

INTRODUCCIÓN A LAS MÁQUINAS TÉRMICAS

Estabilidad en Compresores

Dr. Miguel ASUAJE
Octubre 2009

Estabilidad en Compresores

El desarrollo de la TAG en la industria aérea, ha sido promotor directo en la evolución de los compresores (o vice-versa?)

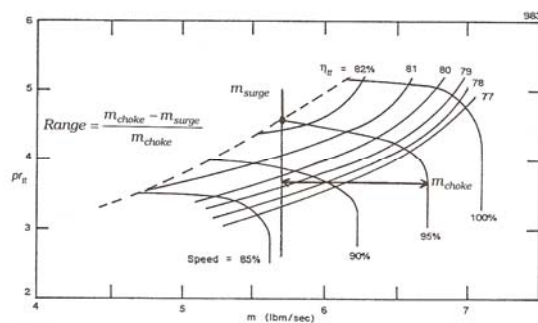


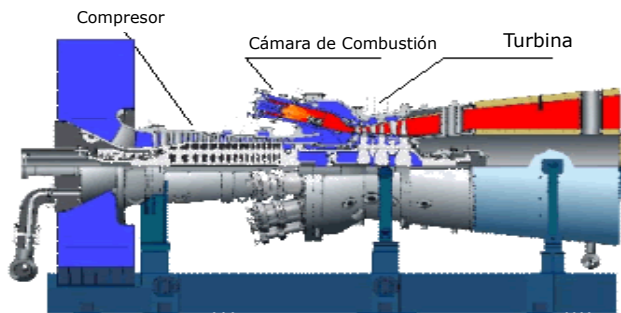
Figure 1.9. Stage map—moderate range, intermediate pressure ratio.

¿Cómo podemos establecer el Rango de Operación?



Estabilidad en Compresores

En TAG el rango de operación estable, es determinado por la estrecha relación existente entre la Turbina y el Compresor. Para turbo propulsores, las características de la tobera también afecta el comportamiento del equipo



Matching!
La relación
flujo/trabajo de
la Turbina y/o
tobera es
determinante

Estabilidad en Compresores

¿Los Límites
para una cierta
velocidad de
giro?

Choke o Estrangulamiento:

Cálculo directo del número de Mach, para cada una de las etapas

Stall, Desprendimiento o Separación:

Cálculo menos manejable (Efectos transitorios). La dificultad radica en los efectos dinámicos de desprendimiento (Stall). Es posible tener desprendimiento en varios elementos de una etapa o en la etapa completa

Surge o Bombeo:

Cálculo menos manejable (Efectos transitorios). Para compresores subsónicos y ligeramente sónicos, existen cantidades de correlaciones que pueden ser consideradas aceptables. del número de Mach, para cada una de las etapas

Fenómeno de Choke "Estrangulación"

El punto de estrangulación es el máximo caudal que admite la maquina a una cierta velocidad de giro.

El fenómenos de estrangulación se da cuando en la mínima sección de paso del gas este alcanza la velocidad del sonido, produciendo tantas perdidas que se convierte en el punto máximo de caudal.

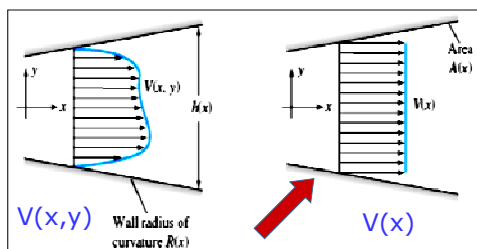
Este fenómeno no afecta la vida del compresor sin embargo limita el campo de operación del mismo.

Estrangulamiento o Choke

Al combinar la ecuación de continuidad con las ecuaciones de flujo adiabático, se pueden estudiar los problemas de flujo compresible.

Aproximación Flujo Unidimensional

$$\frac{dh}{dx} \ll 1 \quad h(x) \ll R(x)$$



Ecuación de Continuidad

$$\rho(x)V(x)A(x) = \dot{m} = const$$

En su forma diferencial:

$$\frac{d\rho}{\rho} + \frac{dV}{V} + \frac{dA}{A} = 0$$

Ecuación de Momentum

$$\frac{dp}{\rho} + VdV = 0$$

Velocidad del sonido

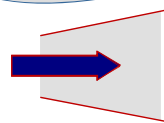
$$dp = a^2 d\rho$$

Estrangulamiento

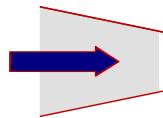
Relacionando la variación de la velocidad con el cambio de área en un ducto isentrópico se tiene:

$$\frac{dV}{V} = \frac{dA}{A} \frac{1}{Ma^2 - 1} = - \frac{dp}{\rho V^2}$$

Esta ecuación revela que para flujo compresible los cambios de las propiedades son opuestos dependiendo si el flujo es sónico o subsónico



	Subsónico	Supersónico
dA>0	Ma<1	Ma>1
	dV<0	dV>0
	dp>0	dp<0



	Subsónico	Supersónico
dA<0	Ma<1	Ma>1
	dV>0	dV<0
	dp<0	dp>0

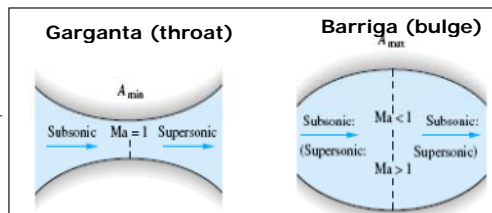
Mach=1

Despejando el número de mach de las ecuaciones anteriores:

$$Ma^2 = \frac{dA}{A} \frac{V}{dV} + 1$$

Como la aceleración infinita es físicamente imposible, Ma=1 se obtiene cuando dA=0:

Puede acelerar el flujo desde subsónico, a sónico y luego supersónico



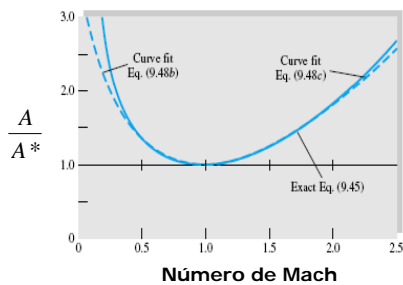
Falla. Ma se aleja de la condición sónica en vez de acercarse a ella

Relación de Área vs. Ma

Utilizando las ecuaciones de gas ideal y las relaciones de flujo isentrópico se puede llegar a una relación algebraica del área y el número de Mach:

$$\text{(*) Condiciones sónicas} \rightarrow \frac{A}{A^*} = \frac{1}{Ma} \frac{(1 + 0.2Ma^2)^3}{1.728}$$

(Para k=1.4)



Esta curva es útil para el diseño de ductos:

- El **área mínima** que puede tener el ducto es el área sónica o crítica.
- El **flujo máximo** que pasa por un ducto es cuando su garganta está en la condición crítica o sónica. **CHOKE**

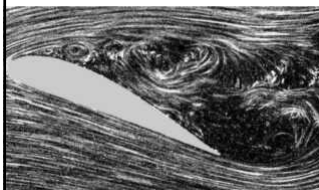
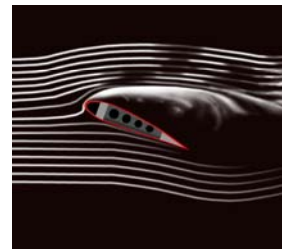
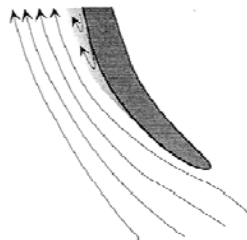
$$\frac{A}{A^*} = \frac{\rho^* V^*}{\rho V}$$

$$\dot{m}_{\max} = \rho^* A^* V^*$$

SURGE AND STALL

Donde haya un proceso de difusión de un flujo sobre una superficie física, existe la posibilidad de que el flujo se detenga tan severamente que no puede seguir más la superficie

Desprendimiento del Flujo

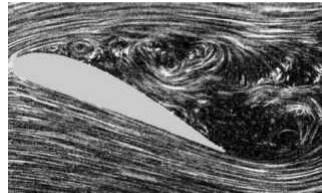


Cuando los efectos viscosos del roce y los gradientes de presión adversos son suficientes para reducir el fluido a una velocidad cero, éste es desviado de la superficie, y se dice que el flujo se ha **desprendido o Stalled**

SURGE AND STALL

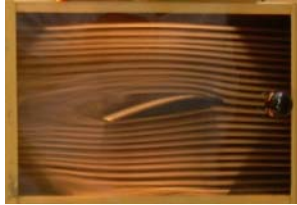
Etapa en Stall

Etapa que tiene un fuerte stall si en uno de sus elementos, o un conjunto de elementos se desprende el flujo de tal manera que la relación de presión con respecto a las características del flujo no son estables. Fluctuaciones de flujo másico y presión pueden ocurrir. Puede haber Ruido



Surge

Fenómeno violento audible y catastrófico en el cual un compresor interactúa de una manera inestable con el sistema para dar una fluctuación de flujo con una reversión completa del mismo a través de la etapa de una manera cíclica



La Línea de Bombeo

i.e: La aceleración de la Turbina Dependen de la característica del compresor de la ubicación de la línea de bombeo

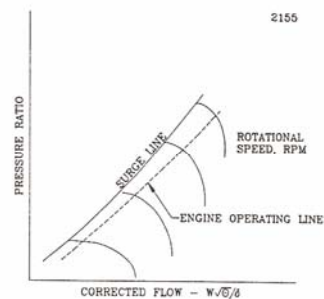


Figure 1.1. Engine Operating Line Superimposed on Compressor Map

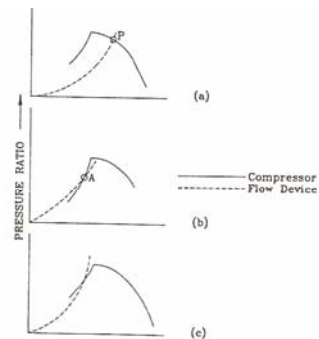


Figure 1.2. Matching Characteristics between Compressor and Downstream Flow Device

Desprendimiento y Bombeo

☛ Stall:

- ☛ Es posible tener desprendimiento en uno o varios puntos de un compresor (o bomba) sin que toda la etapa lo experimente
- ☛ Generalmente va acompañado por ruido
- ☛ Para toda la etapa en Stall, la curva característica de la bomba o compresor es inestable (pendiente positiva)
- ☛ Fluctuaciones aleatorias de presión y flujo pueden ocurrir
- ☛ Un efecto de desprendimiento rotativo puede ser posible. Operación que origina problemas de vibraciones

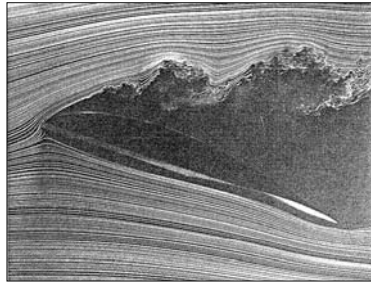
Desprendimiento y Bombeo

☛ Surge:

- ☛ Cuando el compresor (o bomba) es operado a bajos flujos máxicos para una velocidad de giro determinada
- ☛ Grandes fluctuaciones en las condiciones de descarga y entrada al rotor son experimentadas
- ☛ Su aparición es precedida por el desprendimiento

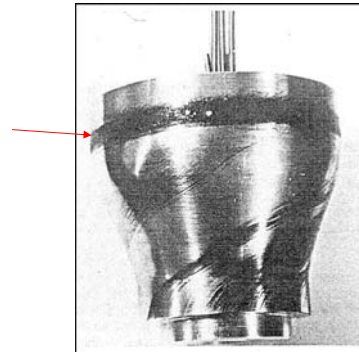
Tipos de Stall Estático para Compresores y Bombas

Desprendimiento Bidimensional



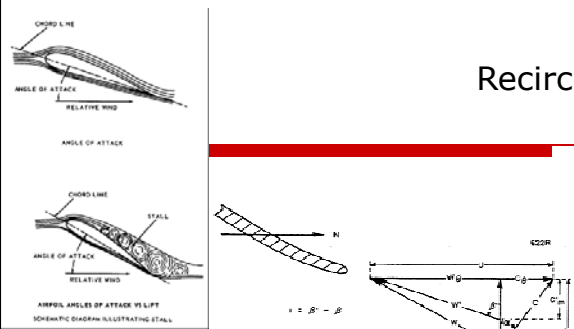
Álabe de avión

Desprendimiento Tridimensional

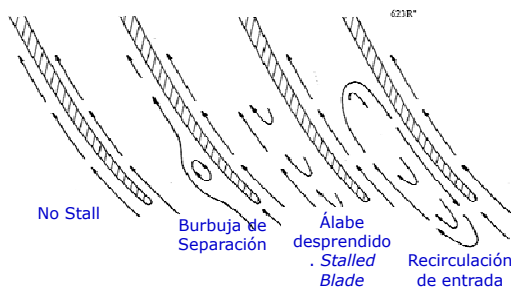


Desprendimiento 3D sobre una pared de un difusor bajo la influencia de una corriente de flujo rotando a 45°.

Recirculación y Stall en la Entrada del Álabe



Triángulo de velocidad inductor

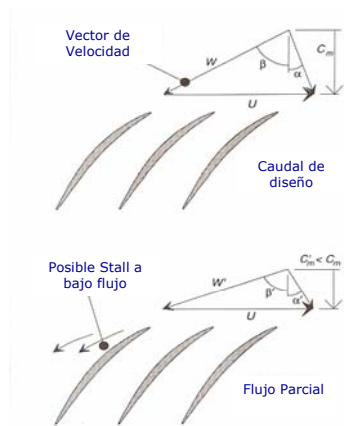


Si el flujo másico se reduce a rpm constantes, β_1 aumenta, y también la incidencia i .

El flujo es acelerado localmente más y más alrededor de la línea guía. El perfil de flujo sufre una difusión consecuente para traer a la línea de corriente de la superficie altamente acelerada a un balance con las líneas de corrientes que no fueron aceleradas tanto.

A incidencias suficientemente altas, las fuertes redifusiones consecuentes separarán eventualmente al flujo de la superficie, creando una condición de stall

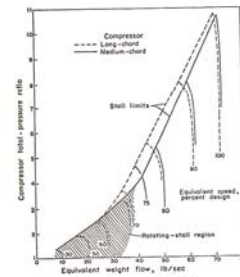
Difusión y Stall. Efecto de la incidencia



$$i = \alpha_{1\text{ fluido}} - \alpha_{1\text{ alabe}} = \alpha_1 - \alpha_1'$$

Bajo estas condiciones de incidencia positiva (flujo parcial), se promueve la separación del flujo deteriorando el desempeño del compresor rápidamente

Incidencia y Stall a flujo o caudales parciales



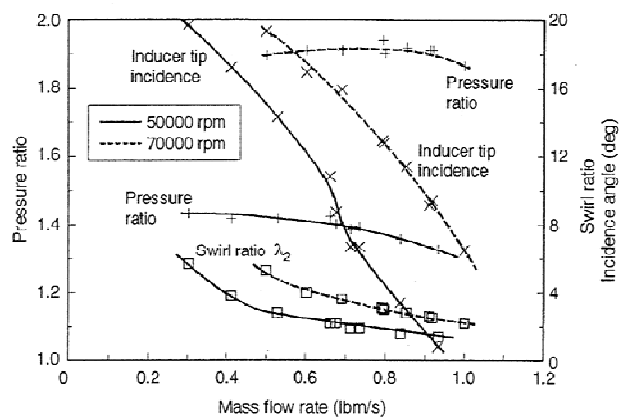
(Data originally in Sievers et al. 1958)
Figure 1.17. Typical multistage axial characteristics permission of ASME.

Recirculación y Stall en la Entrada del Álabes

El Stall no necesariamente lleva al Surge

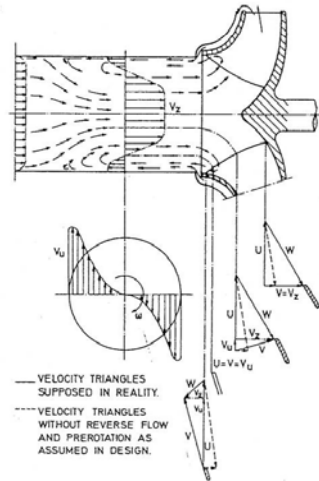
A altas relaciones de presión, stall en la entrada puede generar Surge

A bajas presiones puede haber stall en la entrada pero operar en condiciones estables



Puede ser monitoreado con la presión estática y la temperatura en la punta

Stall de Entrada y Flujo Reverso, Especialmente en Bombas



También ocurre en compresores, pero es particularmente "especial" en la operación de bombas

Afecta considerablemente las condiciones a la entrada

Stall de Entrada y Recirculación (Flujo Reverso), Especialmente en Bombas

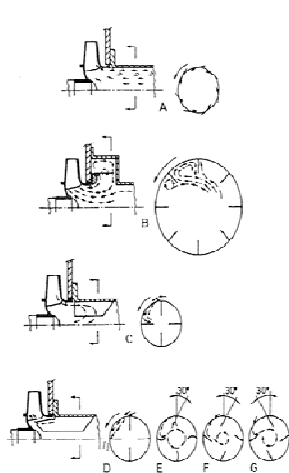


Figure 9.7a. Inlet guide vane systems for a centrifugal pump (Breugelmans and Sen 1982).

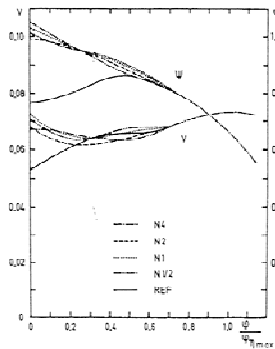
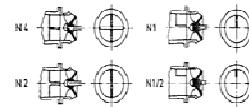
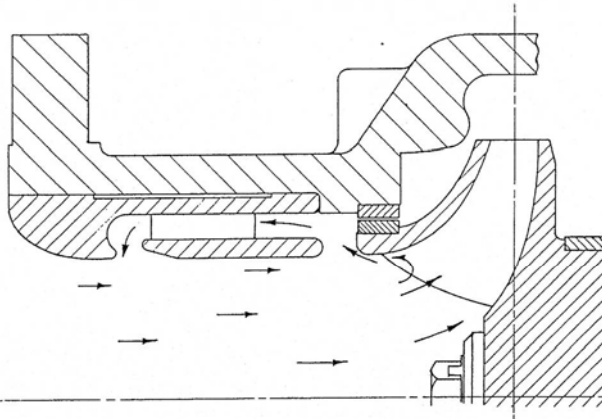


Figure 9.7b. Inlet guide vane systems for a mixed flow pump (Breugelmans and Sen 1982).

Stall de Entrada y Flujo Reverso, Especialmente en Bombas

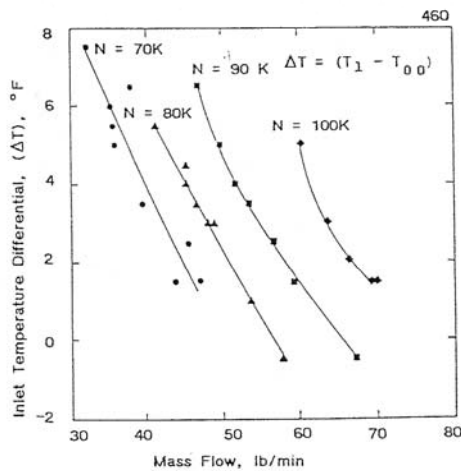


Control de la recirculación en la entrada de la bomba

Dispositivo que remueve los vórtices del flujo, y lo reintroduce a al flujo principal de una manera ordenada. Reduce las vibraciones sustancialmente.

Sloteman, 1984

Stall de Entrada y Recirculación en Turbocompresores

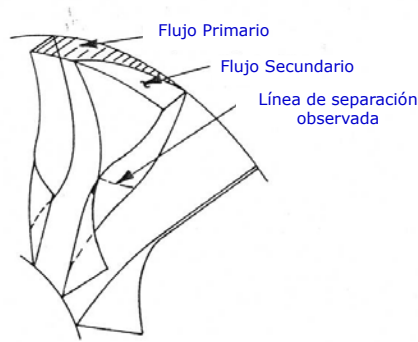


Incremento de la temperatura, relativa al ambiente, debido a la recirculación de la entrada

A medida que el flujo se reduce por debajo de mayor eficiencia, se muestra un gran incremento en la temperatura, reflejando recirculación del flujo. Se evidencia que gran cantidad de flujo másico está involucrado debido a que el incremento es bastante alto. A menores velocidades que las mostradas la T aumenta hasta 45°F.

¿Cuánto es 45°F?

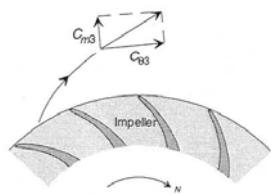
Stall en un Impulsor Radial



3D Stall es común en la mayoría de los impulsores y representa un gran porcentaje del flujo.

Cuando el flujo cambia de dirección axial a radial, éste experimenta fuertes fuerzas de **Coriolis**. Esto produce gradientes de presiones a través del paso que es función de la velocidad del flujo más que de su densidad. Las fuerzas de Coriolis actúan de manera diferente en las diferentes líneas de corriente. Las de altas velocidades tienden a separarse de las de bajas velocidades. Las lentas forman un bajo momentum que puede producir separación. Aunque no se produzca separación bidimensional, separación tridimensional todavía puede ocurrir en el paso del álabe.

Stall y Recirculación en Difusores Radiales sin Venas



$$rC_\theta = \text{constant}$$

$$\rho C_m (2\pi r b) = m$$

$$\tan \alpha = \frac{C_\theta}{C_m} = \frac{\text{constant}/r}{m/(2\pi r b)} = \text{constant} \times b/r$$

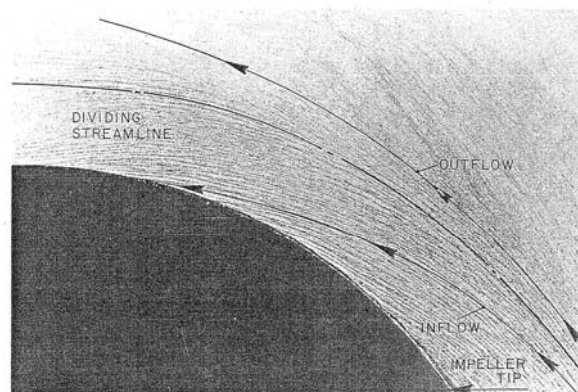


Figure 9.12. Vaneless diffuser inlet, shroud side, showing backflow (or inflow).

Stall y Recirculación en Difusores Radiales sin Venas

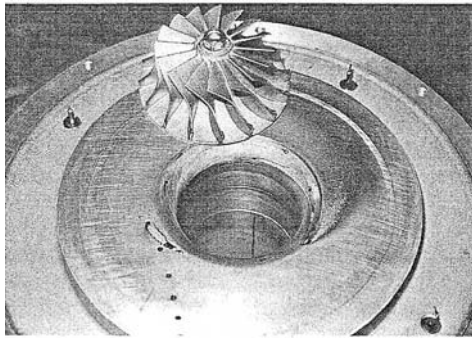
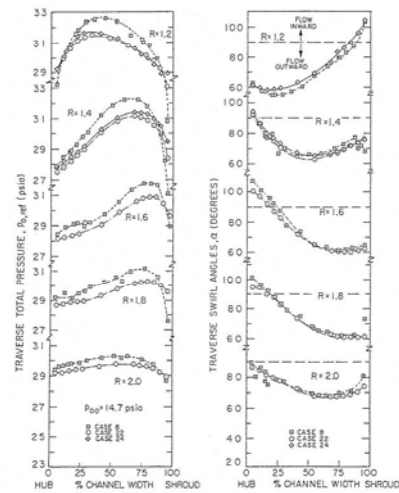
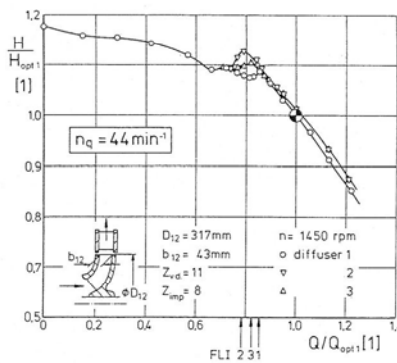


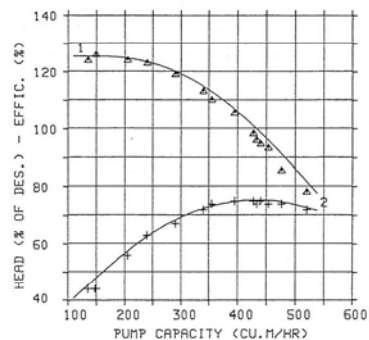
Ilustración de una burbuja de separación (anillo claro) en un difusor sin venas



Stall y Recirculación en Difusores Radiales sin Venas



Influencia de las tolerancias de manufactura en las curvas de operación.



Operación predicha y medida de una bomba de alta velocidad

Stall de Difusores sin Venas y de Semivenas para Configuraciones de Difusores de Canales Radiales

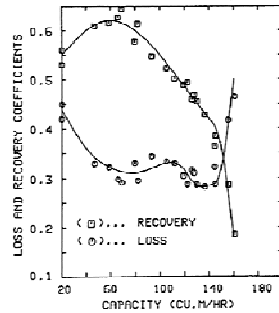


Figure 9.17 (above). Diffuser experimental pressure coefficients (Benvenuti and Ross 1986).

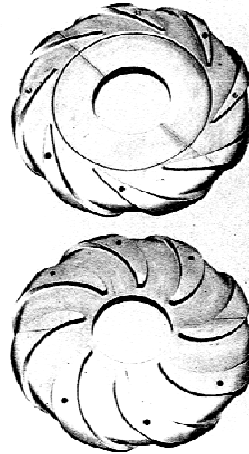
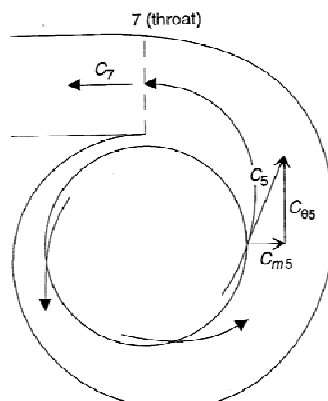


Figure 9.18 (right). Integral vaned diffuser and return channel assembly (upper view: front side; lower view: return channel) (Benvenuti and Ross 1986).

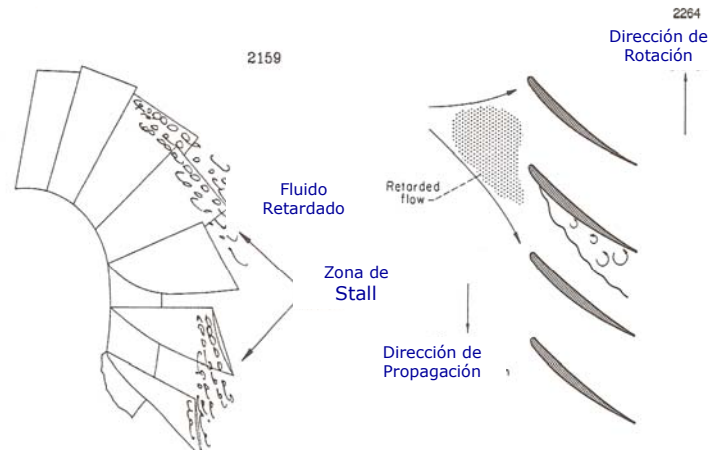
Stall en Volutas



Flujo en una Voluta

Along a speed line:
 high flow: $C_{95} < C_7$ (acceleration)
 low flow: $C_{95} > C_7$ (diffusion)

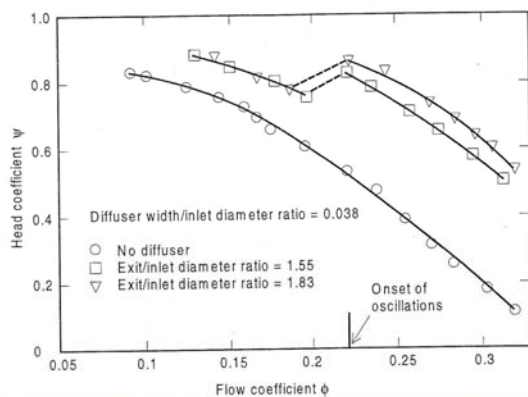
Stall Rotativo



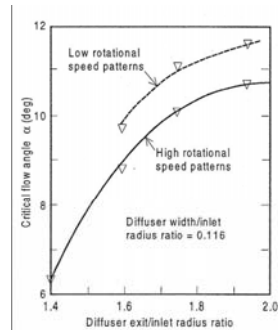
Es un fenómeno mucho más complicado de ver en detalles

Stall Rotativo en Compresores Axiales y Centrífugos

Stall Dinámico: Básicamente estudiado en máquinas axiales y difusores de compresores centrífugos



Efectos de la geometría del difusor en la operación del sistema y límites de estabilidad



Variación del ángulo de flujo crítico en la entrada del difusor con la relación de radio del difusor

Stall en la Etapa

Muchas veces se observan hasta 5 regiones con desprendimiento sin que la estabilidad de la máquina se vea afectada

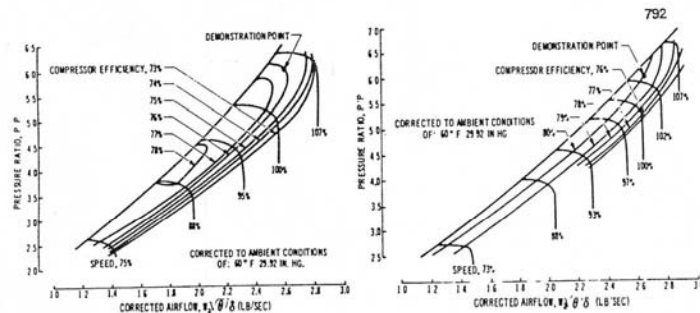


Figure 9.26. Sample compressor maps showing $\partial pr/\partial m|_N = 0$ at surge (Dean and Young 1976, courtesy of Creare Inc.).

Límite de operación aparece cuando la pendiente de la curva se hace cero

Estabilidad Surge y Stall

Introducción:

La estabilidad esta directamente relacionada con capacidad que tiene el sistema de mantenerse invariante luego de una perturbación. Las perturbaciones en un compresor un el cambio de punto de operación de la maquina, el surge es una condición de inestabilidad que debemos evitar.

En el compresor encontraremos dos areas que tienen que ver con estabilidad, la primera es la estabilidad operacional y se relaciona con la mezcla de parámetros de desempeño entre el compresor y la turbina; y la estabilidad aerodinámica que se relaciona con la limitación de estado estable debido al surge.

Dado una velocidad de rotación el flujo máximo es determinado por el Choke en algún elemento del compresor y el flujo mínimo por la aparición del surge. El surge es precedido por el Stall, el Stall tiene que ver con respecto a la reducción del aumento de sustentación o del aumento de presión en la rejilla. En el compresor un elemento de la rejilla o la rejilla completa puede estar en Stall, sin embargo el sistema puede continuar estable. Luego el Surge es el resultado del Stall en algún componente del compresor que reduzca el flujo másico, conlleve a un estado inestable y consecuentemente a fluctuaciones de flujo axial.

Estabilidad Surge y Stall

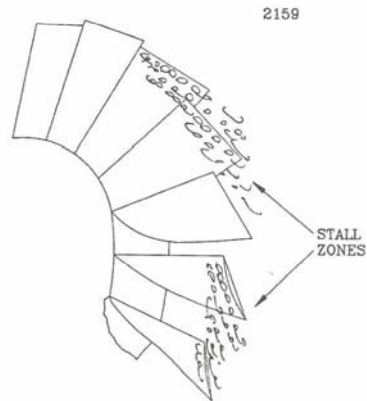


Figure 2.3. Illustration of Rotating Stall on an Axial Compressor Rotor

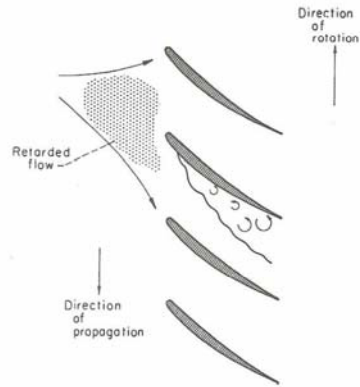


Figure 2.4. Propagating Stall in a Cascade Taken from Graham and Guentert (1965) Also shown in Emmons, et al. (1955)

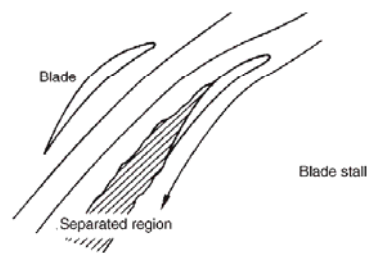
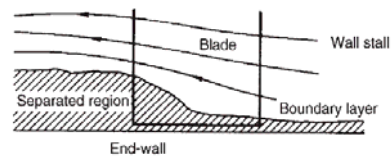
Stall y Surge

Se puede decir que el Surge y el Stall están totalmente ligados a la estabilidad de el funcionamiento del compresor. Sin embargo predecir el Surge es difícil, y esta dificultad reposa en el hecho del comportamiento transiente del flujo.

Stall:

A finales de los 60' se descubrió que a bajos factores de flujo y con un tratamiento especia en la carcasa se podía obtener una operación libre de Stall.

Graitzel (1979) observó que existen dos tipos de Stall, Stall en el álabe y Stall en la pared. En la imagen mostrada se puede ver que el Stall en el álabe se genera en la superficie de succión produciendo una larga estela, y el Stall en la pares se genera en la superficie de la carcasa.

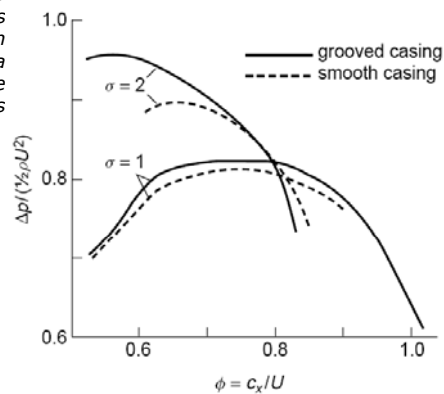


Stall y Surge

Graitzel (1979) estudió los compresores para diferentes tipos de relaciones cuerda/paso σ (solidez), y con carcasa con estriado y sin estriado, en el que la capa límite le cuesta desprenderse. El siguiente gráfico muestra como dependen las pérdidas de σ .

- $\sigma = 2$ \longrightarrow Stall en la pared
- $\sigma = 1$ \longrightarrow Stall en el álabe

La mayor conclusión a la que se llegó es que con una rejilla que posee tendencias a producir desprendimiento en la pared, el efecto de una carcasa con estriado o sin estriado es mayor.



35

Stall y Surge

Surge:

Una característica importante de el mapa de desempeño de un compresor, es el límite de estabilidad de operación o límite de Surge. Este límite es precedido por el Stall y se alcanza luego de que el Stall se vuelve inestable y reduce extremadamente el flujo. Este fenómeno es una condición inestable en la que se produce una oscilación axial del flujo.

Cuando un compresor entra en Surge las consecuencias son dramáticas, se genera un fuerte ruido y vibración. Las vibraciones de baja frecuencia están asociadas a la frecuencia natural del flujo, y la vibración de alta frecuencia son debidas al Stall rotativo y posee una magnitud igual a la rotación de la máquina.

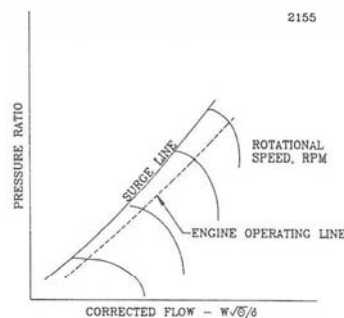
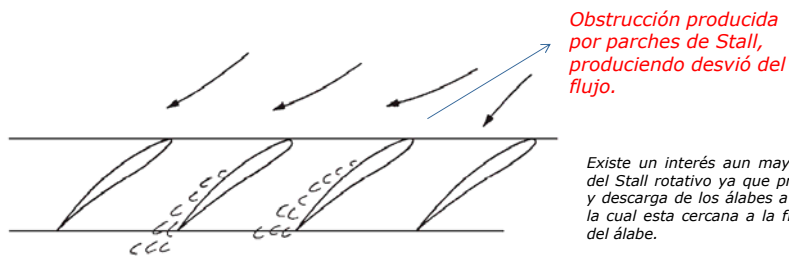


Figure 1.1. Engine Operating Line Superimposed on Compressor Map

Operación de un compresor, límites de estabilidad (Surge line)

Stall y Surge

El stall rotativo es un fenómeno que ocurre en los compresores axiales, ha sido objeto de muchos estudios e investigaciones, y aun se desconoce su naturaleza. Este fenómeno se produce cuando nos encontramos con el punto de Stall en el álabe, formando parches de desprendimiento, estos viajan a través de la pared de la carcasa rotando. Luego estos parches en la rejilla producen una pequeña obstrucción lo cual desvía el flujo, modificando la incidencia de los álabes vecinos lo que ocasiona a su vez mas desprendimiento. El desprendimiento es trasladado al álabe anterior debido a que aumenta la incidencia, y el álabe siguiente permanece sin desprendimiento debido a que en él se reduce la incidencia, este efecto produce que el parche de Stall gire a una velocidad del 90% de la velocidad del álabe.



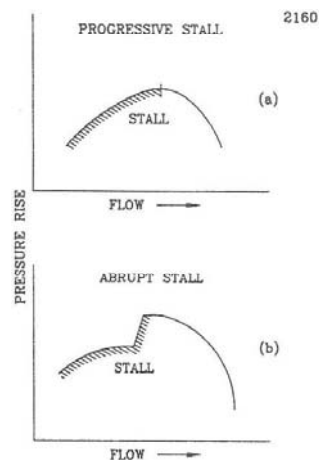
37

Stall y Surge

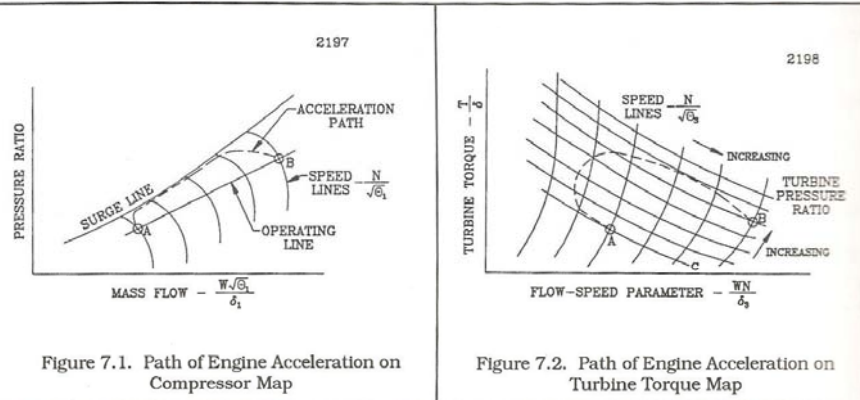
Existe cierta falta de uniformidad en la aparición de el Stall, apareciendo parches únicos o múltiples, los estudios muestran que la relación de altura/cuerda influye en la aparición de parches únicos o múltiples. Para relaciones de altura/cuerda grandes el álabe es propenso a formar parches de Stall únicos, y para relaciones pequeñas es propenso a formar parches de Stall múltiples.

Hay dos tipos de Stall, uno es progresivo en el que la relación de presión se reduce gradualmente y el otro es abrupto en el que existe una reducción escalonada de relación de presión cuando se entra en Stall.

El Stall abrupto se debe a la aparición de parches únicos y el Stall progresivo a la aparición de parches múltiples.



Control del Stall y Surge



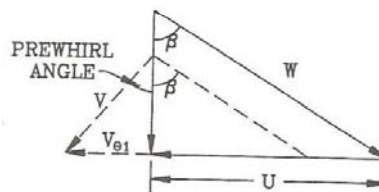
Control del Stall y Surge

Álabes directrices en la entrada (Variable IGV'S):

El sistema de sangrado no es el único que sirve para cambiar la línea de límite de Surge. El sistema de álabes directrices en la entrada, permite reducir el ángulo de incidencia en le que el surge ocurre, hacia un mas bajo flujo másico.

En la operación de motores aeronáuticos este sistema es utilizado para aumentar o disminuir la potencia del motor. Al inducir una prerotación positiva la transferencia de energía se reduce y alejamos la línea de Surge, pero al inducir una prerotación negativa se aumenta la transferencia de energía y nos acercamos a la línea de Surge.

En la figura se puede ver como se mantiene el ángulo relativo en la entrada, mientras que inducimos una prerotación positiva de flujo en la entrada reduciendo el flujo másico, esto significa que el ángulo de Stall ocurrirá a un menor valor de flujo másico.

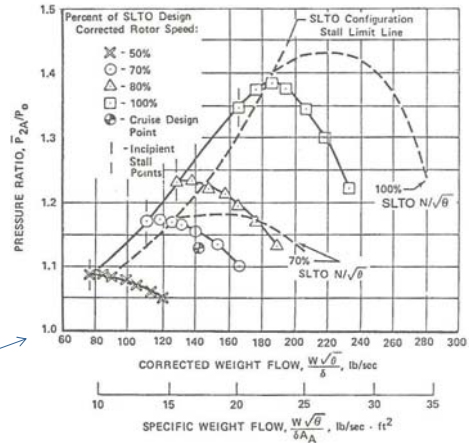


Control del Stall y Surge

Este sistema es utilizado en compresores axiales cuando se esta prendiendo el motor, para requerimientos de turbinas en aviones, para vuelos supersónicos y optimización por etapa de un compresor multietapas.

Lo mas importante de este sistema permite una mas rápida aceleración del motor en el encendido alejando la línea de límite de Surge y aumentando la eficiencia en el rango de mapa de operación.

En la figura podemos observar un ejemplo del desplazamiento de la línea de límite de Surge en una Turbina de aviación a utilizar el sistema de VIGV's



Control del Stall y Surge

La estabilidad de la máquina puede ser alcanzada con diferentes métodos y dispositivos mecánicos. Durante operaciones transitorias como el arranque de una turbina suele utilizarse sistemas de sangrado o geometría variable para evitar el Surge o el Stall cuando se encuentra por debajo del 70% de la velocidad. Existen también dispositivos estáticos que sirven para cambiar la línea del límite de Surge.

Sistemas de Sangrado:

Desde los primeros días de el motor Jet la técnica de sangrado se ha utilizado comúnmente para evitar entrar en surge en la etapa de prendido o aceleración de la turbina.

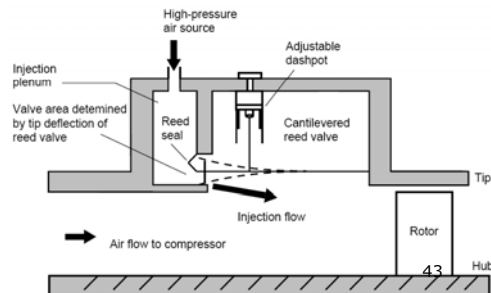
Para acelerar rápidamente el motor requerimos grandes temperaturas en la entrada de la turbina, lo que nos acerca a la línea del surge en el compresor. Para poder acelerar rápidamente y evitar el Surge es necesario utilizar sistemas de sangrado

Control del Stall y Surge

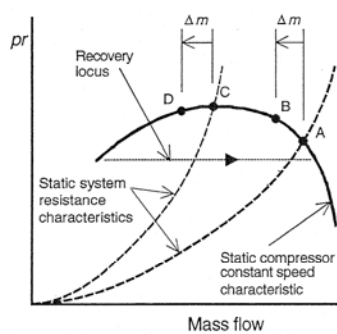
Importantes avances en el control de Stall y Surge se han logrado recientemente. Ambos fenómenos dependen de la naturaleza del flujo y la estabilidad del compresor dependerá de la estabilidad de las ondas producidas por estos fenómenos.

Epstein (1989) al comienzo sugirió que para evitar el Surge y el Stall rotativo se podía lograr por medio de un feedback para amortiguar las oscilaciones hidrodinámicas. Paduano (1993) aplicó este sistema de suspensión activa en un compresor axial y obtuvo un 25% de aumento de estabilidad en las oscilaciones del compresor.

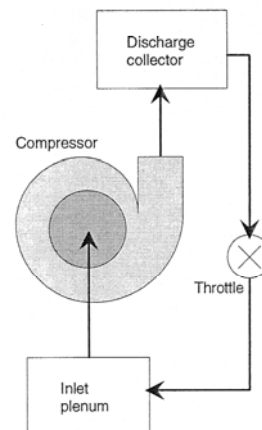
Gysling and Greitzel (1995) emplearon una técnica diferente que en la que utilizaron un feedback aeromecánico para suprimir en Stall rotativo. Un conjunto de válvulas modeladas como un sistema masa resorte actúan para regular la cantidad de flujo a alta presión es inyectado en el compresor. Este sistema es alimentado del flujo a alta presión aguas arriba. Este sistema permite una reducción del 10% del flujo en Stall.



Bombeo Periódico (System Surge)



Estabilidad y Surge para una red de compresores



El Surge

Se define como las "auto oscilaciones de la presión y el flujo, que frecuentemente incluyen una reversión de flujo"

El flujo invierte su dirección en 20 a 50 milisegundos.

Los ciclos de surge se producen a razón de 0.3 a 3 segundos por ciclo.

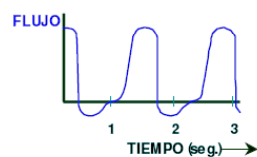
El compresor vibra.

La temperatura aumenta.

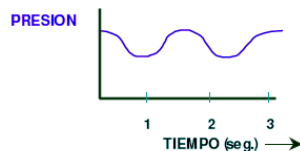
Se producen ruidos "molestos" en el compresor. Pueden ocurrir disparos del compresor.

Tanto los instrumentos convencionales como los Operadores pueden fallar en reconocer el surge.

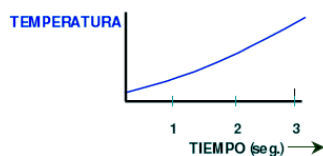
Principales parámetros de proceso durante el surge



Oscilaciones rápidas de flujo.
Reversión de empuje.
Daños potenciales.



Oscilaciones rápidas de presión
con inestabilidad en el proceso.



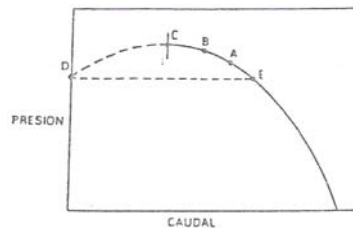
Aumento de la temperatura
dentro del compresor.
Afecta Sistemas de enfriamiento y
Lubricación.

Fenómeno de "Surge" (bombeo)

Supongamos un compresor que opera a una velocidad fija y se encuentra en el punto A. Si reducimos el caudal hasta un punto B, cerrando una válvula en la tubería de descarga, se mantiene aun con un comportamiento estable, ya que la presión en el compresor es mayor en B que en A y puede vencer la resistencia.

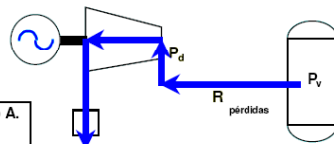
En el punto C cualquier reducción del caudal produce mayor presión en la salida que en el compresor, lo que a su vez implica un cambio de dirección del caudal, lo que lleva a un caudal de operación cero (punto D), con lo cual la tubería de salida se alivia y reduce su presión.

El gas vuelve circular hacia la salida con un caudal E correspondiente a la presión D. pero este caudal es excesivo para la tubería de salida aumentando así la presión en la misma llevando el sistema de nuevo al punto C y todo el ciclo de oscilación se repite.

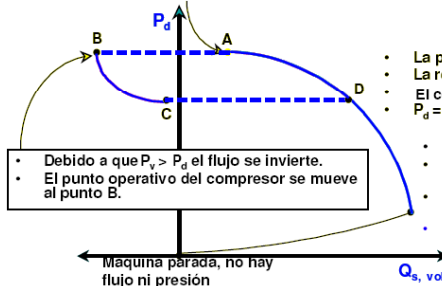


Desarrollo del ciclo de surge en la curva del compresor (1)

- El compresor alcanza el surge en el punto A.
- El compresor pierde su capacidad para ejercer presión.
- Repentinamente P_d cae y así $P_v > P_d$
- El compresor cae en surge.



P_d = Presión de descarga del compresor
 P_v = Presión del recipiente.
 $R_{pérdidas}$ = Pérdidas por resistencia de la tubería



- Debido a que $P_v > P_d$ el flujo se invierte.
- El punto operativo del compresor se mueve al punto B.

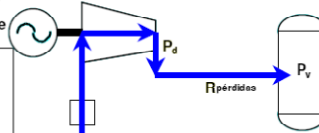
- La presión se eleva.
- La resistencia sube.
- El compresor "recorre" la curva
- $P_d = P_v + R_{pérdidas}$
- El motor eléctrico arranca
- La máquina acelera hacia la velocidad nominal.
- El compresor alcanza la curva de desempeño
- Nota: El flujo sube más rápido porque la presión es la integral del flujo.

Maquina parada, no hay flujo ni presión

Desarrollo del ciclo de surge en la curva del compresor (2)

- De A a B 20 - 50 ms Cae en surge
- De C a D 20 - 120 ms Sale de surge
- A-B-C-D 0.3 a 3 seg. Ciclo de surge

- El compresor empieza a desarrollar presión
- El compresor recorre por la curva, hacia surge.
- Se alcanza el punto A.
- Se completa el ciclo de surge.



P_d = Presión de descarga del compresor.
 P_v = Presión del recipiente.
 $R_{pérdidas}$ = Pérdidas por resistencia de la tubería

- El resultado de la reversión de flujo hace que la presión baje
- La presión baja \Rightarrow flujo menos negativo
- El punto operativo va hacia el punto C.

Máquina parada, no hay flujo ni presión

- La presión del sistema va bajando
- El compresor nuevamente es capaz de superar P_v
- El compresor salta de regreso a la curva de desempeño, y va al punto D.
- Se restablece el flujo positivo.

El ciclo de Bombeo

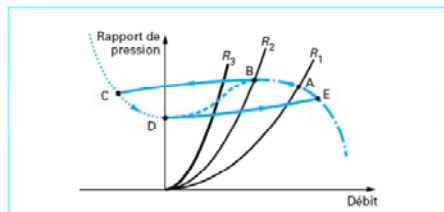


Figure 19 - Cycle de pompage sur la caractéristique du compresseur

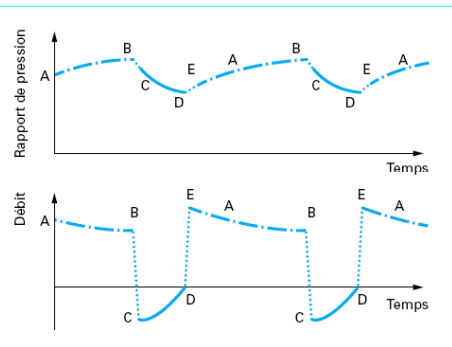


Figure 20 - Cycle de pompage. Oscillations de relaxation

Problemas debidos al "Surge"

Un compresor entra en "Surge" cuando pierde su capacidad de desarrollar la presión existente en la descarga y el fluido retorna hacia el sistema de entrada. Esta condición puede ocasionar daños mecánicos al sistema que generalmente se encuentran asociadas a la acción de dos mecanismos o a la combinación de estos.

Sobre temperatura

Mientras ocurre el bombeo el gas recirculante seguirá presentando incrementos de temperatura debido al proceso de compresión. de mantenerse mucho tiempo este proceso el gas podría llegar a calentarse hasta alcanzar temperaturas capaces de dañar los sellos y algunos elementos constitutivos del sistema

Inversión de Dirección

Al invertirse cíclicamente la dirección del flujo también lo hace el empuje axial. Si esta recirculación es muy violenta y rápida pueden producir cambios súbitos en la dirección del empuje axial capaz de destruir el cojinete.

Algunas consecuencias del surge

Flujo y presión inestables

Deterioro continuo, con severidad creciente en los sellos, cojinetes, impulsores, eje, entre otros

Aumento de la tolerancia en los sellos, ocasionando fugas

Disminuye la eficiencia en el consumo de energía

Reduce la vida útil del compresor

Factores que conducen al inicio de surge

El arranque.

El paro.

Operación con baja productividad.

Operación con alta productividad que incluya:

- Disparos
- Errores de los operadores
- Cambios de carga
- Problemas en el enfriador
- Problemas en el impulsor
- Pérdida de potencia
- Desordenes en el proceso
- Cambios en la composición del gas
- Problemas en el filtro o strainer

El surge no está restringido a los momentos de baja productividad. El surge puede ocurrir a operación completa.

Inicio del Surge en Sistemas de Compresión

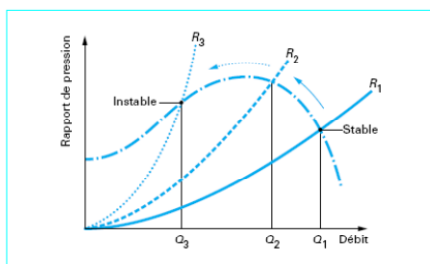


Figure 13 - Déclenchement du pompage sur un réseau résistif

Sistema Resistivo

Sistema Contrapresión Fija

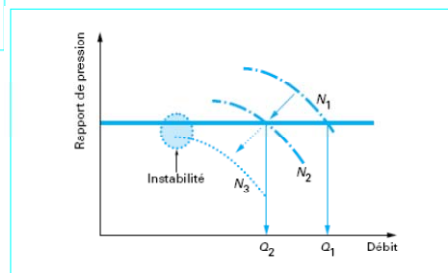


Figure 14 - Déclenchement du pompage sur un réseau capacitif

Factores que conducen al inicio de surge. Compresores Multietapas

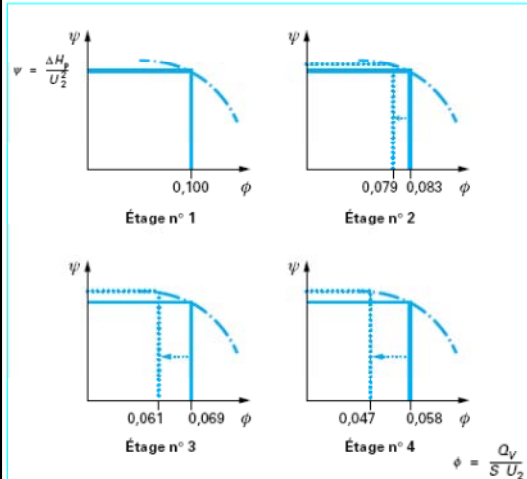


Figure 15 - Points de fonctionnement de chaque étage d'un compresseur multiétagé

1. Las etapas no necesariamente tienen el mismo rango de operación
2. La etapa más propensa entra en bombeo, el compresor completo entra en bombeo
3. Generalmente, la etapa más propensa es una etapa de los extremos

Ejm: Aumento de Masa Molar
Bombeo última etapa.
Disminución - Primera

Efecto similar:
al modificar Z o γ
Compresores Atmosféricos T_1

Factores que conducen al inicio de surge. Compresores en Paralelo

Dos compresores que aspiran y descargan en las mismas líneas.

$$Q = Q_1 + Q_2 = 2Q_1$$

Si por aumentar la producción se aumenta la velocidad de giro del segundo compresor

Presión se incrementa:

$$p + \Delta p$$

Con el Caudal:

$$Q + \Delta Q = Q_3 + Q_4$$

La segunda Máquina:

$$Q_4 = Q_2 + \Delta Q + (Q_1 - Q_3)$$

La primera Máquina se aprox. al bombeo

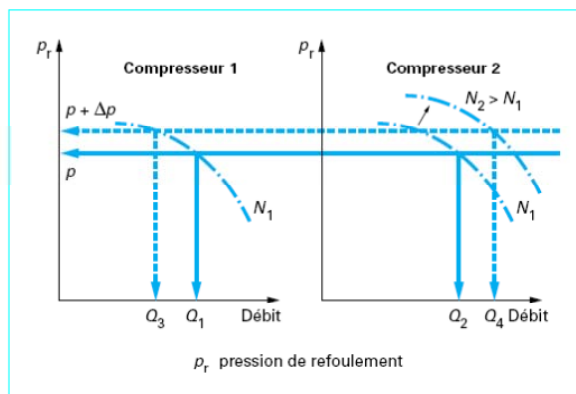
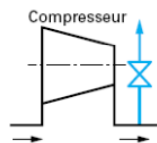


Figure 16 - Fonctionnement de compresseurs en parallèle

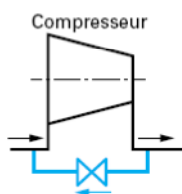
Sistema Anti-Surge

- Los sistemas de protección contra el bombeo, en el caso de reducción de caudal y en consecuencia un aumento de la presión, tienen por objetivo:
 - Aumentar el caudal de forma "ficticia"
 - Disminuir la relación de presión

Control de Bombeo "Antisurge"



(a) décharge à l'atmosphère



(b) by-pass chaud

El tipo de arreglo de la figura a, es solo utilizado en turbinas a gas (Bleed vanes)

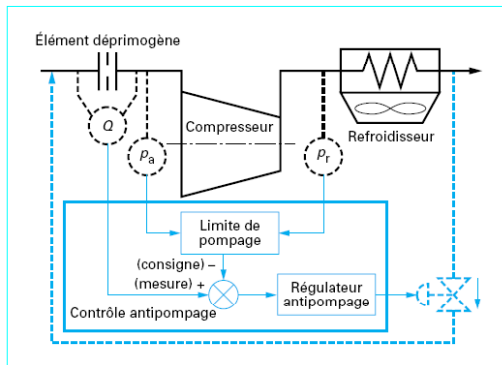
La figura b, Se llama bypass caliente y solo puede operar poco tiempo

Cuando se esta variando la condición , en arranque por ejemplo, la velocidad de rotación es menor sin experimentar un cambio en la condición de entrada.

La primera etapa comprime menos y el flujo volumétrico aumenta para la segunda, y así sucesivamente.

Por esto las ultimas etapas se bloquean alcanzado su condición de choke o estrangulamiento. Como el flujo aspirado no puede aumentar, el flujo de las primeras etapas se reduce hasta alcanzar el surge. La válvula de sangrado, envía parte del aire a la atmosfera entre dos etapas seleccionadas, lo que aumenta el caudal que pasa por las primeras etapas

Control de Bombeo "Antisurge"



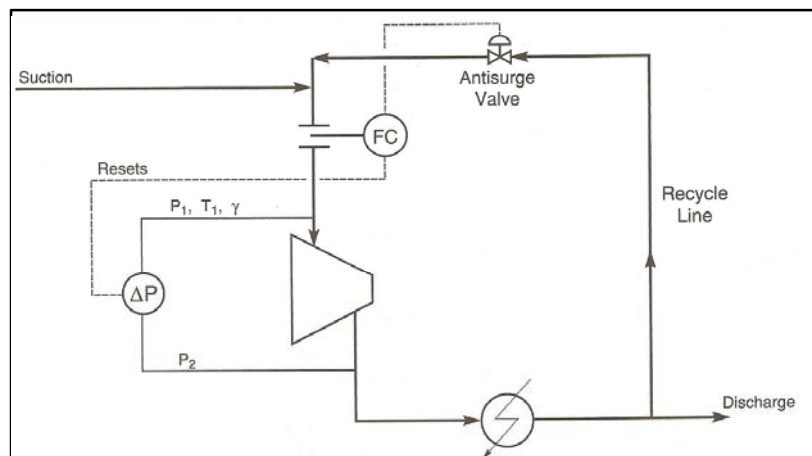
El enfriador funciona en operación normal

Figure 30 - Protection antipompage par système asservi

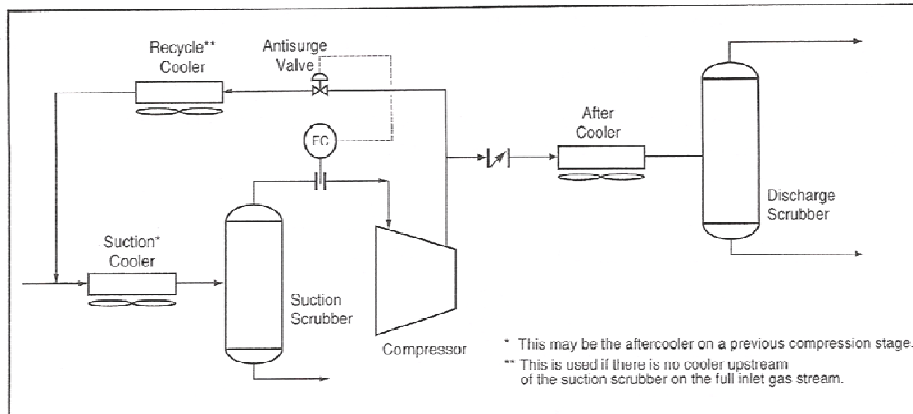
El sistema debe ser de respuesta rápida.

Cuidado con las medidas de caudales y el ruido asociado a ellas. Por lo tanto es necesario prever un filtro donde la constante de tiempo (de décimas de segundos) Sean tomadas en cuenta en el cálculo del servicio

Control de Bombeo "Antisurge"

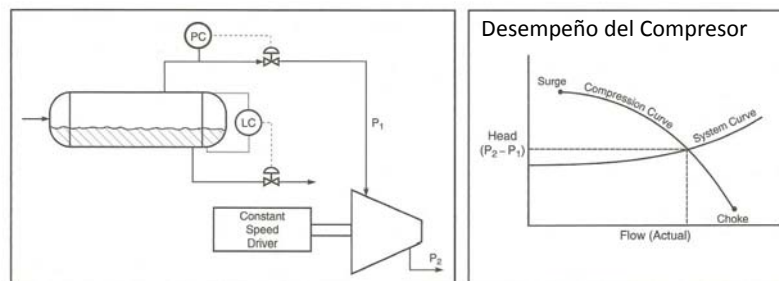


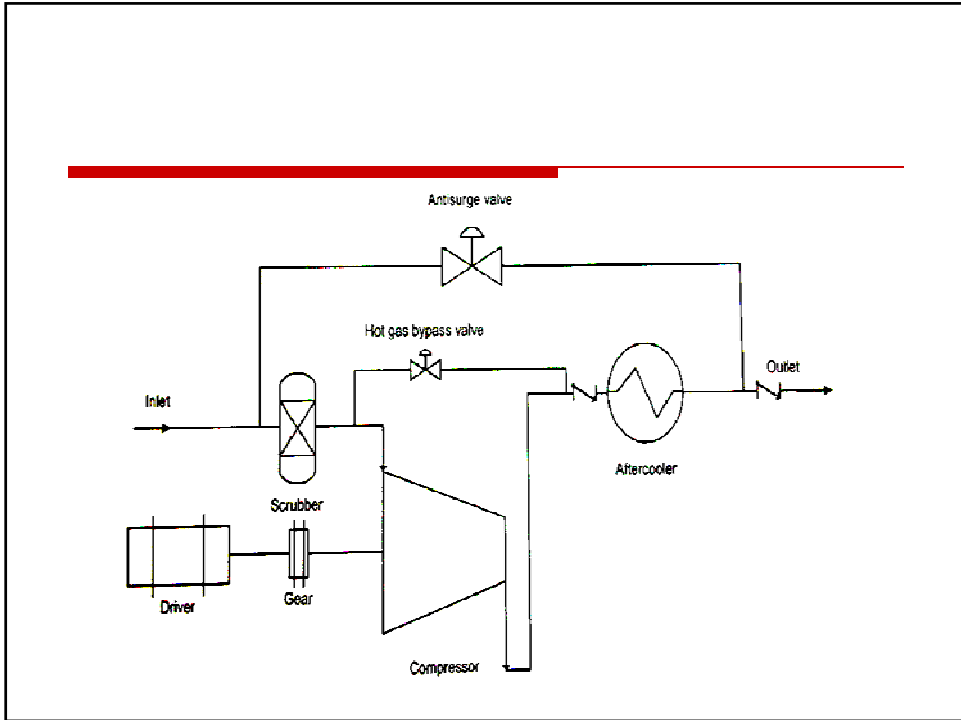
Control de Bombeo "Antisurge"



Control de Compresores Centrífugos

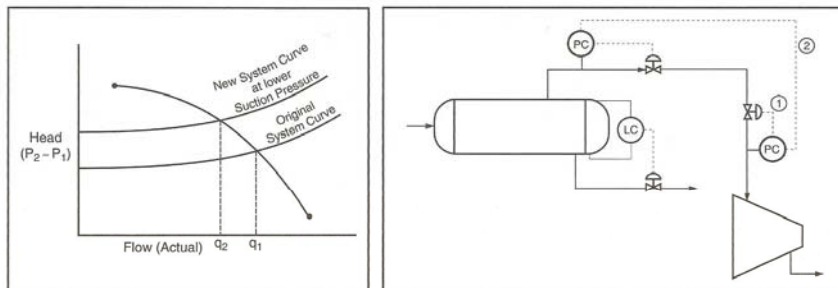
Esquema de control para compresores centrífugos de velocidad constante





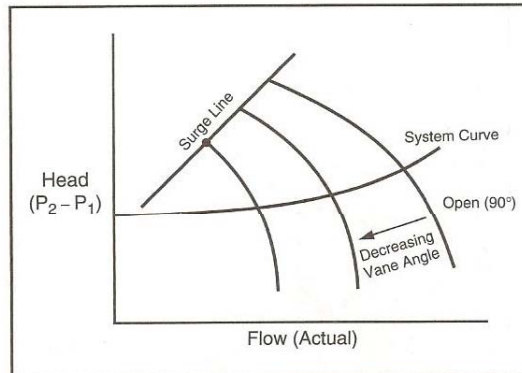
Control de Compresores Centrífugos

Curva de desempeño para compresores centrífugos de velocidad constante (Sistema de control adicional para prevenir sobrecarga)



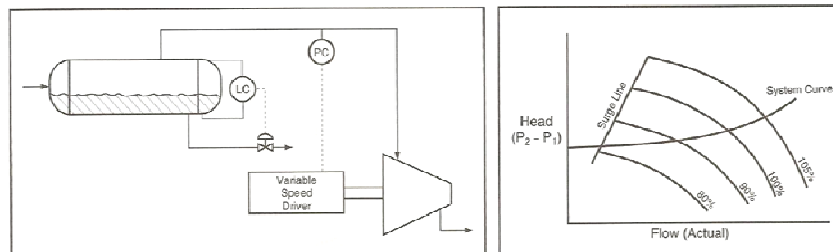
Control de Compresores Centrífugos

Efecto de venas guías a la entrada de compresores en la curva de desempeño



Control de Compresores Centrífugos

Esquema de control para compresores centrífugos de velocidad variable



Regímenes Transitorios. Influencia del Proceso

Si las redes de gas aguas arriba y aguas abajo son de gran capacidad, las presiones variarían muy lentamente y los dispositivos antibombeo corren el riesgo de no ser lo suficientemente rápidos en caso de regímenes transitorios.

En estos casos es necesario instalar una o varias válvulas antiretorno aislando una parte del circuito.

Se instalan después del enfriador de manera a que la relación de presión en ese circuito y en consecuencia el flujo disminuyan rápidamente con la apertura de la válvula de recirculación

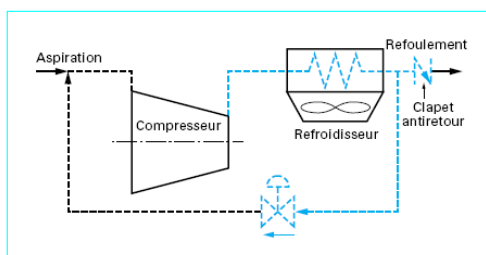


Figure 31 – Limitation de volume du circuit par clapet antiretour

Regímenes Transitorios. Necesidad de rapidez del sistema

Diámetro de la Válvula:

La válvula de recirculación debe tener un diámetro tal que pueda retornar rápidamente el caudal necesario a la recirculación. Entre 200 -250mm o más

Longitud de la Tubería:

Al abrir la válvula se emite o produce una onda de choque. Hay que esperar la llegada de esta onda para ver su efecto en el compresor. Por esto la válvula no debe estar ubicada en el medio de la tubería.

Ejm:

Para un gas de refrigeración una válvula a 50 m de distancia, tarda aproximadamente 25s en llegar.

Ejemplo de Estrategia Anti bombeo

Se necesita rapidez, pero los elementos del Sistema no ayudan o mejor dicho no tienen esa habilidad.

Operación Normal:
Sobre presión en la Válvula. (mejor sellado y disminuye el uso)

- 1.- Se libera sobre presión.
- 2.- Línea antibombeo
- 3.- Para caídas de caudal muy rápidas (se pasa la línea 2)
- 4.- Se regresa el caudal a esta línea para que para accionar la protección normal
- 5.- Línea de Surge

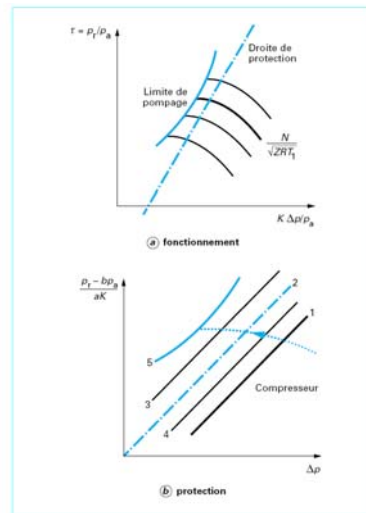


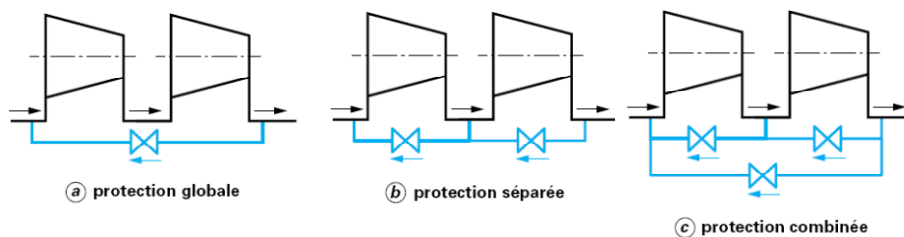
Figure 32 - Stratégie de commande d'antipompage

Tips

La parada de un compresor, accionado por motor eléctrico, ocurre entre 6 y 8 Seg.

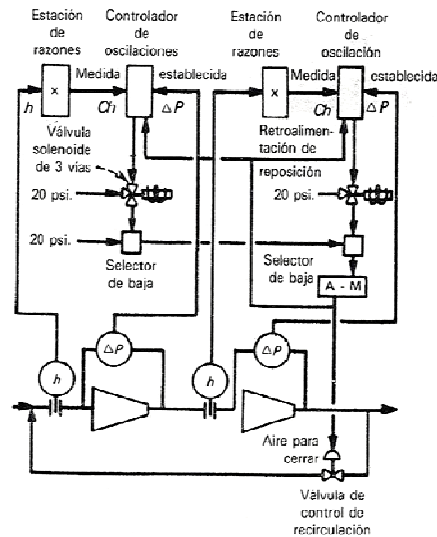
Al contrario de las bombas centrífugas, las cuales se pueden arrancar a válvula cerrada, los compresores se arrancan con la recirculación abierta. Esto debe ser considerado en la selección del motor.

Varios trenes de compresión



Control en Compresores

Compresores en Serie



Control en Compresores

Compresores en Paralelo

