 29 |
| Figura 2.2 Partes de un compresor reciprocante | 31 |
| Figura 2.3 Compresor de espiral rotatorio | 34 |
| Figura 2.4 Modelo de un compresor axial | 38 |
| Figura 2.5 Impulsor del compresor centrífugo..... | 39 |
| Figura 2.6 Etapas de un cilindro compresor centrífugo | 40 |
| Figura 2.7 Compresor de cuatro impulsores | 41 |
| Figura 2.8 Representación gráfica de los componentes un compresor centrífugo..... | 44 |
| Figura 2.9 Modelo de un compresor centrífugo..... | 46 |
| Figura 2.10 Rango de operación de los compresores..... | 55 |
| Figura 4.1 Ciclo del proceso de compresión del gas..... | 61 |
| Figura 4.2 Diagrama simplificado de un sistema de compresión | 63 |
| Figura 4.3 Mapa compresor centrifugo de velocidad variable..... | 66 |
| Figura 4.4 Ciclo de <i>Surge</i> | 68 |
| Figura 4.5 Límite <i>Surge</i> y línea de control <i>Surge</i> | 72 |
| Figura 4.6 Control de presión a velocidad variable | 73 |
| Figura 4.7 Control del volumen a velocidad variable..... | 74 |
| Figura 4.8 Control de la presión a velocidad constante | 75 |
| Figura 4.9 Control del volumen a velocidad constante..... | 76 |
| Figura 4.10 Control anti <i>Surge</i> | 77 |
| Figura 4.11 Válvula anti <i>Surge</i> de (PIGAP) MUSCAR Monagas..... | 78 |
| Figura 4.12 Control anti- <i>Surge</i> volumen mínimo | 79 |
| Figura 4.13 Control anti- <i>Surge</i> -presión límite | 80 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 2.1 Ventajas y desventajas reciprocantes vs centrífugos..... | 42 |
| Tabla 2.2 Ventajas y desventajas axiales vs centrífugos..... | 42 |

CAPITULO I

EL PROBLEMA

1.1 Introducción

En la actualidad el negocio del gas natural se ha convertido en uno de los más importantes a nivel mundial, su uso se ha hecho tan indispensable que cada año las industrias invierten miles de millones de dólares para procesarlo y así distribuirlo bajo especificaciones. Uno de los procesos más valiosos es la compresión del gas natural, este proceso se utiliza cuando se requiere su almacenamiento, transporte, reinyección del fluido en yacimientos con el fin de mantener la presión, incrementar el recobro de petróleo, procesos de refrigeración, procesos petroquímicos, consumo industrial o doméstico; en forma de materia prima o combustible, etc. Como es sabido, la compresión incrementa el nivel energético del gas, dicho aumento en los niveles de energía se logra mediante el trabajo que ejerce el compresor sobre el fluido; la variación en estos valores se manifiesta con incrementos de presión y en la mayoría de los casos por aumentos de temperatura. Para obtener un buen proceso de compresión es vital la selección de un adecuado y óptimo tipo de compresor, ésta se debe realizar considerando la gran variedad de estos en el mercado; cada uno de los cuales tiene ventajas peculiares para aplicaciones dadas. Entre los principales factores que se deben tomar en consideración, dispuestos hasta cierto punto en orden de importancia, se encuentran la velocidad de flujo, la carga o presión, las limitaciones de temperatura, el consumo de potencia, posibilidades de mantenimiento y el costo.

Los compresores son piezas muy complejas, por tanto, el personal asignado a su manipulación debe estar muy bien capacitado, sin olvidar que el manejo debe estar dentro de unas normas de seguridad establecidas.

Pero por más estrictas que sean estas normas, el compresor no se escapa de presentar problemas operacionales ocasionados por algún error o falla que pudiese ocurrir en el sistema. Uno de los problemas que en determinado momento afectaría el buen funcionamiento del compresor es el fenómeno de *Surge*, esta es una condición de flujo inverso causado básicamente por la disminución del caudal, es tan notable esta fluctuación que produce un errático funcionamiento del sistema

En el proyecto de monografía presentado a continuación, más que estudiar, analizaremos este fenómeno de manera tal que se entienda su real efecto en los compresores, como los afecta tanto interna como externamente, sus límites de operación, características, y sobre todo los sistemas de control aplicados para su prevención.

1.2 Planteamiento del problema

El avanzado desarrollo y perfeccionamiento de la tecnología del gas, el hecho de poseer la característica de ser un combustible eficiente y limpio, no contaminante del medio ambiente y lo económico que éste resulta, tanto para el productor como para el consumidor final, han contribuido a que el gas natural, actualmente sea utilizado en todas partes del mundo como materia prima para la elaboración de insumos, o como combustible en los sectores industrial, petroquímico, termoeléctrico, doméstico, comercial y de transporte terrestre.

Uno de los factores de mayor importancia en el negocio del gas natural tienden a ser los compresores, éstos equipos mecánicos se encargan de disminuir un volumen de gas, así como también aumentar su presión.

Los compresores suelen ser complejos, son construidos con precisión, y por lo general son muy costosos. Por ello, su selección, operación y mantenimiento deben ser cuidadosos debido a su alto riesgo al ser manipulados. Uno de los problemas que puede afectar una óptima operación en un compresor es el fenómeno de *Surge*, que aparece cuando hay cualquier aumento de velocidad y el flujo disminuye suficientemente en el sistema para causar reversión momentánea del flujo dentro del compresor. Un sistema anti-*Surge* sano prevendrá el *Surge* con una línea de control para maximizar la eficacia del compresor.

Surge es un fenómeno de antibombeo o reflujo asociado a los compresores axiales y centrífugos, ocasionando una condición inestable que provoca auto-oscilación, por esta razón se hace necesario analizar los parámetros de operación de un proceso de compresión; para así establecer un sistema de control con el fin de prevenir el efecto *Surge* en éstos compresores.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Estudiar los procesos de optimización del fenómeno de *Surge* en compresores centrífugos.

1.3.2 Objetivos específicos

1. Definir un proceso de compresión.
2. Describir el fenómeno de *Surge* y su efecto en los compresores centrífugos.
3. Analizar un sistema de control para la prevención del efecto *Surge* en compresores centrífugos.
4. Clasificar las desventajas del efecto de *Surge* en los compresores centrífugos.

CAPITULO II

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Compresión del gas natural

La compresión se refiere al aumento de energía que se logra en un fluido gaseoso por medio de un trabajo que se efectúa sobre él, los fluidos que más comúnmente se comprimen son: el aire, gas natural, componentes separados del gas natural y gases comerciales con propósitos industriales. En el proceso de compresión del gas natural, los compresores tienen como función principal aumentar la presión del fluido gaseoso, con el aumento de la presión son comprimidos y por ende pueden ser almacenados o confinados en recipientes de determinados volúmenes.

La compresión es una parte integral de los ciclos para refrigeración y las turbinas de gas, los compresores son máquinas que disminuyen el volumen de una determinada cantidad de gas y aumentan su presión, todo esto ocurre a través de procedimientos mecánicos. Luego el gas comprimido posee una gran energía potencial.

2.1.1 Importancia del proceso de compresión

Por lo general, previo a la utilización de un gas, es necesario someterlo a un proceso de compresión, con lo cual se incrementa el nivel energético del gas. El aumento de energía se logra mediante el trabajo que se ejerce sobre el fluido en el compresor.

El aumento de energía se manifiesta por incrementos de presión y en la mayoría de los casos por aumentos de la temperatura. Cuando se necesita transportar gas a través de los gasoductos, el proceso de compresión toma gran importancia debido a que se requiere aplicar una presión necesaria para vencer la resistencia de frotamiento.

Cuando los compresores comunican presión al gas, que es un fluido compresible, reducen el volumen de este. El gas que se obtiene en el proceso de compresión se denomina Gas Natural Comprimido (GNC), que viene a ser un gas fácil de transportar a través de gasoductos o en embases adecuados. Entre las principales utilidades del (GNC) está su utilización como Gas Natural Vehicular (GNV), para la gasificación de las ciudades, y los múltiples usos que se tienen en la industria de los hidrocarburos gaseosos.

Para la utilización del (GNC) en la industria se recomienda verificar el funcionamiento de los sistemas de combustión por medio de la intervención de un matriculado o del fabricante del equipo, dicho control, como mínimo deberá abarcar lo siguiente:

1. La calidad de la combustión mediante el análisis de los gases productos de la combustión (temperatura, componentes y características del proceso).
2. La calibración de los instrumentos de medición, por ejemplo los que controlan las variables que intervienen en el proceso de la combustión.
3. Los enclavamientos de seguridad, los tiempos de cierre de válvulas automáticas de bloqueo ante falla del encendido.

4. La hermeticidad del cierre de esas válvulas.
5. La verificación periódica de posibles fugas.

2.1.2 Justificación del proceso de compresión

La compresión del gas se realiza en diferentes situaciones, tales como:

- a. Para efectuar extracción desde los equipos de producción.
- b. En la captación del gas natural a baja presión para aspirarlo de las redes conectadas a los cabezales de los pozos.
- c. En el transporte, con el objetivo de conducir el gas producido a través de gasoductos o redes de bombeo.
- d. En el almacenaje, cuando el mismo se efectúa a alta presión y no se cuenta con presión disponible de alguna de las etapas precedentes mencionadas.
- e. En la utilización, en caso de tratarse de un consumo industrial cuyo artefacto requiera una presión mayor que la de distribución.
- f. Cuando se requiera comprimir el gas en casos especiales tales como: en plantas de tratamiento, plantas de reinyección de gas natural a la napa petrolífera, almacenaje subterráneo, procesos de refrigeración, consumo industrial no petroquímico o doméstico en forma de materia prima o combustible, etc.

Se puede afirmar que los compresores son el vínculo esencial en el proceso de conversión de la materia prima en productos terminados. Los compresores tienen la capacidad de transformar la energía de una forma a otra, también son importantes a la hora de la conservación de la energía en las plantas de reinyección de gas natural, en el proceso de recuperación secundaria.

La economía y viabilidad de todas las aplicaciones de los compresores dependen de la confiabilidad de los mismos, y de la capacidad que tenga el usuario para seleccionar el compresor adecuado, para manejar un determinado gas a las condiciones de operación deseada. Luego es de vital importancia los criterios de selección de un compresor, de tal forma que el proceso de compresión sea de una alta eficiencia, y mantengan los niveles adecuados de rentabilidad, que son necesarios en cualquier proceso industrial.

2.1.3 Limitaciones en el proceso de compresión

Cuando existen limitaciones en el proceso de compresión es necesario utilizar un sistema de etapas múltiples. Con frecuencia un compresor reciprocante, por ejemplo necesita de un cilindro separado para cada etapa con un enfriamiento del gas entre las etapas.

Esto indica que en una unidad reciprocante, todas las etapas suelen combinarse en un ensamblaje unitario. Para determinar el número de etapas de un proceso de compresión se puede utilizar la siguiente ecuación:

$$r_{Optima} = \sqrt[n]{(P_d / P_s)} \quad (\text{Ec. 2.1})$$

Donde:

r_{Optima} : relación de compresión óptima.

n: número de etapas para que el proceso de compresión sea óptimo.

P_d : presión absolutas de descarga.

P_s : presión de absoluta de descarga.

El menor trabajo posible para llevar un gas de un nivel de presión a otro mayor, se logra utilizando (n) etapas que posean la misma relación de compresión.

Entre las etapas se intercalan intercambiadores de calor con el objetivo de reducir la temperatura del gas antes que este sea succionado por la siguiente etapa, sin estos intercambiadores de calor la temperatura iría en aumento a medida que se avanza en las etapas de compresión. Los intercambiadores de calor están diseñados de tal forma, que puedan transferir una cantidad de calor suficiente como para reducir la temperatura del gas de 250 °F a un rango de entre 130-95 °F.

Desde luego, la reducción de temperatura es una función del fluido utilizado para el enfriamiento, por ejemplo, se puede reducir la temperatura entre 100 y 95 °F, cuando se utiliza agua en los intercambiadores de calor, y de 130 a 120 °F, cuando se utiliza aire. En el proceso de compresión se debe tener también mucho cuidado con la caída de presión entre las etapas.

En la práctica se aplica lo siguiente:

- a. Si la presión de descarga tiene un valor menor a 100 lpca, se deben utilizar 3 unidades de presión como caída de presión entre etapas.
- b. Si la presión de descarga tiene un valor entre 100 y 1000 lpca, se deben de utilizar 5 unidades de presión como caída de presión entre etapas.
- c. Si la presión de descarga (P_d) tiene un valor mayor a 1000 lpca, se recomienda utilizar entre 5 y 10 lpca como caída de presión entre etapas.

Cuando se diseña un compresor no se conoce el número de etapas, por ello se utiliza una aproximación inicial según lo siguiente:

Si $R_{CO \text{ total}} < 5$ usar una sola etapa, $5 \leq R_{CO \text{ total}} < 10$ usar dos etapas, $10 \leq R_{CO \text{ total}} < 25$ usar tres etapas, $R_{CO \text{ total}} \geq 25$ usar cuatro etapas.

Donde:

$$R_{CO} = \left(\frac{P_d \text{ ultima etapa}}{P_s \text{ primera etapa}} \right) \quad (\text{Ec. 2.2})$$

Estas aproximaciones se deben comprobar con las temperaturas de descarga de cada etapa, las cuales no deben exceder del rango comprendido entre 200 y 250 °F, debido a los problemas operacionales que se presentan. Si la temperatura alcanza un nivel superior al rango establecido, se debe disminuir la relación de compresión en esa etapa. El proceso se continúa hasta lograr que esas temperaturas estén comprendidas dentro de los rangos aceptables.

Una vez conocidas las temperaturas de descarga óptimas, se deben comprobar las cargas de tensión y compresión a las que están sometidos los vástagos de los pistones de los compresores. Estas cargas deben estar por debajo de las máximas recomendadas por el fabricante. Si todo se cumple el proceso de compresión debe tener una alta eficiencia, y se podría asegurar que el proceso será económicamente rentable.

2.2 Generalidades de un compresor

Un compresor es una máquina de fluidos que está construida para aumentar la presión y desplazar ciertos tipos de fluidos llamados compresibles, tal como lo son los gases y los vapores. Esto se realiza a través de un intercambio de energía entre la máquina y el fluido, en el cual el trabajo ejercido por el compresor es transferido a la sustancia que pasa por él convirtiéndose en energía de flujo, aumentando su presión y energía cinética impulsándola a fluir.

Al igual que las bombas, los compresores también desplazan fluidos, pero a diferencia de las primeras que son máquinas hidráulicas, éstos son máquinas térmicas, ya que su fluido de trabajo es compresible, sufre un cambio apreciable de densidad, y generalmente, también de temperatura; a diferencia de los ventiladores y los sopladores, los cuales impulsan fluidos compresibles, pero no aumentan su presión, densidad o temperatura de manera considerable.

2.2.1 Usos de los compresores

Los compresores son ampliamente utilizados en la actualidad en campos de la ingeniería y hacen posible nuestro modo de vida, por razones como:

- Son parte importantísima de muchos sistemas de refrigeración y se encuentran en cada refrigerador casero, en infinidad de sistemas de aires acondicionados, y por supuesto en plantas de tratamiento de gas natural.
- Se encuentran en sistemas de generación de energía eléctrica, tal como lo es el Ciclo Brayton.
- Se encuentran en el interior de muchos "motores de avión", como lo son los turborreactores que hacen posible su funcionamiento.
- Generan gases comprimidos para la red de alimentación de sistemas neumáticos, los cuales mueven fábricas completas.
- Para procesos de craqueo catalítico y polimerización.
- Sopladores sencillos en plantas de recuperación de azufre.
- Compresores de refrigeración de baja temperatura en unidades para etileno, polietileno.
- Compresores de alta presión para gas de alimentación, reforzadores y para gas recirculado en plantas de hidrocarburos, amoniaco y síntesis de metanol.

2.2.2 Clasificación de los compresores

Los compresores más usados en la industria son los de desplazamiento positivo y los dinámicos. Los tipos de desplazamiento positivo son de dos categorías básicas: Reciprocantes y Rotatorios, y para los compresores dinámicos se tienen Axiales y Centrífugos, tal como lo muestra el esquema a continuación:

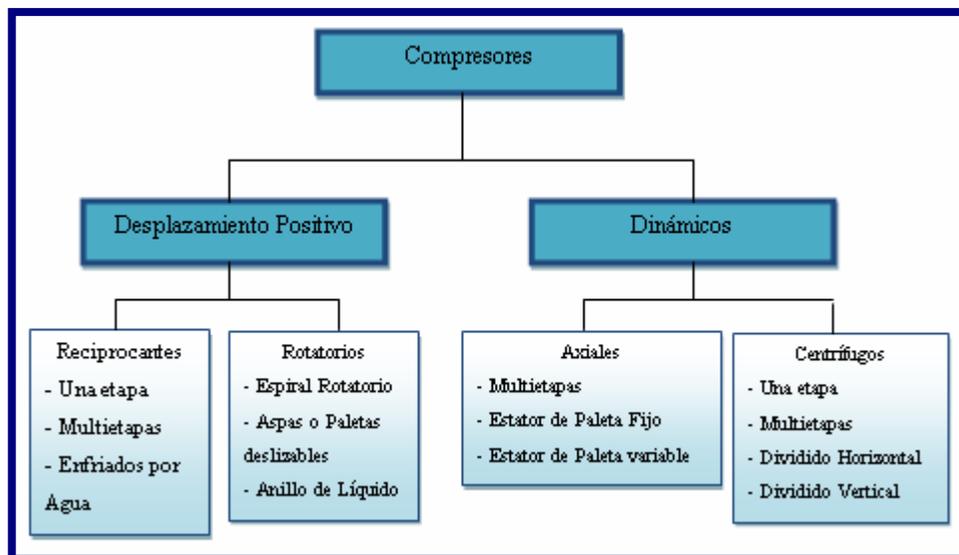


Figura 2.1 Clasificación de los compresores

2.2.2.1 Compresores de desplazamiento positivo

En todas las máquinas de desplazamiento positivo una cierta cantidad de volumen de gas de admisión se confina en un espacio dado, y después se comprime al reducir este espacio o volumen confinado. En esta etapa de presión elevada, el gas se expulsa enseguida hacia la tubería de descarga o al sistema contenedor.

Los compresores de desplazamiento positivo incluyen un amplio espectro de máquinas compresoras, pero los de mayor importancia se pueden clasificar en dos

categorías esquematizadas anteriormente: Reciprocantes y Rotatorios, los cuales son ampliamente utilizados en los procesos de compresión del gas natural, en la gran mayoría de los países que manejan esta industria. Esta clase de compresores son menos sensibles en cuanto al cambio en las propiedades del gas que los compresores dinámicos.

2.2.2.1.1 Compresores reciprocantes

Estos compresores son ampliamente utilizados en la industria petrolera, como por ejemplo en las plantas de refinación, químicas y petroquímicas, en aplicaciones tales como: La inyección de gas natural a los yacimientos para mantener la presión de la formación, la inyección de gas natural a la columna de fluidos del pozo o levantamiento artificial, la distribución de gas en redes de suministro, compresión de aire para instrumentación y control, y muchas otras aplicaciones.

Estos compresores pueden ser de una etapa (simple) o de múltiples etapas; el número de etapas está determinado por la relación de compresión (presión de descarga / presión de succión), la cual a su vez está limitada por la temperatura máxima permisible de descarga del gas a la salida del compresor.

Según lo estipula la norma API 617, para el diseño y manufactura de compresores reciprocantes se ha establecido, en base a recomendaciones de los fabricantes de compresores, una temperatura máxima permisible de 290 a 300 °F para el gas a la descarga del compresor, razón por la cual la relación de compresión por etapa por lo general no excede de cuatro (4), produciendo con ello un proceso suficientemente eficiente, por lo que se considera de alta utilidad práctica para la industria de los hidrocarburos gaseosos.

Los compresores recíprocos, por tener más partes en movimiento, tienen una eficiencia mecánica más baja que otros compresores, cada cilindro consiste en un pistón, el cilindro propiamente dicho, cabezales de los cilindros, válvulas de succión y descarga, y todas las partes necesarias para convertir el movimiento de rotación en desplazamiento positivo. En la figura 2.2 se pueden apreciar los principales componentes de un compresor recíproco, y su respectiva función en el proceso de compresión.

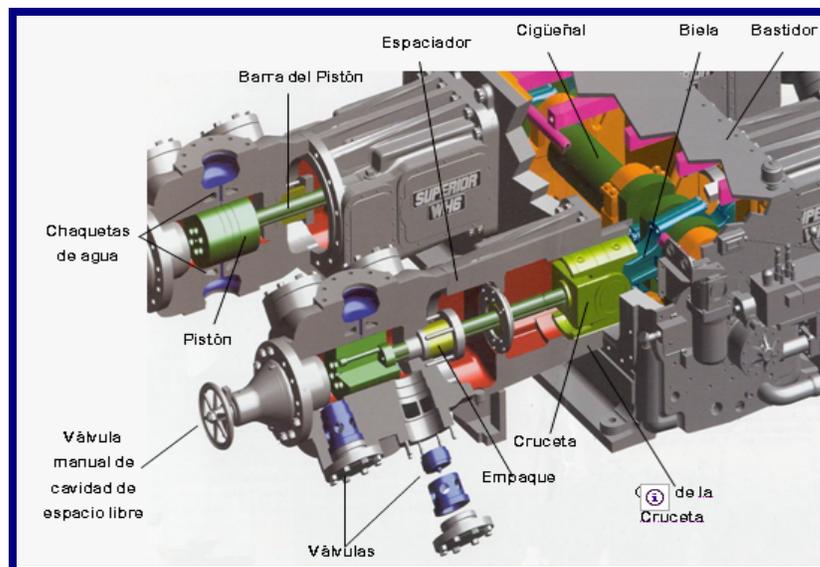


Figura 2.2 Partes de un compresor recíproco

En la figura 2.2 se observa que, tanto del bastidor como del cilindro compresor, el movimiento rotativo del cigüeñal se convierte en un movimiento alternativo a través de la cruceta, la cual transmite este movimiento a la barra del pistón ensamblada al mismo, lo que origina la compresión del gas mediante la reducción del volumen en el cilindro; el espaciador o pieza distanciadora está acoplada a la carcasa o bastidor del compresor y permite distanciar la cámara donde se encuentra la cruceta (guía de cruceta) del cilindro compresor; dentro del espaciador se encuentra ubicado el empaque o caja de empaque, a través del cual se desplaza la barra del pistón. Este

elemento permite sellar la presión existente dentro del cilindro evitando de esta forma fugas de gas hacia el exterior del mismo.

El compresor recíprocante emplea válvulas automáticas accionadas por resortes que se abren sólo cuando existe una presión diferencial adecuada que actúa sobre la válvula, las válvulas de admisión se abren cuando la presión en el cilindro es un poco inferior a la presión de aspiración, las válvulas de descarga se abren cuando la presión en el cilindro es un poco superior a la presión de descarga. Estas válvulas de succión y descarga se encuentran ubicadas alrededor del cilindro, así como las chaquetas de agua que permiten la refrigeración del cilindro removiendo el calor generado durante la compresión.

El elemento básico del compresor recíprocante es un único cilindro que comprime en un solo lado del pistón, es por ello, que se denomina efecto simple. Mientras, que si una unidad comprime en ambos lados del pistón, en este caso la acción se denomina efecto doble. El efecto doble consiste de dos elementos básicos de efecto simple que operan en paralelo en una misma carcasa fundida. Los compresores recíprocantes, suelen ser apropiados para manejar flujos de caudales reducidos y elevadas relaciones de compresión (r). Se puede decir que estos compresores pueden ser utilizados en casi todos los rangos de presión y volúmenes moderados.

En términos generales se puede señalar que el compresor recíprocante tiene uno o más cilindros, en los cuales hay un pistón o embolo de movimiento alternativo que desplaza un volumen positivo en cada carrera. Los compresores recíprocantes son de gran utilidad en el tratamiento del gas natural, y abarcan desde una capacidad muy pequeña hasta unos tres millones de pies cúbicos normales por segundo (3MMPCNS). En los equipos de procesos no se utilizan mucho los tamaños grandes y

se prefieren los compresores centrífugos. Si hay alta presión y un gasto más bien bajo, se necesitan los compresores reciprocantes.

El número de etapas o cilindros se debe seleccionar con relación a las temperaturas de descarga, tamaño disponible para los cilindros y carga en el cuerpo o biela del compresor. Los tamaños más bien pequeños, hasta unos 100 Caballos de Fuerza (HP) pueden tener cilindros de acción sencilla, enfriamiento con aire, y se pueden permitir que los valores de aceite en el depósito se mezclen con el aire o gas comprimidos. Estos tipos sólo son deseables en diseños especiales modificados.

Los tipos de compresores reciprocantes pequeños para procesos, de un (1) cilindro y 25 a 200 caballos de fuerza (HP), tienen enfriamiento por agua, pistón de doble acción, prensaestopas separadas que permiten fugas controladas y pueden ser del tipo no lubricado, en el cual el lubricante no toca el aire o gas comprimido. Los compresores reciprocantes más grandes para aire o gas son de dos o más cilindros. En casi todas las instalaciones, los cilindros se disponen en forma horizontal y en serie de modo que presenten dos o más etapas de compresión

Los compresores reciprocantes son conocidos como unidades de volumen constante y presión variable. El sustento es que cada compresor está diseñado para manejar un volumen de gas determinado, a la presión de descarga que sea diseñado. Se caracterizan por suministrarle gas limpio, por lo que filtros o depuradores de succión son recomendados. Los compresores reciprocantes no pueden manejar líquidos satisfactoriamente, estos tienden a generar graves daños a la unidad y provocan una disminución de la eficiencia del cilindro compresor.

2.2.2.1.2 Compresores rotatorios

Se denominan compresores rotatorios a aquellos grupos que producen gas o aire comprimido por un sistema rotatorio y continuo, es decir, que empujan el fluido desde la aspiración hacia la salida, comprimiéndolo. Entre los diversos tipos de compresores de este grupo tenemos el compresor de espiral rotatorio mostrado en la figura 2.3 a continuación:

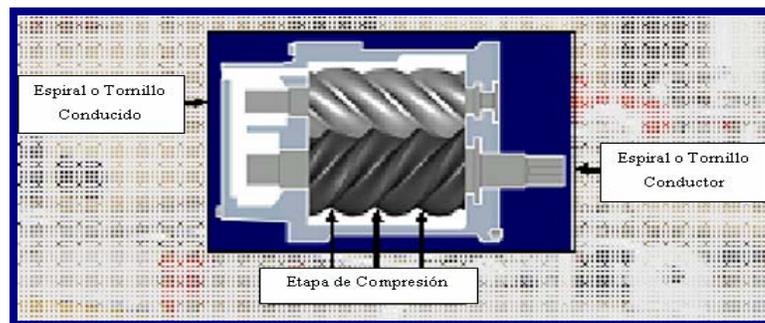


Figura 2.3 Compresor de espiral rotatorio

El compresor de espiral es un compresor de desplazamiento con pistones en un formato de espiral. Las piezas principales de este elemento de compresión comprenden rotores machos y hembras que se mueven unos hacia otros mientras se reduce el volumen entre ellos y el alojamiento. La relación de presión de un espiral depende de la longitud y perfil del mismo y de la forma del puerto de descarga. El espiral no está equipado con ninguna válvula y no existen fuerzas mecánicas para crear ningún desequilibrio, por tanto, puede trabajar a altas velocidades de eje y combinar un gran caudal con unas dimensiones exteriores reducidas. Estos compresores son de gran utilidad en las plantas de Recuperación de Vapor (REVA).

El segundo estilo de los compresores rotatorios es el de aspas o paletas deslizantes, que tiene un rotor con ranuras, dentro de las cuales se deslizan las aspas hacia adentro y afuera en cada revolución. Las aspas atrapan el aire o gas y en forma gradual reducen su volumen y aumentan la presión, hasta que escapa por orificios en la carcasa. En las industrias de procesos químicos esta clase de compresor tiene aplicación limitada porque producen presiones bajas y sólo se pueden obtener, en general con carcasa de hierro fundido, que los hacen inadecuados para ciertos gases corrosivos o peligrosos.

Como los compresores de aspas deslizables necesitan lubricación sólo se emplean en procesos en que se puede permitir la presencia de lubricante. El aceite en la cámara de compresión reduce las temperaturas de descarga y el consumo de aceite es elevado, por comparación con uno reciprocante. El compresor de aspas deslizables es muy compacto, pero tiene la misma desventaja que el reciprocante porque se necesitan piezas con rozamiento en la corriente de gas, y la pérdida de lubricante puede ocasionar sobrecalentamiento del cilindro. Estos compresores necesitan interruptores por alta temperatura del agua y del aire. La reducción en la velocidad se limita a alrededor del 60% de la normal, porque la disminución en la fuerza centrífuga produce pérdida de eficiencia de sellamiento.

El tercer estilo es el compresor de anillo de líquido, que es rotatorio, pero tiene un principio exclusivo de funcionamiento, diferente al de cualquier otro rotatorio. Un rotor con aspas gira en una cubierta circular u ovalada dentro de la cual siempre hay agua u otro líquido sellador, la fuerza centrífuga hace que el líquido forme un anillo en la periferia de la carcasa durante el funcionamiento. El aire o gas avanza hacia el centro del rotor y, en forma gradual, se reduce su volumen y aumenta su presión hasta que pasa por los orificios de descarga y sale de la carcasa. El líquido contenido en el

aire o gas descargado se separa y se enfría, y se recircula o se desecha en un sistema de una sola pasada.

2.2.2.2 Compresores dinámicos

Estos compresores se fundamentan en el principio de impartir velocidad a una corriente de gas y luego convertir esta velocidad en energía de presión. Con frecuencia a estos compresores se les denomina turbocompresores. Las máquinas centrífugas comprenden casi el 80% de los compresores dinámicos. Los compresores centrífugos tienen por lo general muy pocos problemas en el proceso de compresión del gas, y además son confiables para comprimir cualquier tipo de gas. En un compresor dinámico, el aumento de presión se obtiene comunicando un flujo de gas a una cierta velocidad o energía cinética, que se convierte en presión al desacelerar el gas cuando este pasa a través de un difusor, el cual hace la conversión de velocidad a energía cinética. En este tipo de compresores se tiene: Axiales y Centrífugos.

2.2.2.2.1 Compresores axiales

Estos compresores se caracterizan, y de aquí su nombre, por tener un flujo axial en forma paralela al eje.

El gas pasa axialmente a lo largo del compresor, que a través de hileras alternadas de paletas, estacionarias y rotativas, comunican cierta velocidad del gas o energía, que después se transforma en presión (P). La capacidad mínima de este tipo de compresores, viene a ser del orden de los quince metros cúbicos por segundo (m^3/s), utilizan un tambor de equilibrio para contrarrestar la reacción o empuje axial. Debido a su pequeño diámetro y para un mismo tipo de trabajo, funcionan a

velocidades más elevadas que los compresores centrífugos, estas velocidades son superiores en un 25% aproximadamente.

Los compresores axiales se destinan a aquellas aplicaciones en que es preciso disponer de un caudal constante a presiones moderadas. Los compresores axiales son más adecuados para aquellas plantas que precisen grandes y constantes caudales de aire.

Una aplicación muy frecuente es el soplado de los altos hornos. Normalmente se utilizan para capacidades alrededor de los 65 metros cúbicos por segundo y para presiones efectivas de hasta 14 bares.

Para el caso de los compresores axiales, el movimiento a lo largo de un eje se le llama movimiento axial, el movimiento axial es recto. Un compresor que mueve el gas en dirección paralela con su eje es un compresor axial. Estos compresores tienen placas de rotor y placas de estator. Las placas del rotor están fijadas al eje y giran con él, mientras que las placas del estator están fijadas a la cubierta. Cuando el gas es lanzado dentro de las placas del estator, las aberturas entre las placas actúan como difusores reduciendo la velocidad del gas; con esta pérdida de velocidad la presión del gas aumenta. En general, se puede señalar que el compresor axial eleva la presión mediante el uso de muchos juegos de placas de estator y del rotor.

En los compresores axiales el flujo del gas es paralelo al eje o al árbol del compresor, y no cambia de sentido como en los centrífugos de flujo radial. La carga por etapa del axial es mucho menor (menos de la mitad) que la de un tipo centrífugo, por ello, la mayor parte de los axiales son de cierto número de etapas en serie, cada etapa consta de aspas rotatorias y fijas. En un diseño de reacción de 50 %, la mitad

del aumento de la presión ocurre en las aspas del rotor, y las de la segunda mitad en las del estator.

Los compresores de flujo axial están disponibles desde unos veinte mil pies cúbicos normales por segundos (20 MPCNS) hasta más de cuarenta mil pies cúbicos normales por segundo (40 MPCNS), y producen presiones de hasta 65 lpcm en un compresor industrial típico de 12 etapas, o de un poco más de 100 lpcm, con los turbocompresores de 15 etapas.

Estos tipos se emplean en turbinas de gas y motores de reacción (jet) para aviones, excepto los muy pequeños, también se emplean mucho en aplicaciones que requieren flujos de gas superiores a 75mil o 100mil pies cúbicos normales por segundo (75 ó 100 MPCNS); en especial porque son más eficientes que los centrífugos de etapas múltiples de tamaño comparable, si esto se cumple el proceso puede llegar a tener una alta eficiencia. El compresor axial generalmente es más costoso que el compresor centrífugo, y en tamaños más pequeños solo se justifica por su mayor eficiencia.

Es de hacer notar que estos compresores no son de mucha utilidad para el proceso de compresión del gas natural, su utilidad está más limitada a otras funciones. En la figura 2.4 se presenta un ejemplo de un compresor axial.



Figura 2.4 Modelo de un compresor axial

2.3 Compresores centrífugos

El compresor centrífugo o de flujo radial, es una máquina que convierte la energía cinética en presión. El aumento de presión tiene lugar por medio de dos tipos de elementos, los elementos rotativos, denominados impulsores que aceleran radialmente el fluido, tal como aparece en la figura 2.5, y los elementos estáticos denominados difusores dispuestos alrededor de los impulsores, formando parte de la carcasa del compresor.

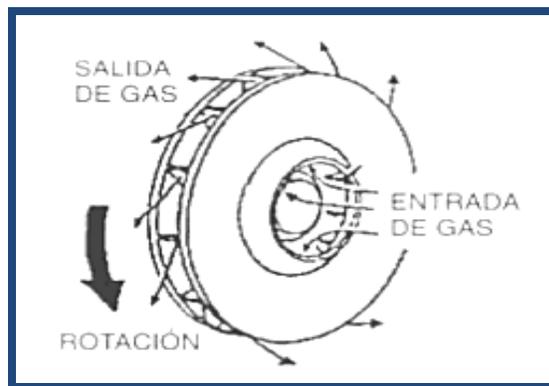


Figura 2.5 Impulsor del compresor centrífugo

Cuando el impulsor empieza a girar, los álabes fuerzan el movimiento del gas desde el centro hacia la parte exterior, imprimiéndole velocidad. Como el gas tiende a oponerse al empuje de los álabes, se origina un aumento en la presión, por lo que se puede decir que el impulsor imprime al gas presión y velocidad, debido a la fuerza centrífuga.

En la figura 2.6 se muestra gráficamente el incremento de la presión que ocurre en el proceso de compresión. Es decir, que presenta en forma gráfica la diferencia entre la presión de succión y descarga. Los compresores centrífugos son los equipos

de compresión que más se han desarrollado en los últimos años, esto se debe a que en muchas aplicaciones han resultado más eficientes que los compresores recíprocos, esta eficiencia se expresa en términos del consumo total de energía por unidad de costo y por unidad de peso del sistema compresor. Este factor, por ejemplo, ha sido determinante en la selección de los sistemas que deben instalarse en las plataformas construidas costa afuera, donde deben de ser instaladas las plantas compresoras, para permitir el transporte y almacenamiento del gas natural producido.

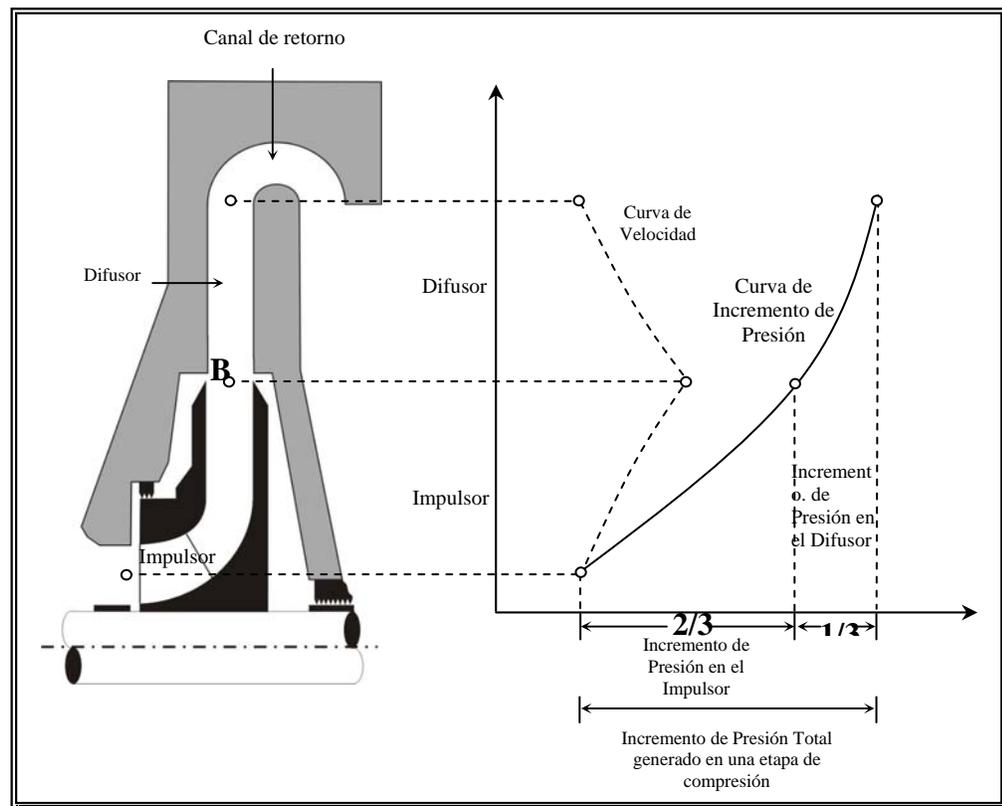


Figura 2.6 Etapas de un cilindro compresor centrífugo

En la figura 2.7 se muestra un compresor centrífugo con cuatro impulsores, en el cual se ve que el gas que llega a un difusor se dirige a la entrada del próximo

impulsor. Cada impulsor va añadiendo presión al gas, de tal forma que el trabajo realizado por un compresor se traduce en un aumento de energía en el gas. Esta energía produce normalmente un aumento en la presión y temperatura del gas. Este tipo de compresor tiene una gran seguridad de funcionamiento, facilidad de regulación y buena adaptabilidad a las condiciones de servicio de los procesos industriales.

Debido a las características intrínsecas de este tipo de compresor, se puede decir que debe utilizarse donde se requiere mantener una presión constante dentro del proceso.

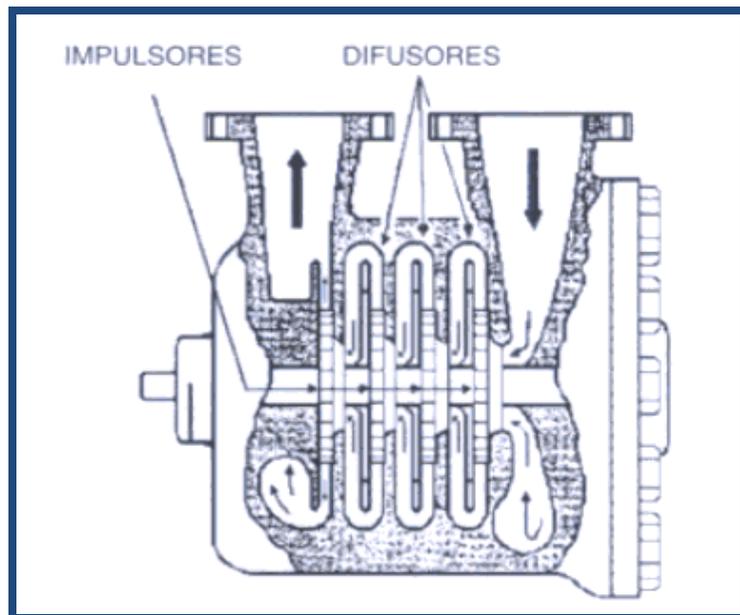


Figura 2.7 Compresor de cuatro impulsores

2.3.1 Ventajas y desventajas de los compresores

Tabla 2.1 Ventajas y desventajas reciprocantes vs centrífugos

| TIPO | VENTAJAS | DESVENTAJAS |
|---------------|--|--|
| RECIPROCANTES | <ul style="list-style-type: none"> - Gran flexibilidad en rango operacional. - Maneja mejor caudal a altas presiones. - Menos sensible a cambios en la composición del gas | <ul style="list-style-type: none"> - Alto costo inicial. - Alto costo de mantenimiento. - Tamaño y peso elevado. - Motores de baja velocidad y alto mantenimiento. - Mayor tiempo de parada. |
| CENTRÍFUGOS | <ul style="list-style-type: none"> - Menos costo inicial. - Menos costo de mantenimiento. - Menos tiempo parado. - Menor tamaño y masa. - Motores de alta velocidad y bajo mantenimiento. | <ul style="list-style-type: none"> - Límite inferior de caudal. - Alto costo de potencia del motor. - Sensible a cambios en la composición y densidad del gas. - Rango operativo limitado por golpe de ariete. |

Tabla 2.2 Ventajas y desventajas axiales vs centrífugos

| TIPO | VENTAJAS | DESVENTAJAS |
|-------------|--|--|
| AXIALES | <ul style="list-style-type: none"> - Alta capacidad de flujo. - Mayor eficiencia. - Menor tamaño físico y menor peso. - Más fáciles de manejar en paralelo. | <ul style="list-style-type: none"> - Sistemas de control de flujo y Anti-surge más complejos y costosos. - Límites de presión más bajos. - Principalmente diseñado para manejo de aire o gases limpios no corrosivos. |
| CENTRÍFUGOS | <ul style="list-style-type: none"> - El control de flujo es simple, continuo y eficiente en un alto rango. - Menos costosos. - Pueden manejar suciedad, erosión y gases corrosivos. | <ul style="list-style-type: none"> - Menos capacidad de flujo. - Menor eficiencia. - Mayor tamaño y peso. |

2.3.2 Características generales de los compresores centrífugos

Los compresores centrífugos pueden ser máquinas tanto de una sola etapa, como de etapas múltiples, ya sean de impulsión directa o indirecta a través de engranajes; estos compresores se subdividen a su vez en dos tipos principales de acuerdo a su carcasa, en tal sentido se tienen: carcasa dividida en forma horizontal y carcasa dividida en forma vertical, también conocidos como compresores tipo barril; los primeros manejan altos valores de flujo y baja relación de compresión, tienen gran aplicación en líneas de transmisión y procesos; los de tipo barril manejan valores de flujo de medios a altos, empleando una alta relación de compresión, en aplicaciones de levantamiento artificial, reinyección, almacenamiento, etc.

La figura 2.8 muestra en mayor parte los diversos componentes que conforman el cilindro compresor centrífugo, en términos generales se puede señalar que en estos compresores el desplazamiento del fluido es esencialmente radial. El compresor consta de uno o más impulsores y de un número de difusores, en los que el fluido se desacelera. El fluido aspirado por el centro de una rueda giratoria, ojo del impulsor, es impulsado por los álabes de ésta y debido a la fuerza centrífuga hacia los canales del difusor.

La principal característica de los compresores centrífugos, es que su función de trabajo está relacionado con los cambios en la velocidad del proceso de compresión, velocidad que después se convierte en energía, que hace que el proceso de compresión se lleve a cabo.

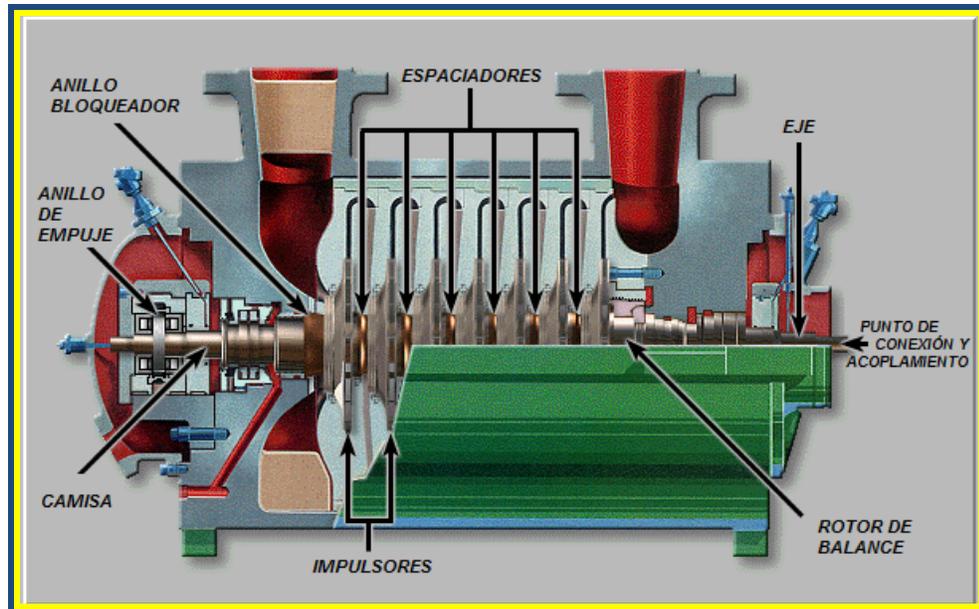


Figura 2.8 Representación gráfica de los componentes un compresor centrífugo

Después que la energía cinética se ha convertido en presión, el fluido es conducido hacia el centro del próximo impulsor y así sucesivamente. Las velocidades de funcionamiento son bastante altas comparadas con otros compresores.

La gama comprendida entre 50.000 - 100.000 (RPM), es bastante frecuente en industrias aeronáuticas y especiales donde el peso es un factor dominante, en vista que si el peso del compresor es extraordinariamente grande puede afectar la eficiencia del cilindro compresor, y por ende afectar todos los procesos que depende de este. Los compresores centrífugos, con velocidades próximas a 20.000 (RPM) frecuentemente son del tipo comercial más común, aún cuando se están fabricando con velocidades un tanto mayores.

Debido a las elevadas velocidades con que se construyen los compresores dinámicos de tamaño medio, se utilizan cojinetes amortiguadores inclinados o

abiertos en lugar de los rodillos, que son los que se incorporan a los compresores de desplazamiento. El caudal mínimo de un compresor centrífugo, está limitado principalmente por el flujo de la última etapa, luego es de vital importancia tener claramente establecido el caudal en esta etapa.

Los compresores centrífugos han tenido un gran desarrollo en los últimos años, debido fundamentalmente al consumo total de energía por unidad de costo y por unidad de peso del sistema compresor, teniendo como función la compresión del gas natural. En estos casos el gas es acelerado por el movimiento de aspas en rápida rotación, corriente arriba dispositivos internos convierten esa energía cinética en presión a la descarga. Estos compresores son los equipos adecuados para comprimir grandes volúmenes de gas, con relaciones de compresión reducidas, si esto se cumple el proceso de compresión puede llegar a ser de una alta eficiencia, lo que es de gran importancia en la industria del gas natural.

Los compresores centrífugos tienen un intervalo de condiciones de operación relativamente estrecho, que puede llegar a tener un efecto importante en la capacidad del sistema.

2.3.3 Utilidad de los compresores centrífugos

Los compresores centrífugos son el tipo que más se emplea en la industria de procesos químicos por su construcción sencilla, y por ser 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 flujo desde 3000 hasta 150.000 pies cúbicos normales por segundo (150 MPCNS). El impulsor convencional, cerrado o con placas se utilizaría para cargas adiabáticas hasta de 12000(pie-lb/lb).

El impulsor abierto de álabes radiales producirá mas carga con los mismos diámetros y velocidad, sus variantes, con inductor o álabes tridimensionales producirá hasta 20.000 (pie-lb/lb) de carga. En la figura 2.9 se presenta una imagen de un compresor centrífugo.

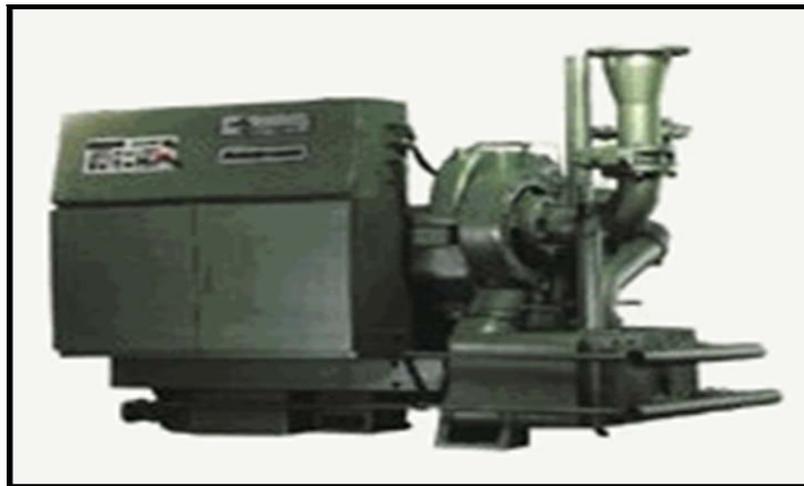


Figura 2.9 Modelo de un compresor centrífugo.

Los compresores centrífugos pueden ser de etapa simple o múltiple dentro de una carcasa sencilla. El principio del funcionamiento es el mismo de una bomba centrífuga, y su diferencia principal es que el gas manejado en un compresor centrífugo o soplador es compresible, mientras que los líquidos con los que trabaja una bomba son prácticamente incompresibles. Las condiciones que hay que tomar en cuenta para el diseño de un compresor centrífugo, y que el mismo tenga un alto grado de eficiencia son:

- ✓ La presión barométrica más baja.
- ✓ La presión de admisión más baja.
- ✓ La temperatura máxima de admisión.

- ✓ La razón más alta de calores específicos.
- ✓ El peso específico menor.
- ✓ El volumen máximo de admisión.
- ✓ La presión máxima de descarga.

Las unidades motrices de los compresores centrífugos son generalmente turbinas de vapor, turbinas de gas o motores eléctricos. La mayor parte de estos compresores operan a velocidades superiores a 60 (pie /s), con un motor de 2 polos cuya velocidad es 3600 RPM. En un compresor centrífugo manejado bajo un flujo podría ocurrir un fenómeno que tiene por nombre *Surge*. Este fenómeno se tratara con mayor profundidad en el desarrollo del proyecto, pero para describirlo de una manera sencilla se podría decir que él *Surge* es un contraflujo, el cual se lleva a cabo en este tipo de compresores. Dentro de un compresor centrífugo, no existen válvulas check o cualquier otro dispositivo mecánico para prevenir que el flujo de gas de descarga no corra en sentido contrario (hacia el lado de succión del compresor), permitiendo que el proceso de compresión del gas natural se realice.

El contraflujo puede existir si se presentan dos condiciones: Bajo flujo de gas, y alta relación de compresión. Una alta relación de compresión puede resultar de una alta presión de descarga, baja presión o una combinación de las dos. Cuando en el compresor entra el *Surge*, el gas de descarga fluye en dirección opuesta, tan pronto como esto ocurre la presión de descarga cae y el flujo vuelve a su dirección original, alimentando nuevamente la presión de descarga hasta el punto *Surge*, continuando el ciclo de compresión.

2.3.4 Forma de trabajo de un compresor centrífugo

La forma de trabajo de los compresores centrífugos es en dos etapas, en una de ellas se le añade energía al gas en forma de velocidad o energía cinética, y luego esta energía se convierte en presión. Estos compresores utilizan la tendencia centrífuga, esto significa que al alejarse del centro de rotación le imparten presión y velocidad al compresor. La parte del compresor que hace mover el gas es el impelente (impulsor), el cual mueve el gas hacia la parte exterior, con lo cual aumenta la velocidad del gas. Este incremento en la velocidad ocasiona una caída de presión, y crea una succión que permite la entrada de más gas. El gas entra al rotor a alta velocidad en los pasajes cercanos del difusor y donde la velocidad se hace disminuir en forma rápida y la energía es cambiada a presión.

2.3.5 Eficiencia de los compresores centrífugos

A pesar que su eficiencia no es óptima son muy utilizados en la industria petrolera. Los compresores centrífugos, por lo general son de menor peso y tamaño que los reciprocantes. En los últimos años se ha incrementado el uso de estos compresores, en vista que no presentan fuerzas inerciales que inducen a vibraciones. Como se explicó anteriormente, el propósito de un compresor centrífugo es incrementar la presión del gas y esto se efectúa en dos etapas.

Los compresores dinámicos, grupo al que pertenecen los compresores centrífugos, se basan en el principio de impartir velocidad a una corriente de gas y luego convertir esta energía en presión. Con frecuencia a estos compresores se les denomina turbocompresores; y los cilindros centrífugos comprenden, tal vez el 80% o

más de los compresores dinámicos. Los compresores centrífugos tienen relativamente pocos problemas y son confiables para mover gas.

2.3.6 Diseño de un compresor centrífugo

El compresor centrífugo está diseñado para comprimir gas entre ciertos límites de presión mediante la energía impartida a este último. Esta compresión se efectúa en el impulsor o rotor, cuyas paletas u hojas imparten energía al fluido, aumentando la energía cinética y la presión estática del mismo. El gas que sale del rotor a gran velocidad, entra en el difusor que transforma esa energía cinética en presión estática. Este compresor utiliza la tendencia centrífuga (Aunque, la tendencia centrífuga no es una fuerza, sino el resultado de la tendencia del objeto a moverse en línea recta mientras lo atrae la fuerza centrípeta hacia el centro de rotación). La tendencia centrífuga de un objeto es la tendencia a alejarse del centro de rotación, o sea de la fuerza centrífuga. La parte del compresor centrífugo que hace mover el gas, es el impulsor. Cuando gira el impulsor, hace mover el gas hacia la parte exterior, luego el gas se mueve hacia el borde del impulsor, y su velocidad aumenta, y con ello hace que se realice el proceso de compresión del gas natural.

El aumento en la velocidad en el cilindro compresor centrífugo ocasiona una baja de presión, la cual crea una succión que permite la entrada de más gas. El compresor centrífugo usa la relación velocidad - presión para elevar la presión del gas. El gas entra al rotor a alta velocidad en los pasajes cercanos del difusor, y donde la velocidad es disminuida rápidamente y la energía es cambiada a presión. Cambiar velocidad a presión es el primer principio de los compresores centrífugos, el segundo principio son las fuerzas centrífugas, las cuales son generalmente por rotación. La cantidad de presión empujada contra el fondo depende de la velocidad de rotación. Un compresor centrífugo usa el rotor para obtener la presión rotacional del gas, y con

ello realizar el proceso de compresión del gas natural. En el difusor al igual que en el resto de los elementos del compresor, como son las volutas de entrada y salida, así como también las paletas para guiar el gas, se producen pérdidas por fricción; por lo tanto, el rotor debe desarrollar suficiente energía para satisfacer los requerimientos de presión más las pérdidas del compresor.

2.3.7 Principio de operación de un compresor centrífugo

Los compresores centrífugos generan un cabezal de descarga por desarrollar altas velocidades del gas en un impulsor centrífugo, convirtiendo una porción de esta velocidad en presión en el impulsor y completando la conversión en el pasaje del difusor, este modo de operación clasifica el equipo como un compresor dinámico. Los compresores y ventiladores centrífugos desarrollan la más alta velocidad en un plano perpendicular al eje, mientras que los compresores y ventiladores axiales, los cuales también pueden operar según el principio dinámico, desarrollan velocidad en la misma dirección del eje. La cantidad de energía que un compresor es capaz de impartir a cada unidad de masa de gas es limitada por la velocidad periférica de los álabes del impulsor. De esta manera el compresor centrífugo tiene un máximo cabezal de capacidad, siendo limitado por la velocidad giratoria del rotor, la cual a su vez es limitada por el esfuerzo permisible del impulsor. Para permitir la operación de impulsores sometidos a esfuerzos que pueden llegar tan altos como 400 a 590 MPa (60000 a 85000 psi), se utilizan aceros de alta dureza en la fabricación de éstos.

2.3.8 Limitaciones críticas de un compresor centrífugo

- **Temperatura de descarga permitida**

1. Consideraciones de proceso

Debido a que el funcionamiento del compresor centrífugo es sensible a las restricciones de flujo, el ensuciamiento por polimerización se debe evitar. Esto limita la temperatura permitida a 120°C (250°F) en la descarga a aquellas corrientes ricas en diolefinas y olefinas.

2. Limitaciones del material

El hierro fundido, el cual se emplea normalmente en carcasas de baja presión, limita la temperatura del compresor a 230°C (450°F). El plomo se usa en algunos compresores centrífugos en los laberintos opuestos del pistón de balance, limitando así la máquina a más o menos 195°C (380°F).

3. Limitaciones estructurales

Las formas complejas de carcasas usadas en modelos de compresores centrífugos para servicios de volumen alto, presión baja y boquillas múltiples tienden a distorsionar excesivamente cuando están expuestos a un gradiente de temperatura mayor de 175°C (350°F). Las tolerancias muy pequeñas, radiales y axiales, que se requieren para alta eficiencia son adversamente afectadas por las distorsiones de la carcasa. Los diseños especiales de compresores centrífugos están disponibles para temperaturas a la descarga tan altas como 425 a 540°C (800 a 1000°F). Para servicios de regeneración en caliente hasta 260°C (500°F), se usan comúnmente construcciones de etapa simple suspendida con modificaciones solo a los sellos de ejes; y se han aplicado para servicios mayores de 425°C (800°F).

- **Temperatura de entrada**

Temperaturas de entrada tan bajas como -115°C (-175°F) pueden ser manejadas por diseños convencionales con la selección de materiales adecuados. Para servicios de más bajas temperaturas debe consultarse a especialistas.

- **Presión de descarga**

Los diseños de compresores centrífugos están disponibles comercialmente para presiones de descarga de 38000 kpa man. (5500 psig), y están siendo desarrollados para presiones de 48000 a 62000 kpa man. (7000 a 9000 psig).

- **Cabezal**

Muchos de los diseños de compresores centrífugos se limitan de 8 a 9 impulsores por carcasa; unos pocos diseños comerciales pueden acomodar 10, 11 ó 12 etapas. El cabezal que cada etapa del compresor puede desarrollar es típicamente de 3000 m (10000 pie) para gases cuyos pesos moleculares están en el rango del aire, 2600 m (8500 pie) para gases con $M = 55$ y 3500 m (11500 pie) para gases con $M = 5$. El cabezal promedio por etapa es usualmente menor que el máximo cabezal desarrollado por etapa. El cabezal total por carcasa rara vez excede los 30000 m (100000 pie). Muchos modelos tienen limitaciones muy por debajo de este nivel. Los compresores de etapa simple y alta velocidad se pueden especificar para cabezales tan altos como 8500 m (28000 pie). Las etapas de los compresores centrífugos, paquetes que manejan aire de planta, alcanzan de 6100 a 6700 m/etapa (20000 a 22000 pie/etapa). Los impulsores especiales de alto desempeño que se utilizan en compresores multietapas desarrollan cabezales tan altos como 5200 m (17000 pie).

- **Flujo volumétrico a la entrada**

El mínimo para máquinas convencionales está cercano a $0.17 \text{ m}^3/\text{s}$ ($350 \text{ pie}^3/\text{min}$) real para gases limpios y $0.24 \text{ m}^3/\text{s}$ ($500 \text{ pie}^3/\text{min}$) real para gases sucios. El máximo de unos pocos fabricantes está en el rango de 71 a $90 \text{ m}^3/\text{s}$ (150000 a $190000 \text{ pie}^3/\text{min}$) para el aire y cerca de la mitad de este nivel para gases. Este nivel ha sido alcanzado por arreglos tanto de flujo sencillo como de flujo doble.

- **Flujo volumétrico a la descarga**

El mínimo es ligeramente más bajo que la limitación a la entrada, típicamente entre 0.14 y $0.19 \text{ m}^3/\text{s}$ (300 a $400 \text{ pie}^3/\text{min}$) real, actuando a condiciones de descarga. El máximo no es significativo.

- **Sensibilidad mecánica**

- a) Deficiencia de aceite lubricante en los cojinetes.
- b) Sucio en el aceite lubricante.
- c) Desalineación del acoplamiento.
- d) Desbalanceo del rotor debido a cuerpos extraños que se alojan en el impulsor, o por pérdida irregular de metal en los impulsores.
- e) Líquido atrapado.

2.4 Criterios generales que se deben tener en cuenta para la selección de un compresor

Para una mayor eficiencia en el proceso de compresión del gas natural, tiene una gran influencia los criterios que se utilicen en la selección del cilindro compresor; para ello se debe tener en cuenta lo siguiente:

- El uso al que se va a destinar y aquellos otros requerimientos relativos a presión, aire exento de aceite, etc.
- Máxima y mínima demanda de aire, desarrollo futuro previsto, etc.
- Condiciones ambientales; los factores que hay que considerar aquí son: temperaturas extremas, grado de contaminación del aire, altitud, etc.
- Clase de edificación en la que se va a instalar el compresor; los factores a considerar son: limitaciones del espacio, carga que puede soportar el suelo, limitaciones de la vibración, etc.
- Costo de la energía.
- Cantidad de calor que puede recuperarse.
- Límites de la disponibilidad de potencia, parámetro de gran importancia para evaluar la eficiencia del compresor.
- Limitaciones de ruido.
- Continuidad o intermitencia en la necesidad de aire.
- Experiencia que tiene tanto el usuario como el personal de mantenimiento.

La figura 2.10 mostrada a continuación nos señala de manera gráfica la forma de seleccionar un tipo de compresor de acuerdo a su rango de operación:

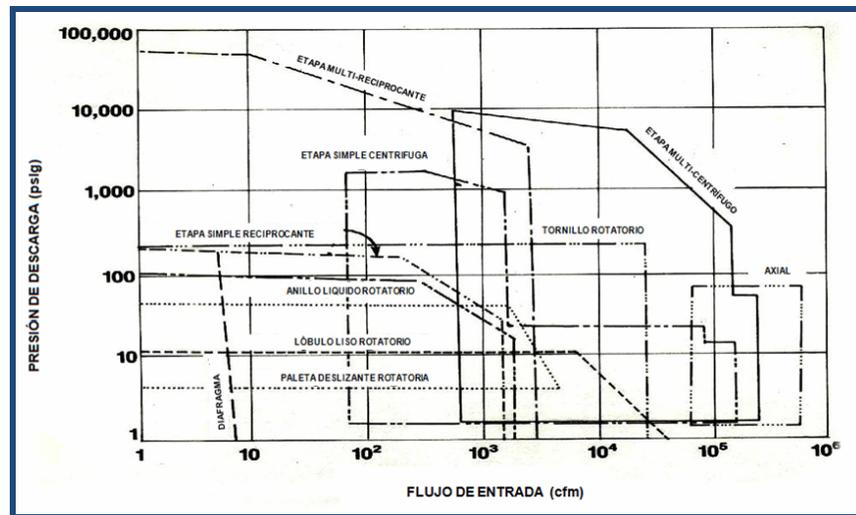


Figura 2.10 Rango de operación de los compresores

2.5 Parámetros importantes a tomar en cuenta para la selección de un compresor

Para obtener un buen desempeño del compresor, en la parte operacional del mismo se deben tener en cuenta diversos parámetros de importancia; como son los siguientes:

- **Método de sellado**

Los sellos mecánicos impiden el escape de todos los tipos de fluidos, estén estos en estado gaseoso o líquido a lo largo de un eje rotatorio. Estos sellos poseen extensas aplicaciones en las industrias de procesos químicos, en procesos criogénicos y de alta temperatura.

- **Velocidad del compresor**

Tener métodos adecuados para el conocimiento de la velocidad del compresor es de mucha importancia, en especial si se desea evitar engranaje, además es importante saber que se está trabajando dentro del rango establecido por el compresor, tanto recíproco como centrífugo, los cuales desde luego, tienen valores diferentes, y que hay que tener en cuenta para evaluar el proceso de compresión del gas natural.

- **Lubricantes**

La lubricación de los sellos debe ser la adecuada, para evitar problemas operacionales.

- **Caballaje**

Para el normal funcionamiento del compresor es necesario que tenga una potencia mayor, a la requerida. Los fabricantes recomiendan, siempre que se disponga un caballaje de 10% adicional, por si se llegase a una descarga no prevista.

- **Presión**

En el proceso de fabricación del compresor, se realizan pruebas de presión, de tal forma que no hayan irregularidades entre la presión de operación y presión de trabajo.

- **Mantenimiento del compresor**

Una vez que el compresor haya iniciado su labor, será necesario seguir un estricto programa de mantenimiento preventivo, de tal manera que la vida útil del compresor no se vea disminuida. Es necesario durante el funcionamiento vigilar lo siguiente: Flujo de agua de enfriamiento, presión y temperatura del aceite, funcionamiento de los controles y puestos de control, presión y temperatura de succión y descarga, ruidos anormales, presión y temperatura de lubricación de los cojinetes, amperaje, carga y voltaje del motor.

CAPITULO III

METODOLOGIA

3.1 .Técnicas de investigación

Los métodos o técnicas de investigación que se emplean mayormente para obtener los datos son: el método directo que consiste en la observación directa y recolección de datos en la fuente primaria y el método indirecto que se trata de la recopilación de datos brindados por terceros.

En función de cumplir con los objetivos establecidos en el estudio, se aplicaron las siguientes técnicas:

- **La observación directa:** que permitió obtener la información inmediata de los equipos que intervienen en el proceso de extracción. A través de esta técnica se obtuvieron los datos necesarios para realizar los estudios correspondientes a la investigación, así como también, conocer las condiciones en las que se encuentran los sistemas existentes en la referida instalación.

- **Consulta bibliográfica:** la documentación se empleó para recolectar información empírica y teórica referente al problema en estudio.

- **Entrevistas:** Se aplicaron entrevistas estructuradas a los ingenieros de proceso de la planta, con el propósito de obtener mayor información relacionada con las actividades que competen al desarrollo de este trabajo.

3.2. Instrumentos de recolección de datos

Son recursos indispensables para la investigación y su fin es recopilar información sobre el objeto de estudio.

En el presente trabajo se contó con herramientas tales como:

- Guía de entrevistas
- Referencias bibliográficas
- Cámara digital
- Internet

3.3. Técnicas de análisis de datos

Una vez aplicados los instrumentos y técnicas de recolección de datos, la información que se recabó en el proceso fue analizada cualitativamente, para una mejor comprensión de la misma.

3.4. Fases de la investigación

A fin de cumplir con los objetivos propuestos, el proyecto se realizó en etapas que se describen a continuación:

- **Revisión bibliográfica:** En este nivel se procedió a recopilar toda la información que sustentó el proyecto, mediante la revisión de textos, manuales y cualquier otro tipo de material impreso, de utilidad para la documentación del tema de estudio.

- **Actualización de los datos:** Se visitó a las plantas MUSCAR (PIGAP I) y RECAT Anaco, esta actividad se realizó con la finalidad de conocer el funcionamiento de los compresores centrífugos y obtener conocimientos sobre el sistema de control del fenómeno de *surge*.
- **Emisión de las conclusiones y recomendaciones:** Obtenidas a través del estudio realizado.
- **Elaboración del Informe Final:** Por último se redactará el trabajo de grado cumpliendo con las reglas asociadas a su desarrollo, ésta redacción se hará de manera ordenada y clara basándonos en los objetivos planteados en el mismo.

CAPITULO IV

DESARROLLO

4.1 Definición de un proceso de compresión

Este proceso se define como la reducción de un volumen de gas dado, por medio de la aplicación de un trabajo necesario para generar la coalescencia de sus moléculas, obteniendo como resultado un cambio de energía manifestada con el aumento en la presión de dicho fluido.

En la figura 4.1 se presenta un ciclo de compresión para una mezcla de gas natural, en esta figura se observa que el ciclo se lleva a cabo en cuatro etapas, las cuales son perfectamente diferenciables en la gráfica.

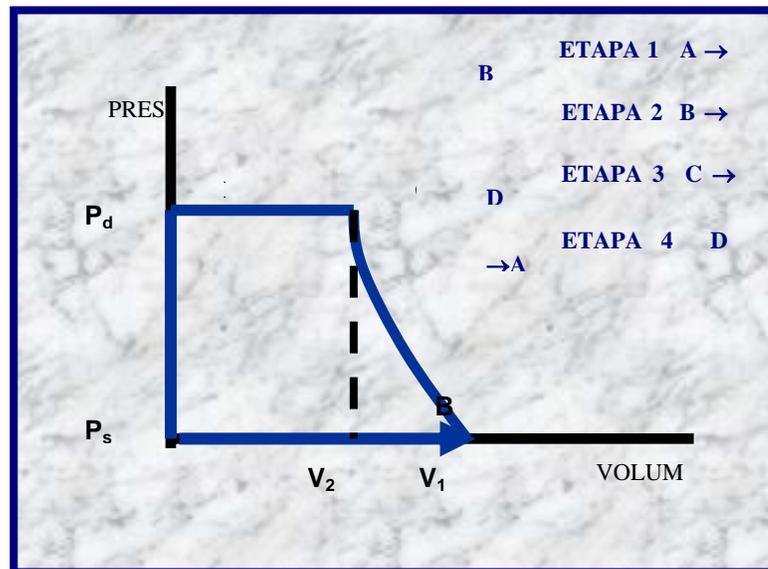


Figura 4.1 Ciclo del proceso de compresión del gas

Etapa I, (trayectoria AB): Aquí el gas es admitido a través de las válvulas de succión, el valor de la presión en este punto se conoce como presión de succión y se simboliza como (P_s). En forma simultánea el pistón se dirige hacia la otra cara del cilindro, cuando el pistón alcanza el tope de su recorrido, el cilindro queda lleno de gas, caudal que corresponde a (V_1).

Etapa II, (trayectoria BC): Aquí el pistón invierte su dirección de movimiento y actúa sobre el volumen de gas (V_1) comprimiéndolo desde la presión de succión hasta una presión denominada presión de descarga y que se simboliza como (P_d).

En la Etapa III, (trayectoria CD): Esta etapa se inicia justo en el momento en que la presión de descarga se hace igual a una presión existente en la línea de descarga, el pistón continua moviéndose desplazando el volumen de gas comprimido (V_2) a la presión constante de descarga (P_d).

Etapa IV, (Trayectoria DA): Esta etapa comienza cuando nuevamente el pistón cambia de sentido de movimiento, en dicha etapa se cierra la válvula de descarga y se abre la válvula de succión para dar inicio a un nuevo ciclo de compresión

Para que este proceso se realice con éxito se deben tener en cuenta los acondicionamientos por el cual atraviesa el gas, en donde dicho fluido con una presión inicial P_i , se comprime y posteriormente se descarga a los niveles de presión final P_f superiores requeridos.

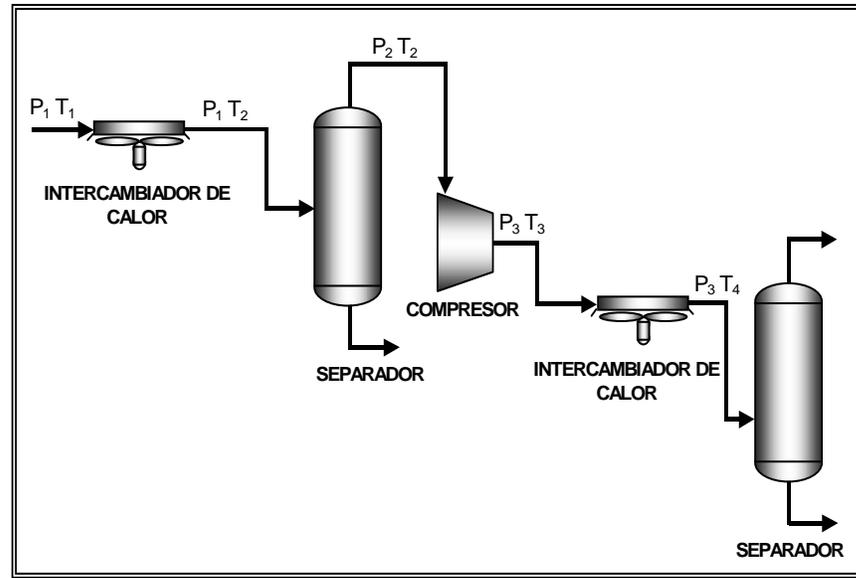


Figura 4.2 Diagrama simplificado de un sistema de compresión

En la figura 4.2 se puede observar que el gas proveniente de la fuente entra a un intercambiador de calor donde se reduce la temperatura desde T_1 hasta T_2 . Producto de este descenso en la temperatura, se puede o no producir la condensación de ciertos componentes que conforman la mezcla, por lo tanto, en aquellos casos donde este proceso se produzca, es necesario instalar un separador, del cual salen típicamente dos corrientes, una de gas por el tope y una de líquido por el fondo; la corriente de gas es enviada hacia el compresor en donde se eleva la presión desde P_2 hasta P_3 , lo que origina un aumento de temperatura desde T_2 hasta T_3 ; la corriente de gas que sale del compresor a T_3 entra a un intercambiador de calor de donde sale a una temperatura menor T_4 ; esta corriente de gas, con cierto contenido de líquido, es enviada a un separador de donde salen dos corrientes, una de gas por el tope y una de líquido por el fondo; así se cuenta con el volumen de gas a las condiciones de presión y temperatura requeridas por el proceso.

El control de esta fuerza expansiva proporciona la fuerza motriz de muchas máquinas y herramientas. El proceso de compresión, como proceso es termodinámico, el cual se lleva a cabo a través de la serie de etapas ya mencionadas, y dicho proceso se lleva a cabo mediante los compresores que tienen como función principal someter el gas a un trabajo, para así aumentar la energía total.

4.2 Descripción del fenómeno de *surge* y su efecto en compresores centrífugos

El *Surge* es una inestabilidad dinámica (oscilaciones crecientes) que ocurre en compresores dinámicos, generalmente en centrífugos, en donde se presentan oscilaciones en el flujo manejado por el compresor y fluctuaciones de la presión en el sistema de tuberías que a éste se conectan. Ésta interacción entre el compresor y el sistema de tuberías es lo que va a determinar que el fenómeno de *Surge* este asociado al sistema completo, y no se encuentre confinado a la máquina solamente.

Existen dos (2) tipos de *Surge*:

1. *Surge* leve:

Se caracteriza por fluctuaciones momentáneas de la tasa de flujo, el cual es el estado subsiguiente del *Stall*, por incrementos leves en la temperatura de descarga, pulsaciones leves del flujo y la presión de descarga, y aumento en la vibración radial y axial.

2. *Surge* violento:

Se caracteriza por fuertes ruidos en el compresor, golpeteos en las válvulas de control de descarga, altos incrementos de la temperatura de descarga, y pulsaciones

rápidas en la presión de descarga y el flujo manejado por el compresor, en este caso la incidencia es alta.

Así como el *Surge* es causado generalmente por bajo flujo, existe otro fenómeno contrario a este denominado *Choke* o *Stonewall* causado por la fricción de alta velocidad.

Un mapa del compresor es solo un fragmento de la información más importante para describir el *Surge*, dicho mapa muestra la curva característica del compresor para diversas condiciones de funcionamiento; tal como se observa en la figura 4.3.

Cada curva representa el aumento en la presión de descarga desarrollada por el compresor, mientras que el flujo de succión es variado para una condición operacional dada (tal como la velocidad). La condición operacional no se limita a estas curvas mostradas, la misma también puede ser ajustada a valores intermedios. El eje X es casi siempre flujo volumétrico en (acfm) a la temperatura indicada en la succión, presión y peso molecular.

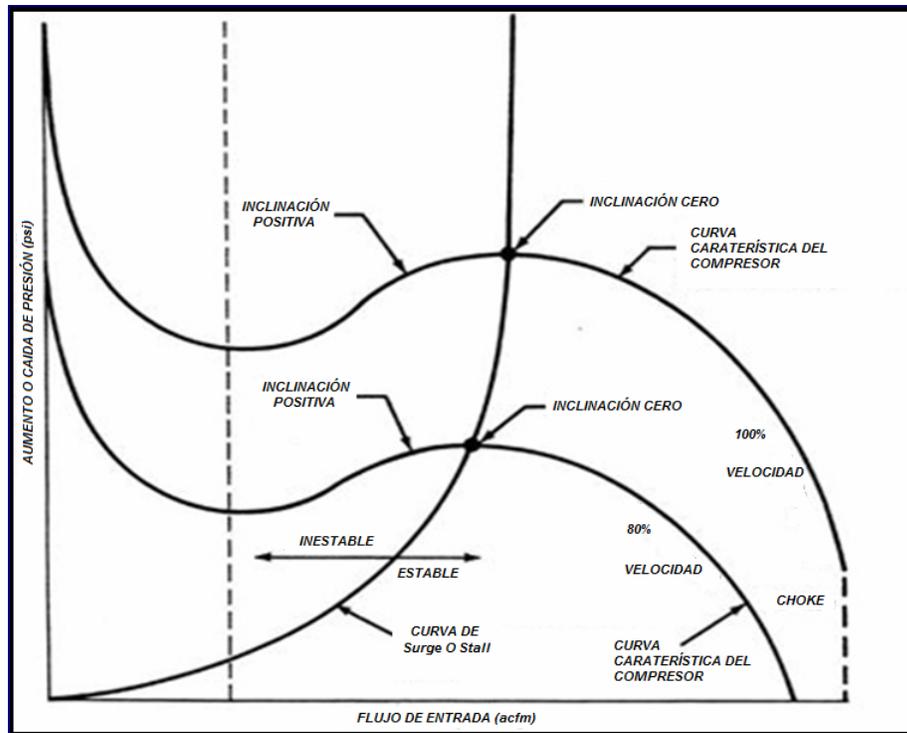


Figura 4.3 Mapa compresor centrífugo de velocidad variable

El eje Y representa la presión de descarga en (Psia), el cociente de la presión de descarga a presión de succión (adimensionales), o el aumento del diferencial de presión de succión a descarga en (Psi). Las curvas características suministradas por el fabricante del compresor, cubren la región con pendiente negativa, y terminan donde la pendiente se aproxima a cero (una pendiente negativa significa que la presión deberá cambiar en la dirección opuesta para un cambio de flujo, y una inclinación cero (no existe pendiente) significa que la presión no cambiara en absoluto para un cambio en el flujo). Si trazamos una curva a través de los puntos donde la pendiente se hace cero para cada curva característica, la región a la izquierda de esta línea es donde ocurre la inestabilidad *Surge*.

La curva característica a la izquierda de la curva *Surge* es difícil de obtener; pero su forma general se asemeja a la mostrada en la figura anterior (fig. 4.3). El tramo de la curva con pendiente positiva puede ser encontrado suministrando gas presurizado en la descarga del compresor, para forzar un flujo negativo constante.

Si examinamos un sistema de compresión típico y miramos el sistema de descarga, desde la brida de descarga a la descarga de la válvula de control, que es el punto de máxima producción energética, puede ser vista como un recipiente equivalente. Mientras que el flujo dentro de este recipiente sea igual al flujo que está afuera, la presión en este recipiente se mantendrá constante. En el inicio del *Surge* el compresor dejará de producir el flujo en el recipiente, y la energía almacenada en este ahora actuará en el álabe originando flujo reverso desde el recipiente hacia la succión del compresor. Examinando una curva típica de rendimiento del compresor (figura 4.3), podemos ver que a consecuencia del aumento del cabezal requerido, el punto de operación se desplazará hacia la línea de *Surge*.

Cuando el punto de operación intercepta la línea de *Surge*, un flujo reverso se producirá causando que el punto de operación entre en la región de flujo negativo de la curva de rendimiento. El recipiente equivalente, por lo tanto, será vaciado durante esta reversión. Una vez que el recipiente equivalente se ha vaciado, la presión del sistema alcanzada por el compresor se reduce rápidamente, habilitando así al compresor para lograr un nuevo punto de funcionamiento en la región positiva de la curva de rendimiento de alto flujo.

Una vez que el recipiente se llena nuevamente, el punto de funcionamiento se desplaza hacia arriba por la curva del compresor al límite *Surge*; y el ciclo comienza de nuevo. Estos ciclos pueden ocurrir tan rápidamente como seis (6) veces por

segundo. Este ciclo también se puede observar más claramente en la figura 4.4 a continuación:

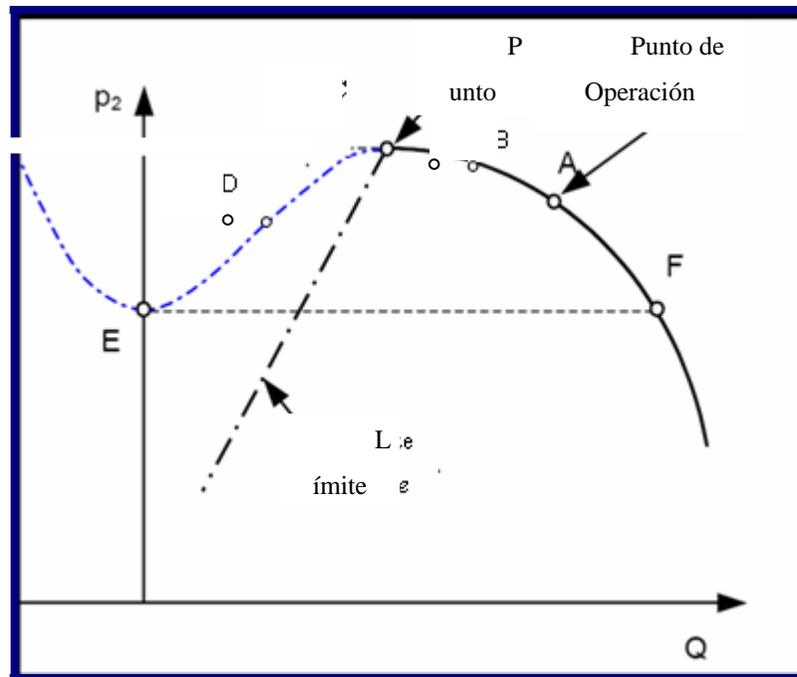


Figura 4.4 Ciclo de Surge

Supongamos que iniciamos en el punto A, donde es un punto normal de operación con una presión de descarga y un flujo dado, y comenzamos a disminuir la presión de succión o a aumentar la presión de descarga, esto trae como consecuencia que el compresor comienza a desplazarse desde el punto A, luego al punto B y luego al punto C, donde se inicia la zona de inestabilidad. Entre los puntos C y D las paredes de la capa límite comienzan a separarse del impulsor trayendo como consecuencia pequeñas recirculaciones, a medida que profundiza más el compresor en el área de Surge en el punto D; el flujo comienza a disminuir a tal punto que la velocidad del gas llega a ser cero, ahí estaríamos entre los puntos D y E; al ocurrir

esto, el diferencial de presión a la salida y entrada del impulsor llega a ser cero, con lo cual el compresor se recupera nuevamente y pasa bruscamente del punto E a F. Este ciclo se repite en forma sucesiva y a alta velocidad, razón por la cual los compresores comienzan a tener problemas en los sellos; inclusive en los impulsores. Naturalmente, esta acción produce grandes cantidades de energía que son absorbidas por los componentes mecánicos del compresor, y puede resultar en una cantidad significativa de aumento de la temperatura en el interior del mismo.

Debe entenderse que el gas se moverá hacia atrás y hacia adelante en el compresor más de seis (6) veces por segundo y no se enfriará, por lo tanto los aumentos de temperatura pueden ser rápidos y la expansión térmica puede causar grandes daños durante el *Surge*, sin embargo la maquina está dispuesta de controles de temperaturas los cuales la protegerán.

Existen diversas causas que pueden generar el fenómeno de *Surge* en un compresor, algunas de ellas son las siguientes:

- La gran concentración de sucio en el filtro de entrada al compresor reduce la presión de succión, causando una mayor relación de compresión.
- Disminución en el flujo de entrada lo que se traduce en una mayor relación de presión.
- Problemas en la válvula de recirculación.
- Fuga por los sellos inter etapa.
- Sucio en las paredes de los impulsores.
- Cambio en la gravedad específica del gas.
- Si la presión de succión y la velocidad de rotación se mantienen constantes y se incrementa la presión de descarga en forma violenta.

- Si la presión de descarga y la velocidad son constantes y se disminuye la presión de succión.
- Si la presión de descarga y la presión de succión son constantes y se disminuye la velocidad aceleradamente.
- Cuando el compresor no tiene la capacidad de producir suficiente cabezal para sobreponerse o vencer la resistencia impuesta, en este punto, el gas de la tubería de descarga revierte el flujo hacia el compresor momentáneamente.

4.3 Sistemas de control para la prevención del fenómeno de *surge* en compresores centrífugos

Los compresores, al igual que todo equipo importante para procesos, se deben controlar con la mayor certeza posible para tener un funcionamiento eficiente de la planta.

Al idear un sistema de control, los diseñadores deben tener en cuenta la forma de evitar una condición de funcionamiento inestable llamada *Surge*. Dicho con sencillez, el *Surge* ocurre cuando el caudal del compresor se reduce a un punto tan por debajo de las condiciones de diseño que se tiene un funcionamiento errático. Entonces, la función del sistema de control *Surge* es detectar la alteración potencial y compensarla en forma automática, al mantener un flujo en el compresor mayor que el de la condición *Surge*.

Los controles de un compresor centrífugo pueden variar a partir de su diversidad de controles manuales para crear un controlador radial. Las características del controlador, respuesta del proceso y los rangos de operación de los compresores deben ser determinados antes de seleccionar el controlador correcto.

La manera o el camino más eficiente para ajustar las características de los compresores a la producción total de energía requerida, es cambiar la velocidad de acuerdo con las normas referentes a su funcionamiento.

Existen procesos de compresión en donde el compresor requiere un motor para su funcionamiento, como es el caso de los procesos a velocidad constante; y otros usan turbina a gas como es el caso de los procesos a velocidad variable. Una de las principales ventajas del uso de turbinas de gas o vapor como controlador para compresores, es que ellos se ajustan para operaciones de velocidad variable. Con cada controlador, la velocidad puede ser controlada manualmente por un operador ajustando el gobernador de la velocidad sobre la turbina; o alternatively, la velocidad puede ser ajustada automáticamente por controladores neumáticos o eléctricos que cambian la velocidad en respuesta a una presión dada o una señal de flujo determinada.

4.3.1 Línea de control *Surge*

En la figura 4.5 se presenta gráficamente la línea de control *Surge*, esta como se observa es colocada hacia la derecha del límite *Surge*. Al diseñar la línea de control a la derecha se reduce la posibilidad de llegar a condiciones de oleaje, en el caso de que una disminución rápida en el flujo ocasione un rebase excesivo a la izquierda de la línea de control. Pero si se coloca la línea de control demasiado lejos hacia la derecha, habrá derivación innecesaria del gas y se desperdiciará energía.

En consecuencia, la ubicación de la línea de control representa un arreglo basado en las condiciones reales de funcionamiento de cada sistema. Básicamente el *Surge*, se evita al hacer recircular parte del flujo o purgar el exceso.

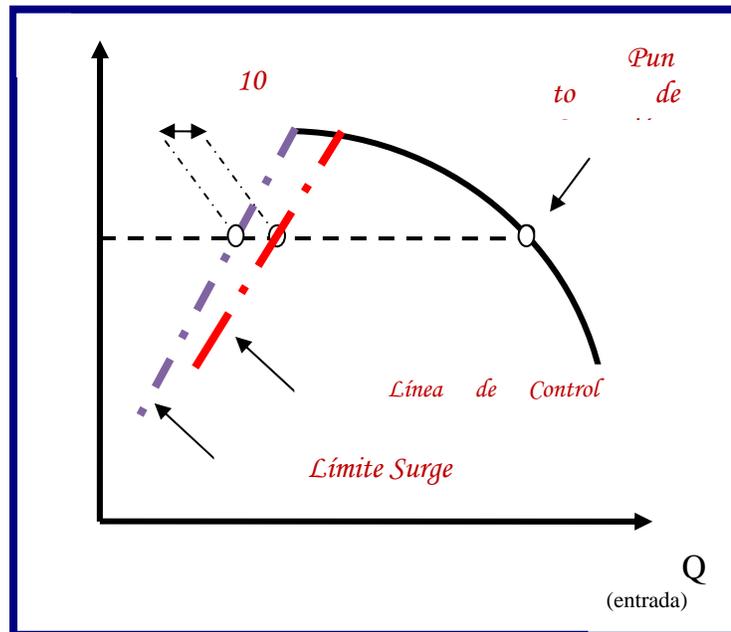


Figura 4.5 Límite Surge y línea de control Surge

Como regla general del fabricante del compresor, la línea de control está ubicada alrededor de un 10% del flujo o un 20% de la presión diferencial. Pero, hay casos en que el compresor debe funcionar cerca de la curva de oscilación (límite Surge), y es necesario reducir este margen. La línea de Surge refleja un límite de estabilidad, y los puntos que caracterizan a esta línea representan altas presiones de descarga y reducciones del flujo de entrada.

Es común una recirculación de 30 a 40% del flujo requerido para el proceso, por supuesto, este exceso de flujo consume energía, y no necesariamente evita todas las oscilaciones.

4.3.2 Control de la presión a velocidad variable

En la figura 4.6 podemos notar que el transmisor de presión (PT) detecta la presión del proceso, este convierte esta señal a una señal proporcional a la presión del proceso y la envía al controlador de presión (PC). El controlador de presión amplifica la señal transmitida y envía una señal modificada al elemento final. Dependiendo de los requerimientos del sistema, el controlador puede requerir un factor adicional de corrección llamado reajuste y activación.

El elemento final en este caso es el control de la velocidad. Por ejemplo, un incremento de la presión por encima del valor ajustado ocasionara la señal para ponerse en contacto con el gobernador, respondiendo este mecanismo a una disminución de la carga para disminuir la velocidad de la turbina y así reducir la presión del sistema.

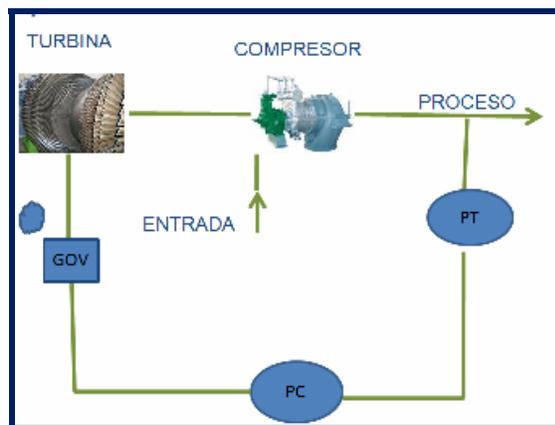


Figura 4.6 Control de presión a velocidad variable

4.3.3 Control del volumen a velocidad variable

Si la naturaleza del proceso requiere un volumen constante de descarga, entonces podría ser usado el diagrama o plan presentado en la figura 4.7. Aquí el transmisor de flujo (FT) capta el flujo del proceso, convierte esta señal a una señal proporcional al flujo del proceso y envía ésta al controlador del flujo (FC), el controlador de flujo amplifica la señal del transmisor y envía una señal modificada al elemento final. El factor de corrección de reajuste y activación podría ser necesitado.

El elemento final es el control de la velocidad, el cual está acoplado por un mecanismo que varía la velocidad a través del gobernador de la turbina. Por ejemplo, un incremento en el flujo por encima del punto de ajuste, podría causar una señal para activar el gobernador ocasionando que este reduzca la velocidad para mantener el flujo del sistema deseado.

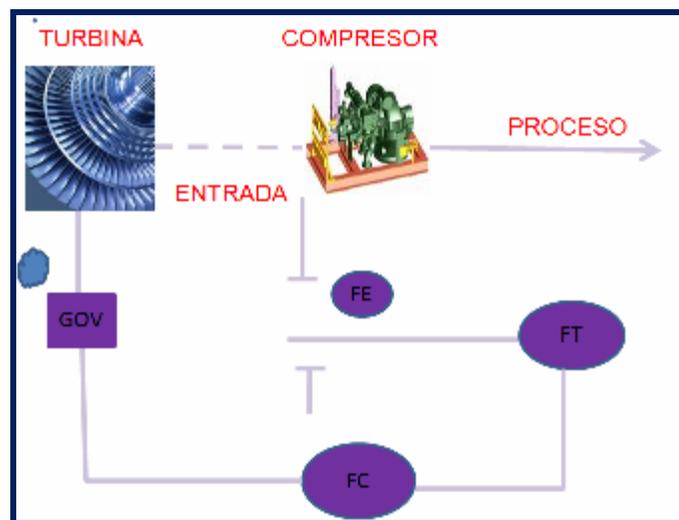


Figura 4.7 Control del volumen a velocidad variable

Cuando se usan motores eléctricos como controladores a velocidad constante, el compresor centrífugo es normalmente controlado por válvulas de admisión de succión. La regulación en la succión se traduce en una presión de succión ligeramente inferior a la cual la máquina está diseñada, y por lo tanto requiere de un mayor cabezal total si la presión de descarga se mantiene constante, es decir, un mayor cabezal para un flujo reducido.

4.3.4 Control de la presión a velocidad constante

El sistema de control mostrado en la figura 4.8 tiene la señal de presión captada y amplificada de una manera similar como la descrita en el caso para el control a velocidad variable.

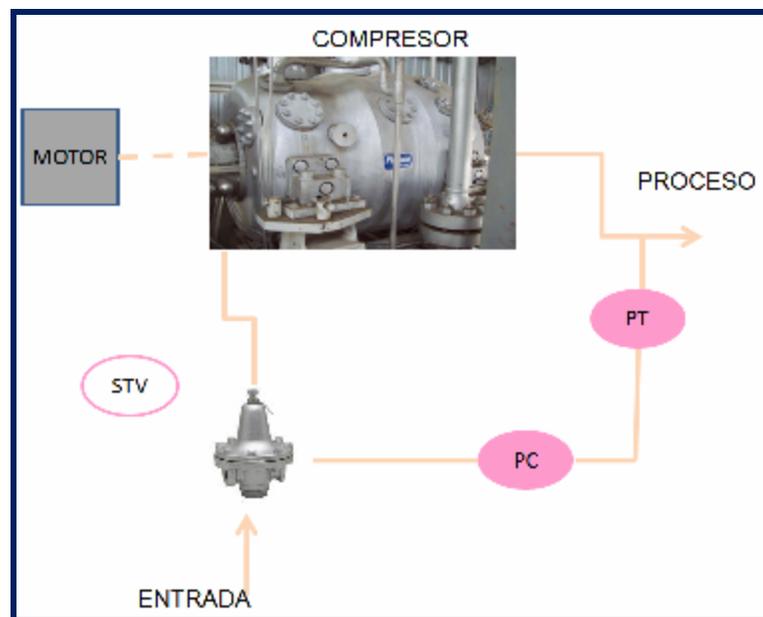


Figura 4.8 Control de la presión a velocidad constante

El elemento final es una válvula de succión en la admisión (STV) que reduce el flujo de gas a la entrada del compresor. Un incremento en la presión de ajuste, podría causar una señal para activar la válvula STV ocasionando el cierre parcial de la válvula con el objetivo de reducir la presión de entrada.

4.3.5 Control del volumen a velocidad constante

En la figura 4.9 se observa que el transmisor (FT) detecta el flujo del proceso, esto se logra usando un orificio o Venturi como elementos principales de flujo (FE), convirtiendo está en una señal proporcional y enviándola a un controlador de flujo (FC). El controlador de flujo amplifica la señal del transmisor y envía una señal modificada al elemento final. El reajuste y las acciones derivadas del controlador podrían ser requeridos. El elemento final es el mecanismo guía del compresor.

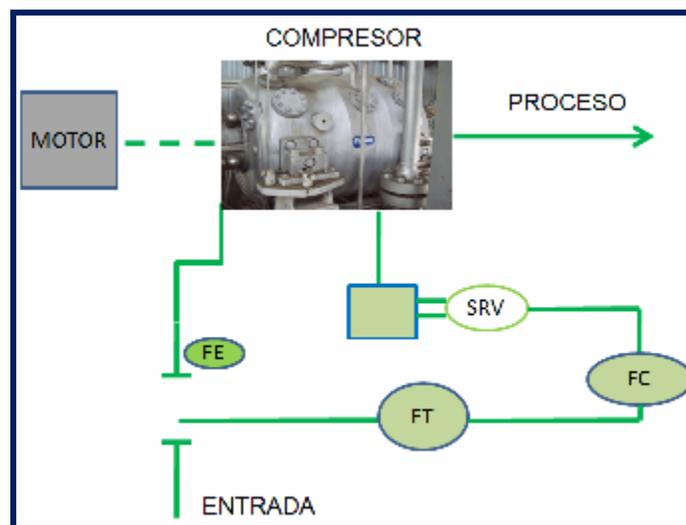


Figura 4.9 Control del volumen a velocidad constante

Los dispositivos guías son ajustados por medio de un cilindro posicional. Este cilindro es operado por una válvula SRV que recibe una señal proveniente del

controlador de flujo. Aquí un incremento en el flujo por encima del punto de ajuste causa una señal que activa el elemento final, el cual resultaría en el cierre de los dispositivos guías para disminuir el flujo.

4.3.6 Válvula control anti-*Surge*

Su función es proteger al compresor contra el oleaje o *Surge*, el sistema permite al gas de descarga recircular a la succión con el fin de que la unidad tenga el suficiente flujo para permanecer estable. El sistema tiene componentes que envían y reciben señales que provienen de los dispositivos de medición de flujo, presión de descarga, presión de succión y temperatura (figura 4.10)

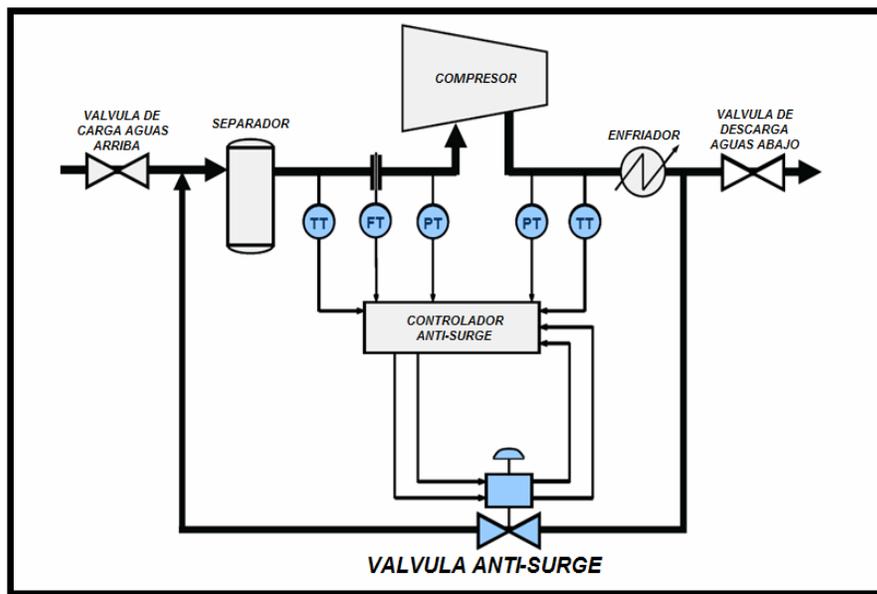


Figura 4.10 Control anti *Surge*

Por medio de cálculos y comparaciones con una curva característica de control anti-*Surge*, abre o cierra la válvula de recirculación en forma controlada para

mantener al compresor en una zona estable. También está en capacidad de detectar pulsos de inestabilidad en períodos cortos de tiempo con el fin de determinar si estamos en presencia o no del fenómeno de *Surge* (Figura 4.11).



Figura 4.11 Válvula anti *Surge* de (PIGAP) MUSCAR Monagas

4.3.6.1 Control anti-*Surge* volumen mínimo

En la figura 4.12 se muestra un sistema anti-*Surge* por medio de un volumen controlado. El transmisor de flujo capta el flujo del proceso usando un orificio o Venturi como elementos principales de flujo (FE), este convierte la señal a una que es proporcional al flujo del proceso y la envía al controlador *Surge* (SC).

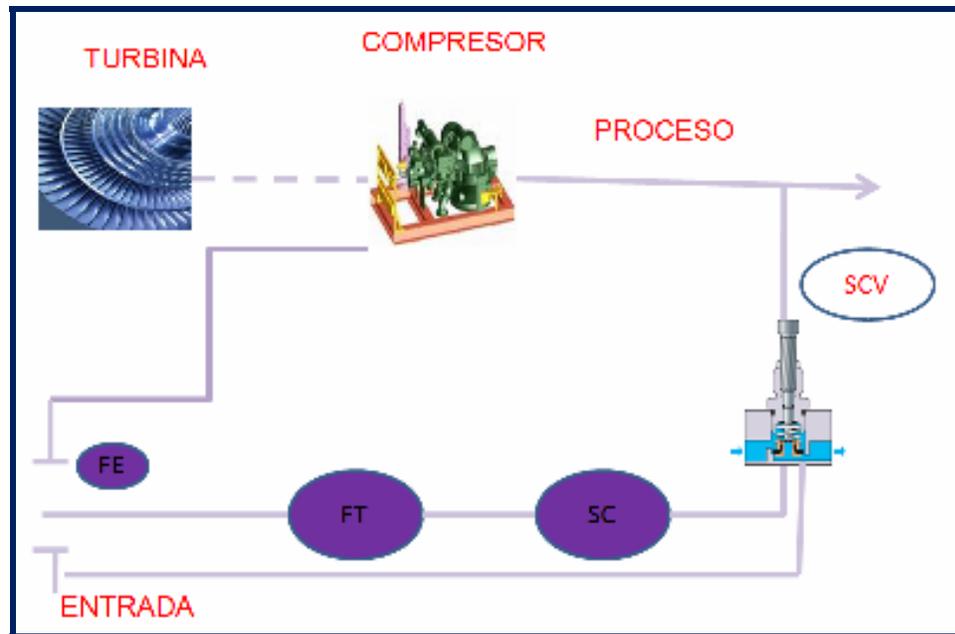


Figura 4.12 Control anti-*Surge* volumen mínimo

El SC compara la señal transmitida con la señal de ajuste. Si el punto de ajuste es excedido, el controlador amplifica la diferencia de las señales y envía esta señal modificada al elemento final. Los factores de corrección reajuste y activación podrían ser necesarios.

El elemento final es una válvula de control anti-*Surge*, dicha válvula realiza una restauración de la presión en la descarga del compresor. Como el flujo disminuye por debajo del valor mínimo, una señal causará que la válvula de control *Surge* se abra. Dicha válvula se abre como requisito para mantener un mínimo volumen a través del compresor.

4.3.6.2 Control anti-*Surge* presión límite

La figura 4.13 muestra un sistema de control anti-*Surge* para una presión limitada. El transmisor de presión (PT) capta la presión del proceso, este convierte esta señal a una señal que es proporcional a la presión del proceso y la envía a un controlador *Surge*. El SC compara la señal transmitida con la señal ajustada; si esta última es excedida, el controlador amplifica la diferencia de señales y la envía a la válvula de control *Surge*.

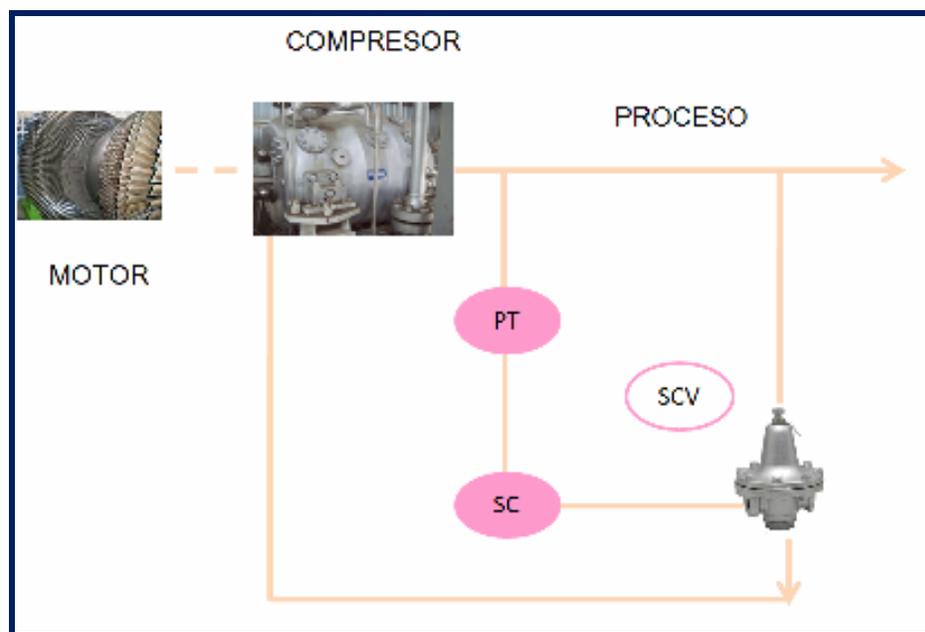


Figura 4.13 Control anti-*Surge*-presión límite

Un incremento en la presión del proceso por encima de la presión de ajuste causaría que la válvula de alivio se abra. La apertura de la válvula es requisito para cuidar el límite de la presión a un volumen mínimo de gas fluyendo a través del compresor.

4.4 Clasificación de las desventajas del *surge* en compresores centrífugos

Se clasifican en:

4.4.1 Desventajas por pérdidas económicas

- El costo de reparación por el efecto de *Surge*, no controlado, es muy alto.
- Si el compresor es el único proveedor de gas para una unidad de planta, la pérdida por interrupción de las actividades comerciales puede ser mucho mayor que el costo de reparación, particularmente si uno de los reemplazos del rotor deben ser fabricados.
- Pérdidas de eficiencia por *Surge* en el compresor hasta de un 0.5 por ciento, en repetidos *Surge*, esta pérdida es considerable además de los daños internos.

4.4.2 Desventajas por daños mecánicos

- El oleaje que se produce dentro del compresor a alta velocidad, causa una vibración radial y desplazamiento axial dinámico.
- El recalentamiento de la masa de gas en cada ciclo de *Surge* provoca un gran aumento de temperatura en el sistema, causando daños mecánicos al equipo.
- Debido a que el periodo de *Surge* es más corto que el de lazo de control, muchos de los instrumentos son muy lentos para detectarlo.
- El rápido flujo y presión oscilatoria causan un proceso inestable.
- La rápida descarga del rotor durante el manejo de flujo puede causar exceso de velocidad del compresor.

- El incremento del ruido puede originar el colapso en los espacios vacíos de gas en el compresor.
- El oleaje provoca golpeteo en la válvula del compresor.

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

1. La eficiencia y confiabilidad del proceso de compresión dependen de la capacidad que tenga el usuario para la selección del compresor.
2. El *Surge* es un contraflujo peligroso porque causa daños al compresor y deficiencia en la compresión, este ocurre dentro de los compresores centrífugos y se presenta básicamente cuando existe bajo flujo de gas y alta relación de compresión.
3. Los sistemas de control anti-*Surge* son sistemas automatizados muy sofisticados que trabajan asociando todas las variables al mismo tiempo, tomando en cuenta parámetros como la presión, el volumen, velocidad y temperatura.
4. Los compresores centrífugos son más eficientes y confiables que los reciprocantes, pero más sensibles en cuanto al cambio a las propiedades del gas.

5.2 Recomendaciones

- Evitar la entrada de líquidos y partículas al compresor utilizando trampas o separadores, ya que esto es fatal para su funcionamiento.
- Deben realizarse revisiones periódicas por lo menos una (1) vez al mes sobre la calibración del equipo empleado en el sistema, ya que cualquier desperfecto en algunos de estos instrumentos podría causar un *Surge* en el compresor y ocasionar una situación de alto riesgo.
- Elegir un criterio de ingeniería adecuado con respecto a la capacidad, rango de operación o condiciones ambientales; para la óptima selección del compresor a utilizar que se adecue a los servicios requeridos.
- Mantener las normas de seguridad exigidas para la integridad de los trabajadores, ya que el *Surge* ha provocado accidentes graves.
- Crear historiales con antecedentes de datos de campo donde haya ocurrido el fenómeno de *Surge*, con el fin de, mediante su estudio y análisis, proponer medidas que permitan optimizar los sistemas de control presentes.

BIBLIOGRAFÍA

1. Pino Morales, Fernando. **“Proceso de Compresión y Expansión del Gas Natural”**. 2001.
2. PDVSA **“Selección del Tipo de Compresor”** Manual de Diseño de Proceso. 1996.
3. Engineering Data Book, **“Gas Processors Suppliers Association (GPSA)”**, Volumen I y II, Twelfth Edition. 2004.
4. GREEN W, Richard. **“Compresores: Selección, Uso y Mantenimiento”**. Mc.Graw-Hill. 1992.
5. VI Jornadas de Gas, **“Ponencias y Sesiones Técnicas”**. Caracas, mayo 1994.
6. Mc Millan, Gregory K. **“Centrifugal and Axial COMPRESOR CONTROL”**. 1983.
7. Forstnoffer, William E. **“Compressors: Forstnoffer’s Rotating Equipment Handbook”**. Vol 3, december 2005.

ANEXOS

Anexos a

Glosario

Aguas Abajo: Es la parte posterior a la planta.

Aguas Arriba: Es la parte anterior a la planta.

API: Instituto Americano del Petróleo (American Petroleum Institute).

Biela: Elemento mecánico que sometido a esfuerzos de tracción o compresión transmite el movimiento articulando a otras partes de la maquina.

Cigüeñal: Eje con codos y contrapesos presente en ciertas máquinas, que aplicando el principio del mecanismo de biela-manivela, transforma el movimiento rectilíneo alternativo en rotatorio; y viceversa.

Ciclo Brayton: Ciclo termodinámico de compresión, calentamiento y expansión de un fluido compresible, generalmente aire, que se emplea para producir trabajo neto y su posterior aprovechamiento como energía mecánica o eléctrica.

Craqueo Catalítico: Es un proceso de refinación del petróleo en el cual un catalizador en forma de microesferas craquea moléculas pesadas de hidrocarburos, cuyo punto de ebullición es igual o superior a los 315°C a hidrocarburos livianos de cadena corta cuyo punto de ebullición se encuentra por debajo de los 221°C.

Difusor: Dispositivo, generalmente una superficie (por ejemplo un revestimiento), que distribuye el sonido o la velocidad que incide sobre el mismo, en el espacio y en el tiempo.

FC: Controlador de flujo.

Flujo Volumétrico: Volumen de fluido que pasa por una sección en un tiempo determinado. Volumen de fluido por unidad de tiempo.

FT: Transmisor de flujo.

GNC: Gas natural comprimido.

GNV: Gas natural vehicular.

GOV: Mecanismo regulador.

Línea de Succión: Es aquella por donde entra el gas a un sitio.

Operación Normal: Es el funcionamiento del equipo dentro de las variaciones previstas, a las condiciones de operación y capacidad especificadas en la hoja de datos.

Polimerización: Proceso químico por el que los reactivos, monómeros (compuestos de bajo peso molecular) se agrupan químicamente entre sí, dando lugar a una molécula de gran peso llamada polímero.

PC: Controlador de presión.

Presión: Fuerza normal ejercida por la materia contenida en un sistema por unidad de área.

Presión de Descarga: Es la presión absoluta del gas en la salida del compresor.

Presión de Succión: Es la presión absoluta del gas en la entrada del compresor.

PT: Transmisor de presión.

Sellos Mecánicos: Impiden el escape de todos los tipos de fluidos, sean gases o líquidos, a lo largo de un eje o árbol rotatorio que se extiende a lo largo de una carcasa o una cubierta.

STV: Válvula reguladora de flujo en la succión.

SRV: Válvula de control de flujo de regulación continua, mandada eléctricamente.

Surge (oscilaciones): Es una condición de inestabilidad y de pulsaciones en la cual se invierte momentáneamente el flujo, y esto hace que el compresor pueda operar en forma incorrecta.

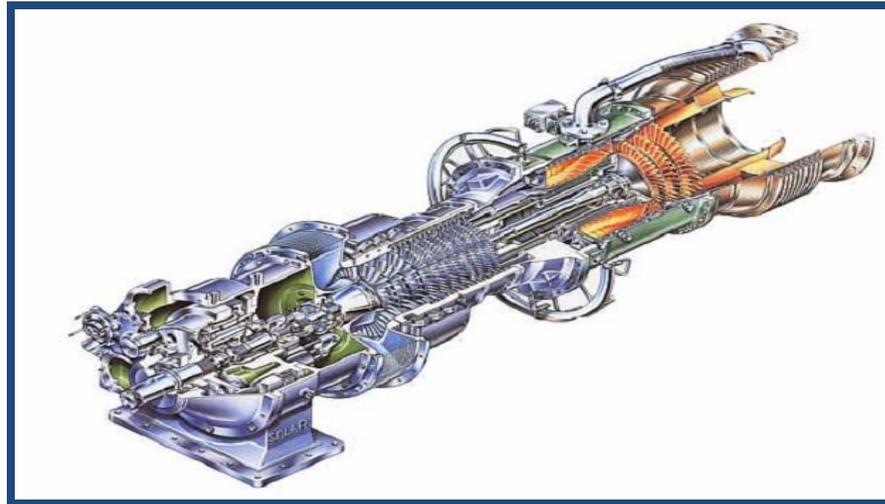
Turbina: Es el nombre genérico que se da a la mayoría de las turbomáquinas motoras. Éstas son máquinas de fluido, a través de las cuales pasa un fluido en forma continua y este entrega su energía través de un rodete con paletas o álabes.

Válvula: Pieza móvil que sirve para cerrar o interrumpir la comunicación entre dos partes de una maquina o aparato, con el fin de regular el paso de un fluido.

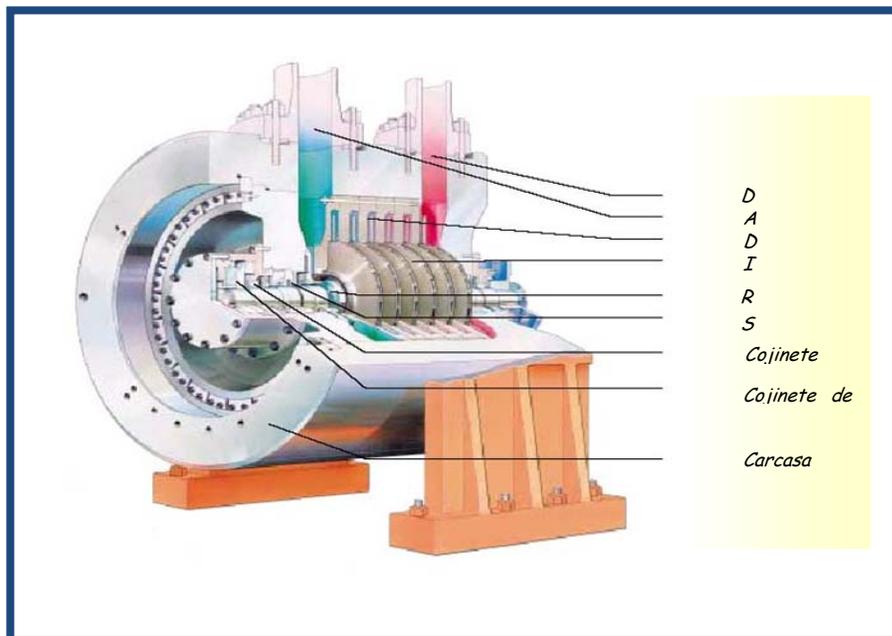
Válvula de Control: Dispositivo que se emplea para controlar la altura o nivel, el flujo, la temperatura o presión de un fluido durante un proceso. Al alcanzar algunos de estos parámetros, se acciona un mecanismo que abre una válvula para drenar, despresurizar o ventear dicho fluido.

Venturi: Elemento de medición de flujo.

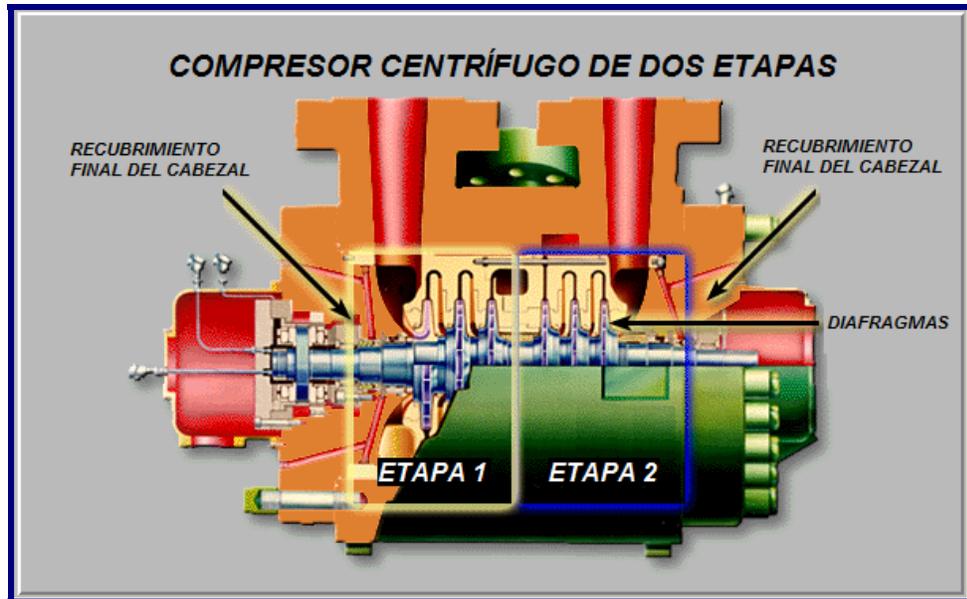
Anexos b



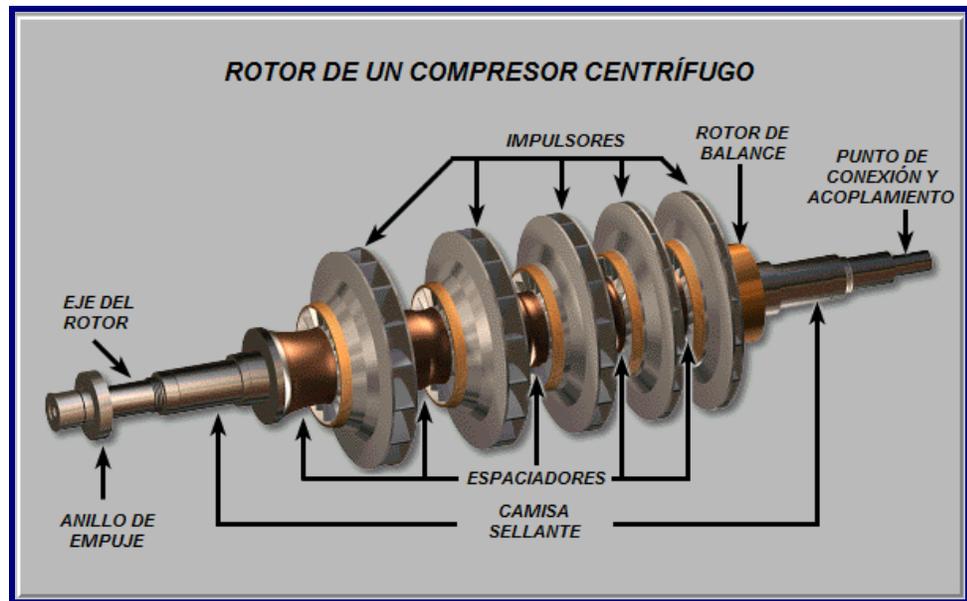
ANEXO B.1 Turbina a gás



ANEXO B.2 Partes de um compressor centrífugo



ANEXO B.3 Compresor centrífugo con dos (2) etapas de compresión.



ANEXO B.4 Rotor del compresor centrífugo.



ANEXOS B.5 Compresor centrífugo (PIGAP I MUSCAR)



ANEXO B.6 Compresor centrífugo (RECAT Anaco)

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y
ASCENSO:**

| | |
|------------------|---|
| TÍTULO | Estudio de los procesos de optimización del <i>fenómeno de surge</i> en compresores centrífugos |
| SUBTÍTULO | |

AUTOR (ES):

| APELLIDOS Y NOMBRES | CÓDIGO CULAC / E MAIL |
|---------------------------|--|
| Cedeño R., Yelitza A. | CVLAC: 13.778.659 E MAIL: yelaismar@hotmail.com |
| Martínez P., César A. | CVLAC: 15.715.141 E MAIL: maximilio_augusto@hotmail.com |
| Villarroel B., Armando L. | CVLAC: 13.657.154 E MAIL: armandovibor@hotmail.com |
| | CVLAC: E MAIL: |

PALÁBRAS O FRASES CLAVES:

Gás Natural_____

Compresión_____

Compresor Centrífugo_____

Oleaje_____

Surge_____

Fenómeno de Surge_____

Sistema de Control_____

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

| ÁREA | SUBÁREA |
|---------------------------------|------------------------|
| Ingeniería y ciencias aplicadas | Ingeniería de Petróleo |
| | Ingeniería Química |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |

RESUMEN (ABSTRACT):

En la industria del gas natural el gas debe ser sometido al proceso de compresión. Los compresores centrífugos son máquinas diseñadas para disminuir el volumen de un fluido gaseoso transformando su energía por medio de la fuerza centrífuga, estas máquinas pueden presentar diversos problemas operacionales siendo uno de ellos el oleaje del flujo o Surge. Por esta razón se estudiará un sistema de control donde parámetros como el volumen, presión y velocidad operan de manera conjunta con el fin de evitar la interrupción del proceso de compresión, pérdidas económicas, y en el peor de los casos accidentes laborales fatales debido al fenómeno de Surge.

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

CONTRIBUIDORES:

| APELLIDOS Y NOMBRES | ROL / CÓDIGO CVLAC / E_MAIL | | | | |
|-------------------------|-----------------------------|-----------------------|------|----|------|
| | ROL | CA | AS X | TU | JU |
| Avendaño P., Isvelia C. | CVLAC: | 8.024.255 | | | |
| | E_MAIL | Isvelia2009@gmail.com | | | |
| | E_MAIL | | | | |
| | E_MAIL | | | | |
| Francescci, Gustavo | ROL | CA | AS | TU | JU X |
| | CVLAC: | | | | |
| | E_MAIL | | | | |
| | E_MAIL | | | | |
| Viloria, Lisandro | ROL | CA | AS | TU | JU X |
| | CVLAC: | | | | |
| | E_MAIL | | | | |
| | E_MAIL | | | | |
| | ROL | CA | AS | TU | JU |
| | CVLAC: | | | | |
| | E_MAIL | | | | |
| | E_MAIL | | | | |

FECHA DE DISCUSIÓN Y APROBACIÓN:

| | | |
|------|-----|-----|
| 2009 | 10 | 13 |
| AÑO | MES | DÍA |

LENGUAJE. SPA

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

ARCHIVO (S):

| NOMBRE DE ARCHIVO | TIPO MIME |
|--|--------------------|
| Tesis.Estudiodelosprocesosdeoptimización.doc | Application/msword |
| | |
| | |

CARACTERES EN LOS NOMBRES DE LOS ARCHIVOS: A B C D E F G H I J K L M
N O P Q R S T U V W X Y Z . a b c d e f g h i j k l m n o p q r s t u v w x y z . 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 .

ALCANCE

ESPACIAL: _____ (OPCIONAL)

TEMPORAL: _____ (OPCIONAL)

TÍTULO O GRADO ASOCIADO CON EL TRABAJO:

Ingeniería de Petróleo / Ingeniería Química

NIVEL ASOCIADO CON EL TRABAJO:

Pregrado_____

ÁREA DE ESTUDIO:

Departamento de Petróleo / Departamento de Química

INSTITUCIÓN:

Universidad de Oriente_____

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

DERECHOS

De acuerdo al articulo 44 del reglamento de trabajos de grado_____

“Los Trabajos de grado son exclusiva propiedad de la Universidad de Oriente y solo
podrán ser utilizadas a otros fines con el consentimiento del consejo de núcleo
respectivo, quien lo participara al consejo universitario”_____

AUTOR

AUTOR

AUTOR

TUTOR

JURADO

JURADO

POR LA SUBCOMISION DE TESIS