



CONGRESO DE
MANTENIMIENTO
& CONFIABILIDAD
M É X I C O

14
EDICIÓN



“Aplica inmediatamente...”
¡Logra un cambio rápido y potente!



PASOS PARA MEJORAR LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN TURBOCOMPRESORES DE GAS

Enrique J. González Henríquez

Director de Desarrollo de Negocios
E&M Solutions, S.A. de C.V.
enrique.gonzalez@eymsolutions.com

OBJETIVOS

GAS COMO ENERGÍA EN MÉXICO

POR QUE PIERDEN EFICIENCIA LAS TURBINAS Y LOS COMPRESORES

ISO 50001 – SISTEMAS DE GESTION DE ENERGÍA (SGEn)

POR QUE PIERDEN EFICIENCIA LOS COMPRESORES

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

PREPARACIÓN Y EJECUCIÓN DE LAS PRUEBAS

MIRANDO AL FUTURO

REPARAR O SEGUIR OPERANDO

EXPERIENCIAS

ACCIONES PM, PdM Y DE DISEÑO

CONCLUSIONES

CONTENIDO

OBJETIVOS

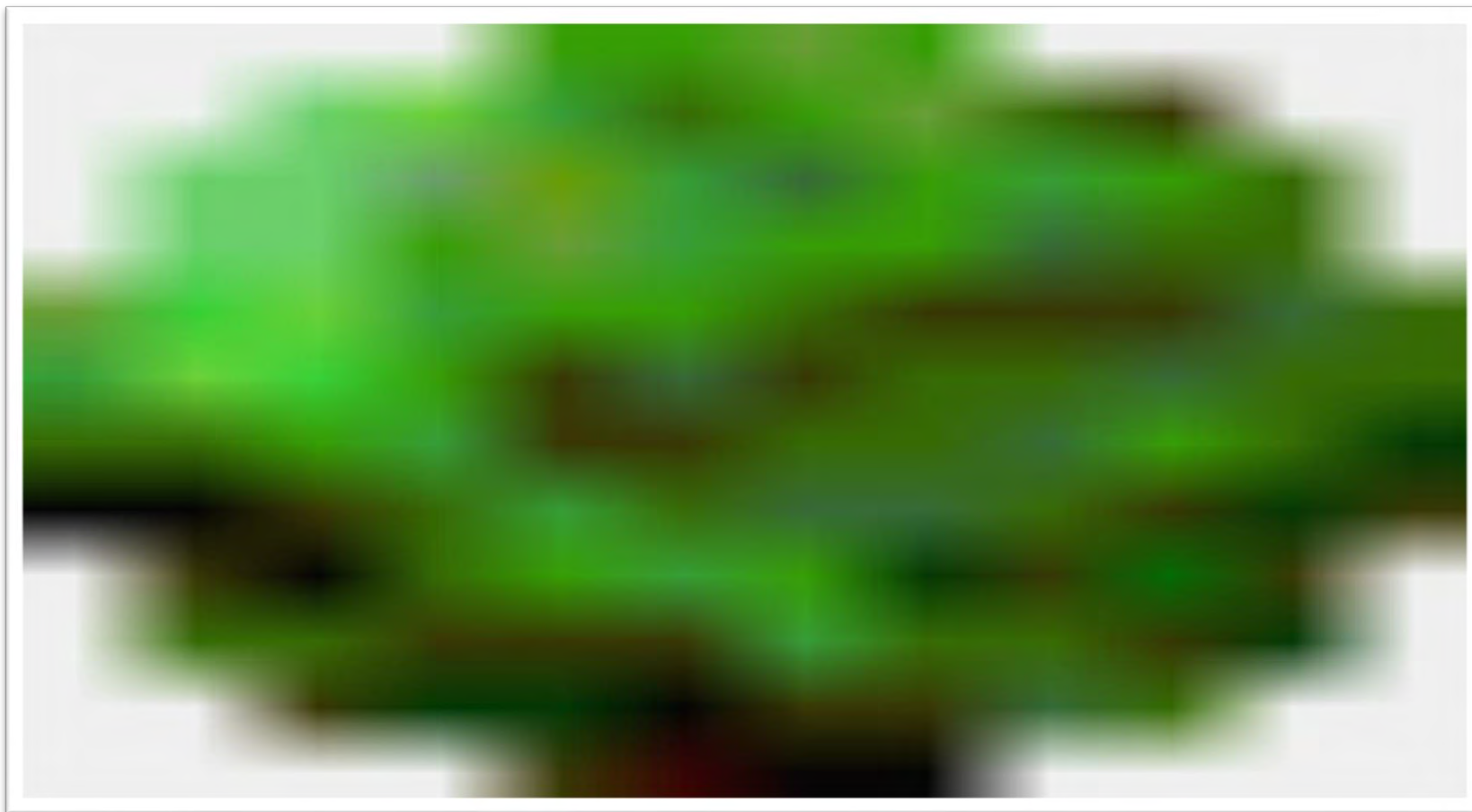
OBJETIVOS

- ❏ Dar a conocer las **bases teóricas, requerimientos y procedimientos** para la ejecución exitosa de pruebas de eficiencia en campo de *Turbo Compresores Centrífugos*, como herramienta clave de la Gestión y la Mejora de la Eficiencia Energética.
- ❏ **Compartir experiencias** obtenidas en la aplicación de esta herramienta, parte integral del mantenimiento predictivo.
- ❏ Enmarcar los requerimientos de la norma **ISO 50001** Sistemas de gestión de la energía.

GAS COMO ENERGÍA

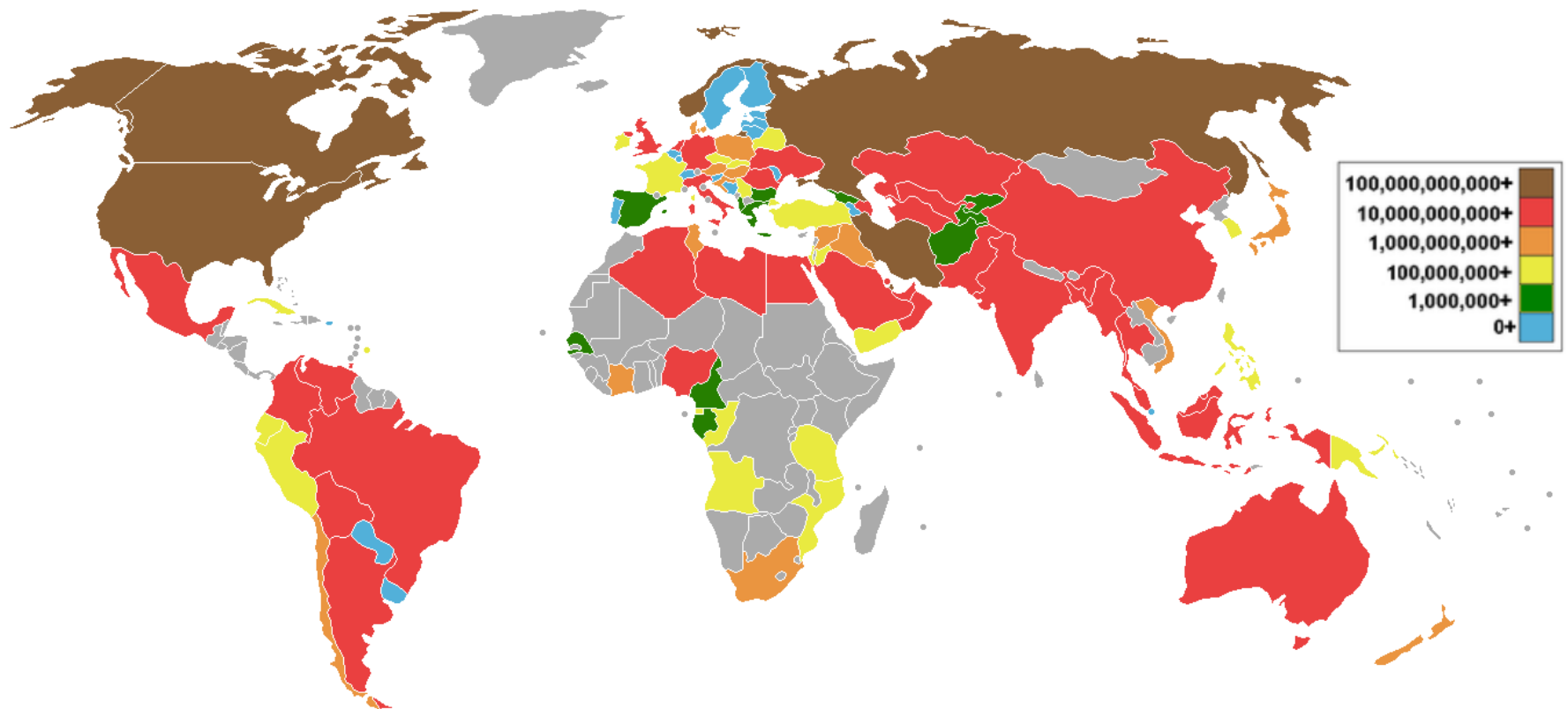
En México

Histórico y Proyección de Consumo de Energía en el Mundo



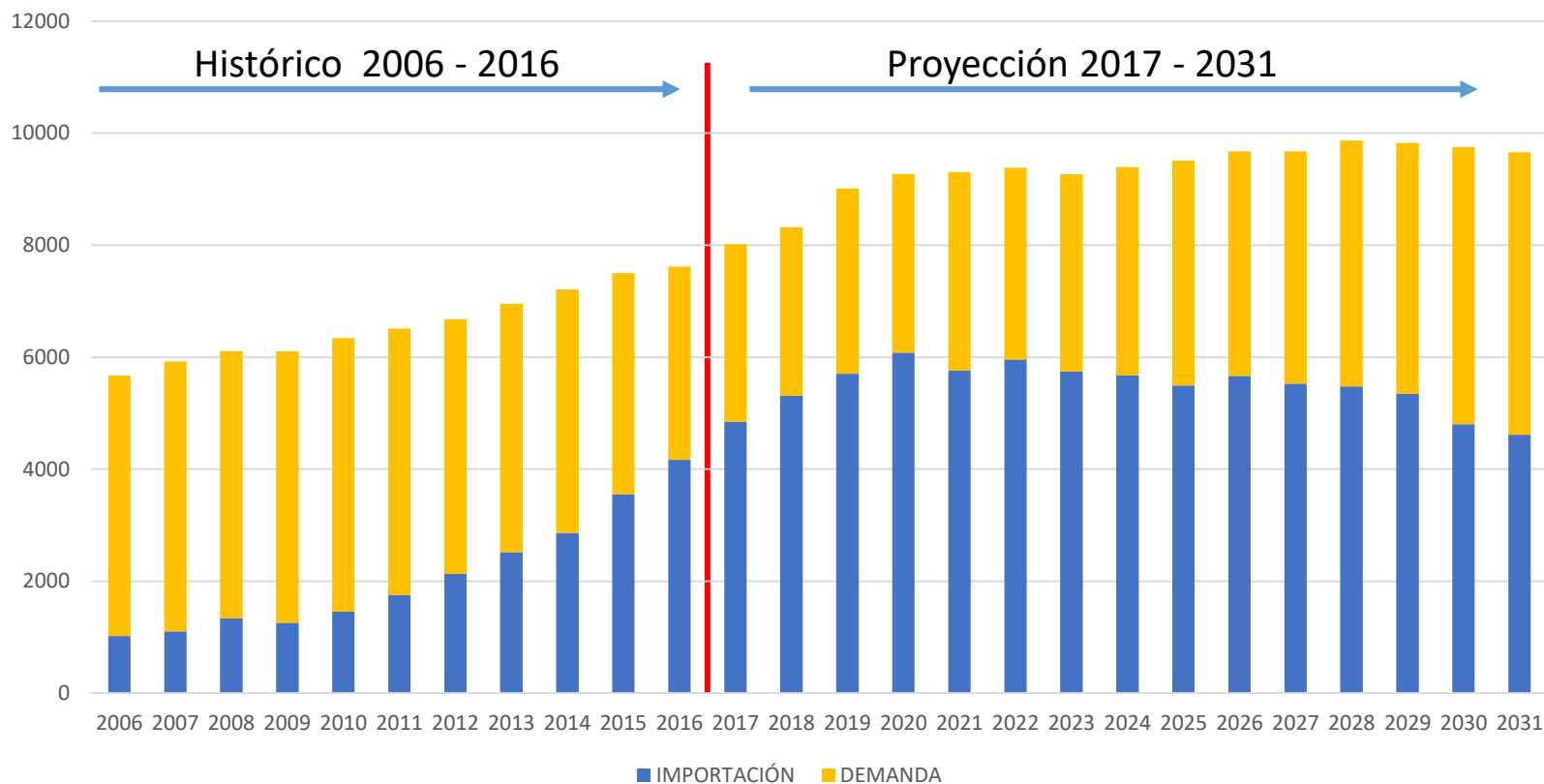
Fuente: <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=32912>

México y el Mundo – Producción de Gas Natural [m³/año] (2014)



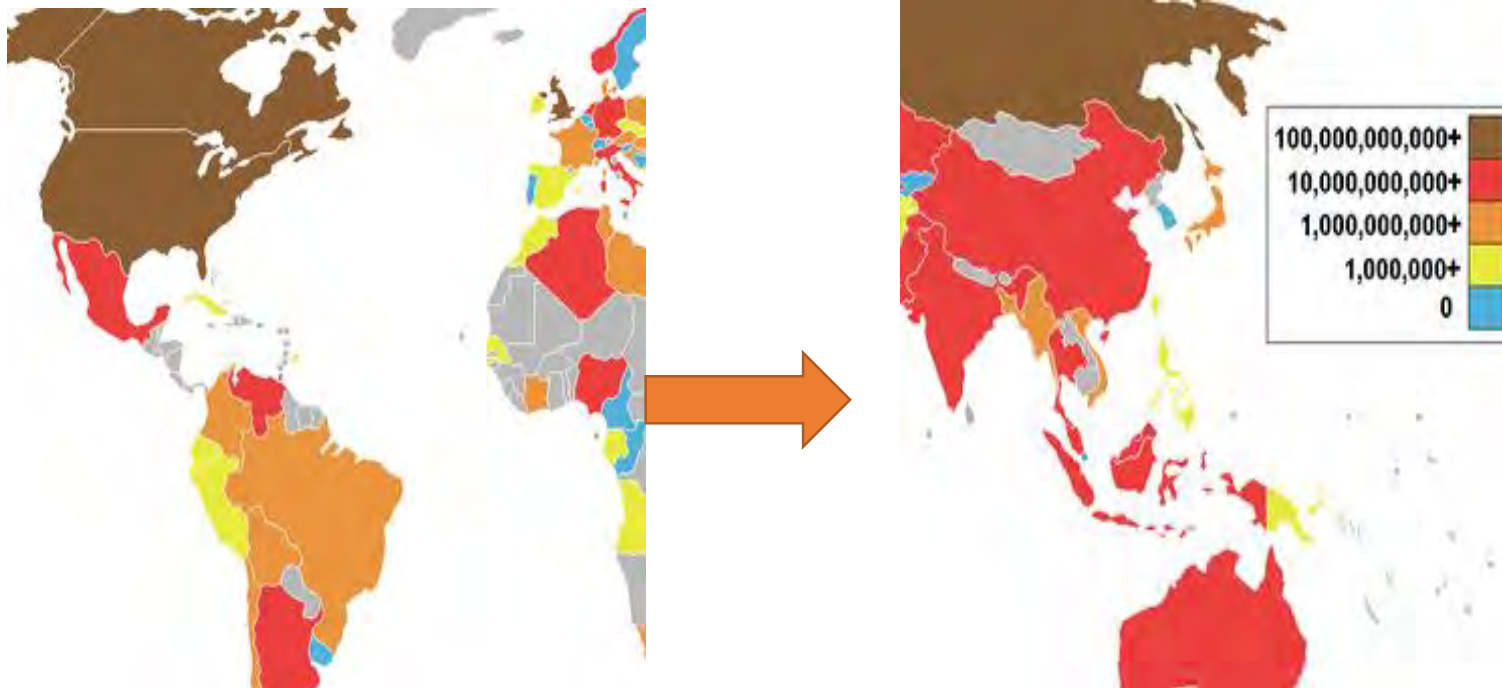
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/archive/1/1b/20150801110825%21Natural_gas_production_world.PNG

DEMANDA E IMPORTACIÓN DE GAS EN MÉXICO (2016)



<http://www.cre.gob.mx/IPGN/index.html>

DEMANDA NACIONAL DE GAS NATURAL POR SECTOR, 2016-2031



Nota 1: el sector industrial incluye Proyecto Etílen

Fuente: SENER con información de IMP,

Costo Energético – Caso México

Regional Breakout of September 2018 IPGN



México

Consumo de gas	MMPCED	9,000
Precio promedio	US\$/MMPCE	4,291
Costo diario	US\$/día	38,620,200
Costo anual	US\$/año	14,096,373,000

Sector eléctrico y petrolero (78.8 %)

Costo anual	US\$/año	11,107,941,924
Ahorro potencial	%	5
Ahorro anual	US\$/año	555,397,096

Fuente: <https://www.naturalgasintel.com/ext/resources/Mexico-GPI/MGPI-User-Manual-20181108.pdf>

- Con una gestión energética adecuada se podrían tener ahorros promedios en el consumo de gas combustible entre 5 y 10%, es decir, entre 550 -1,100 MM USD/año.

EFICIENCIA DE TURBINAS Y COMPRESORES

Por qué es importante conocerla?

¿Por Qué es Importante Conocer la Eficiencia de las Turbinas y Compresores?

- Necesidad de **optimizar la relación costo-beneficio** de los procesos productivos. Los **altos costos energéticos** asociados a la operación de los turbocompresores, en el ciclo de vida, son mayores que el resto de sus costos: procura, instalación, operación y mantenimiento. **Caso México puede ser hasta dos (2) veces el costo de un tren turbocompresor instalado (Capex).**

Consumo Típico de Gas Combustible en Turbinas a Gas [MMPCED]

Potencia en Sitio SHP	Eficiencia Térmica de la Turbina a Condiciones de Sitio						
	24%	26%	28%	30%	32%	34%	36%
5.000	1,27	1,17	1,09	1,02	0,95	0,90	0,85
7.500	1,91	1,76	1,64	1,53	1,43	1,35	1,27
10.000	2,55	2,35	2,18	2,04	1,91	1,80	1,70
12.500	3,18	2,94	2,73	2,55	2,39	2,25	2,12
15.000	3,82	3,52	3,27	3,05	2,86	2,69	2,55
17.500	4,45	4,11	3,82	3,56	3,34	3,14	2,97
20.000	5,09	4,70	4,36	4,07	3,82	3,59	3,39
22.500	5,73	5,29	4,91	4,58	4,29	4,04	3,82
25.000	6,36	5,87	5,45	5,09	4,77	4,49	4,24
27.500	7,00	6,46	6,00	5,60	5,25	4,94	4,67
30.000	7,64	7,05	6,54	6,11	5,73	5,39	5,09
32.500	8,27	7,64	7,09	6,62	6,20	5,84	5,51
35.000	8,91	8,22	7,64	7,13	6,68	6,29	5,94

Costo Energético VP en Ciclo Vida (20 años, Tasa Desc 10%, 4USD-MMBtu) [USD]

37.874.516

¿Por Qué es Importante Conocer la Eficiencia de las Turbinas y Compresores?

- El deterioro de la eficiencia es uno de los modos de falla más común en los turbocompresores, pero es una enfermedad silenciosa.

Consumo Típico de Gas Combustible en Turbinas a Gas [MMPCED]

Potencia en Sitio SHP	Eficiencia Térmica de la Turbina a Condiciones de Sitio						
	24%	26%	28%	30%	32%	34%	36%
5.000	1,27	1,17	1,09	1,02	0,95	0,90	0,85
7.500	1,91	1,76	1,64	1,53	1,43	1,35	1,27
10.000	2,55	2,35	2,18	2,04	1,91	1,80	1,70
12.500	3,18	2,94	2,73	2,55	2,39	2,25	2,12
15.000	3,82	3,52	3,27	3,05	2,86	2,69	2,55
17.500	4,45	4,11	3,82	3,56	3,34	3,14	2,97
20.000	5,09	4,70	4,36	4,07	3,82	3,59	3,39
22.500	5,73	5,29	4,91	4,58	4,29	4,04	3,82
25.000	6,36	5,87	5,45	5,09	4,77	4,49	4,24
27.500	7,00	6,46	6,00	5,60	5,25	4,94	4,67
30.000	7,64	7,05	6,54	6,11	5,73	5,39	5,09
32.500	8,27	7,64	7,09	6,62	6,20	5,84	5,51
35.000	8,91	8,22	7,64	7,13	6,68	6,29	5,94

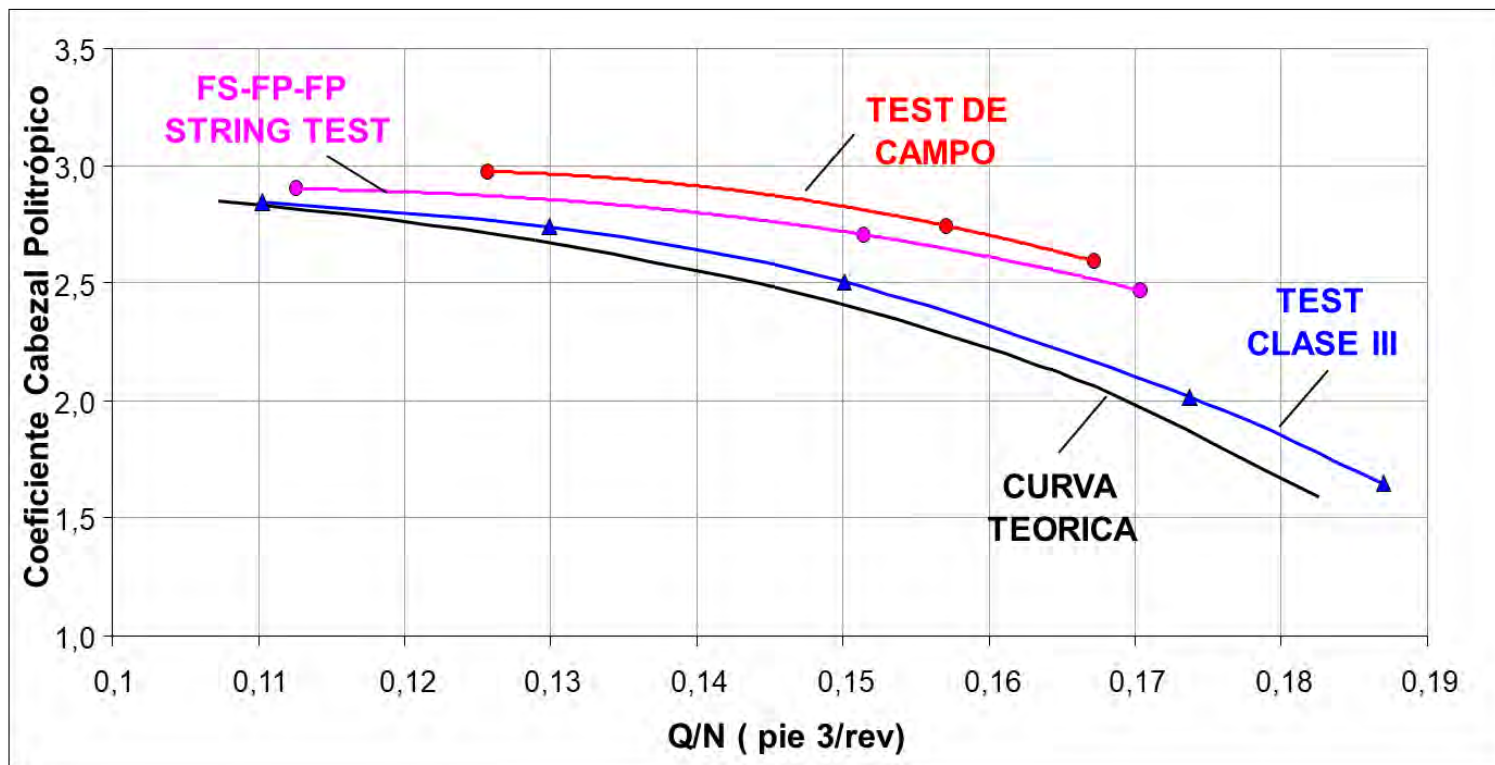
Costo Energético VP en Ciclo Vida (20 años, Tasa Desc 10%, 4USD-MMBtu) [USD]

37.874.516

140 Fallas con remoción de compresores a reparación en los talleres (3.6 MM Hrs máquina calendario)

¿Por Qué es Importante Conocer la Eficiencia de las Turbinas y Compresores?

- **Curvas aerotérmicas “mejor condición”** provienen tradicionalmente de simulaciones teóricas o pruebas de aceptación en fábrica, pero rara vez provienen de las pruebas de aceptación en campo, que son las más idóneas.



4
ON

INTRODUCCIÓN

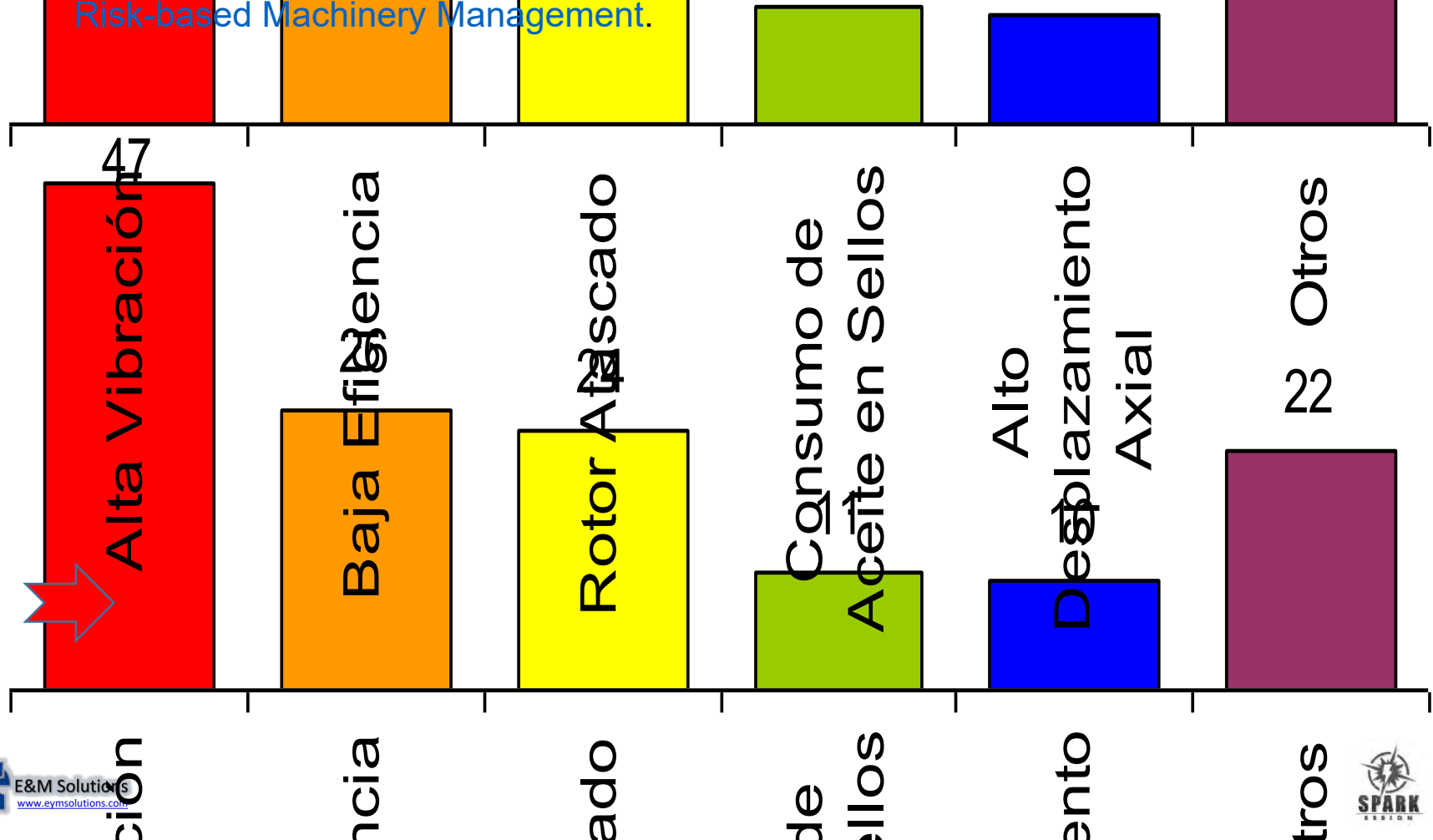
26

24

22

¿Por Qué es Importante Conocer la Eficiencia de las Turbinas y Compresores?

- Las pruebas de eficiencia son una de las técnicas de monitoreo predictivo recomendada para turbinas y compresores centrífugos, de acuerdo a la API-691 Risk-based Machinery Management.



¿Por Qué es Importante Conocer la Eficiencia de las Turbinas y Compresores?

- La norma **ISO 50001 Sistemas de Gestión de la Energía** reconoce la importancia que tienen la optimización de la eficiencia y los costos energéticos.

ISO 50001 Sistemas de Gestión de la Energía

1.0 Objeto y Campo de Aplicación

... especifica los requisitos para establecer, implementar, mantener y mejorar un **sistema de gestión de la energía**, con el propósito de permitir a una organización contar con un enfoque sistemático para alcanzar una **mejora continua en su desempeño energético**, incluyendo la **eficiencia energética**, el uso y el consumo de la energía.



ISO 50001

Sistemas de Gestión Energética (SGEn)



ISO 50001 - Sistema de Gestión de Energía SGEn

- Caracterizar usos de la energía.
- Elaborar plan de acción para mejora del desempeño energético.
- Establecer KPIs y línea base.
- Documentar los procesos para mantener las mejoras a través del tiempo y la rotación en el personal.
- Integrar con otros sistemas de gestión (Calidad, Medioambiente, etc.).

Mejora Continua: *Plan – Do – Check – Act*

PLAN

- Alcance y requisitos
- Definición de la política
- **Caracterización de áreas de consumo energético**
- Establecimiento de objetivos y plan energético.
- **Definición de KPIs.**
- **Establecimiento de línea base.**

DO

- Definición de procesos en el sistema
- Consumo de energía
- **Documentar procedimientos**
- Implicación e infor
- Implementación

CHECK

- Seguimiento
- **Medición**
- Efectividad de las medidas
- Eficiencia del sistema
- Ejecución de auditorias internas

ACT.

- **Revisión y análisis de los resultados**
- Innovación
- **Identificación de causas de posibles desviaciones**
- **Identificación de acciones correctivas y acciones preventivas**
- Decisión de cambios a mejorar



POR QUE PIERDEN EFICIENCIA?

Las turbinas y los compresores

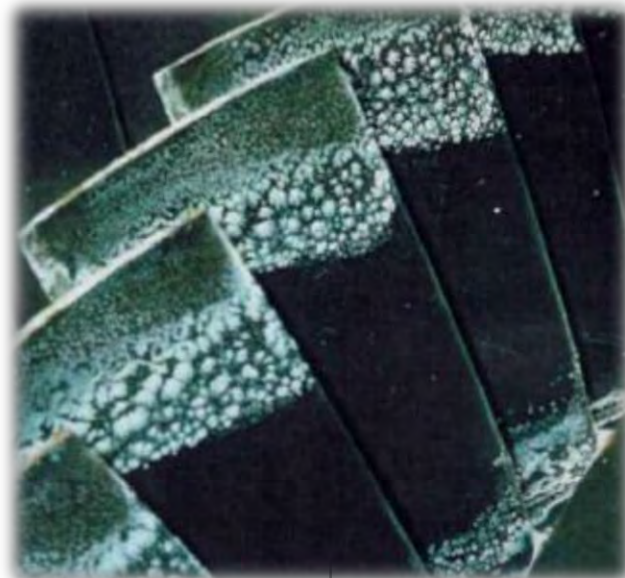
Turbinas:



- Ensuciamiento por ingesta de polvo [1]



- Ingesta de vapores de aceite [2]



- Formación de cristales de sal y otros contaminantes [2]

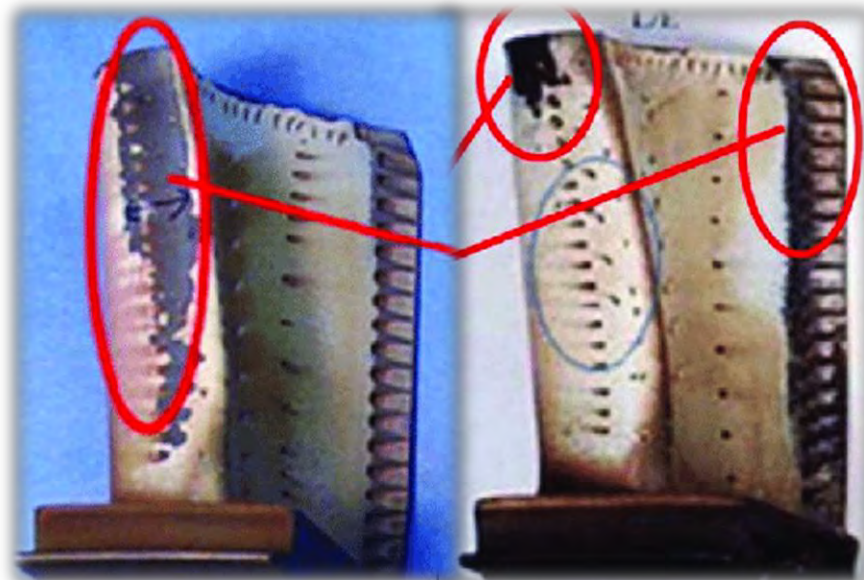
Fuente: [1] http://www.turbotect.com/gallery/examples_of_some_severe_gas_turbine_compressor_fou.html
[2] Meher-Homji (2009)

POR QUÉ PIERDEN EFICIENCIA?

Turbinas:



- Corrosión [1 y 2]



- Erosión [3]

Fuente: [1] AviationPros (<https://www.aviationpros.com>)

[2] Meher - Homji (2009)

[3] https://www.researchgate.net/figure/Erosion-of-actual-gas-turbine-blades-coated-with-TBCs-28_fig2_318676760

POR QUÉ PIERDEN EFICIENCIA?

Turbinas:



- Daños por objeto extraño FOD [1]



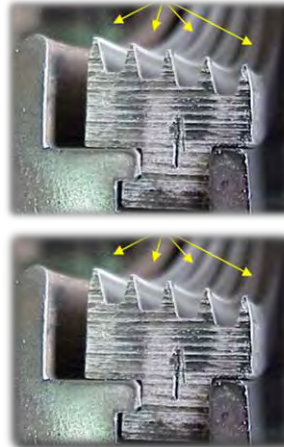
- Daños en sellos [2]

Fuente: [1] Meher - Homji (2009)

[2] <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10749-015-0575-5>

POR QUÉ PIERDEN EFICIENCIA?

Compresores:

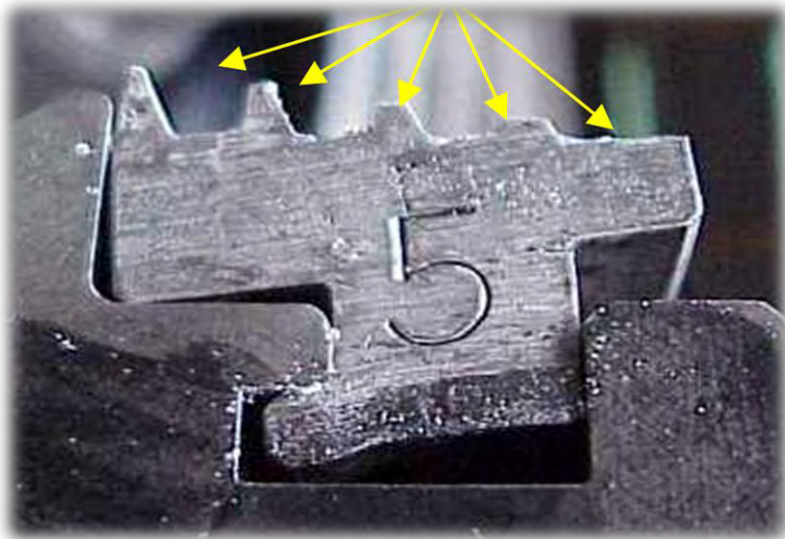


- Ensuciamiento de internos

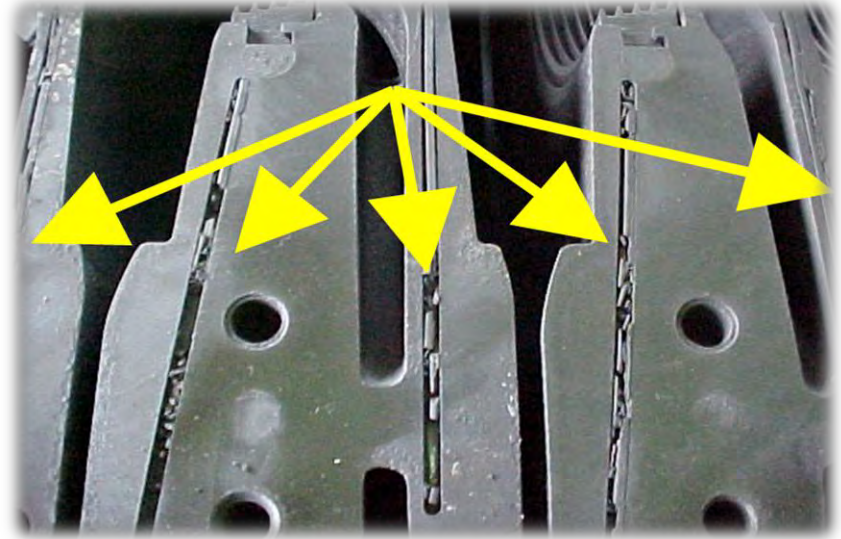
- Holgura excesiva en sellos laberintos

POR QUÉ PIERDEN EFICIENCIA?

Compresores:



- Degradación de elastómeros

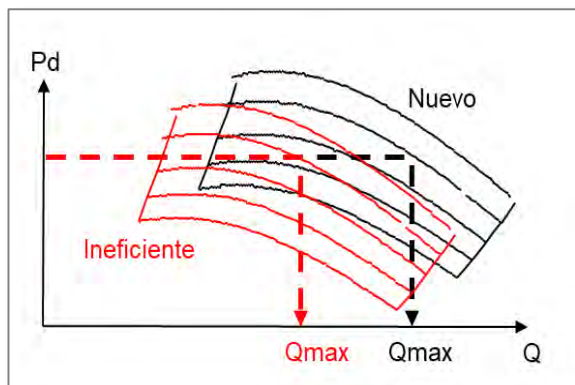


- Fugas en sellos metal-metal

Compresores y turbinas:

- ❏ Operación prolongada del equipo en zonas no deseadas (cerca del límite de “surge”, por ejemplo.
- ❏ Mantenimientos inadecuados, uso de repuestos inadecuados.
- ❏ Personal sin la pericia adecuada.
- ❏ Ausencia o mala aplicación de procedimientos (para mantenimiento, pruebas de eficiencia, etc.).
- ❏ Toma y análisis de muestras de gas inadecuados.
- ❏ Uso de curvas de referencia “mejor condición” que no representan el comportamiento real de los compresores en su mejor condición (nuevos o después de una reparación).

CUALES SON SUS CONSECUENCIAS?



- Disminución del flujo manejado (afecta producción y/o quema de gas)



- Incremento en la potencia consumida (costos energéticos)



- Operación en condiciones extremas (aumento en la tasa de fallas)

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Cálculo de Potencia y Eficiencia

FUNDAMENTOS TEÓRICOS – TURBINAS

Flujo comb

$$Q_{comb} = \frac{HR_{HP}}{LHV}$$

Efic Térmica

$$\eta_{term} = \frac{8545}{HR}$$

Potencia

$$HP = f_t f_a f_i f_e f_{od} f_l HP_{iso}$$

“Heat Rate”

$$HR = f_t f_a f_i f_e f_{od} f_l HR_{iso}$$

Donde:

Q_{comb} : flujo de combustible

HP_{iso} : potencia HP de salida en el punto de operación “rated” a condiciones ISO

η_{term} : Eficiencia térmica

HR_{iso} : “heat rate” HR en el punto de operación “rated” a condiciones ISO

LHV : Poder calórico del combustible (Low Heat Value)

f_t : factor de corrección por temperatura ambiente

f_a : factor de corrección por altitud

f_i : factor de corrección por caída de presión en el ducto de entrada de aire

f_e : factor de corrección por contrapresión en el ducto de salida de gases calientes

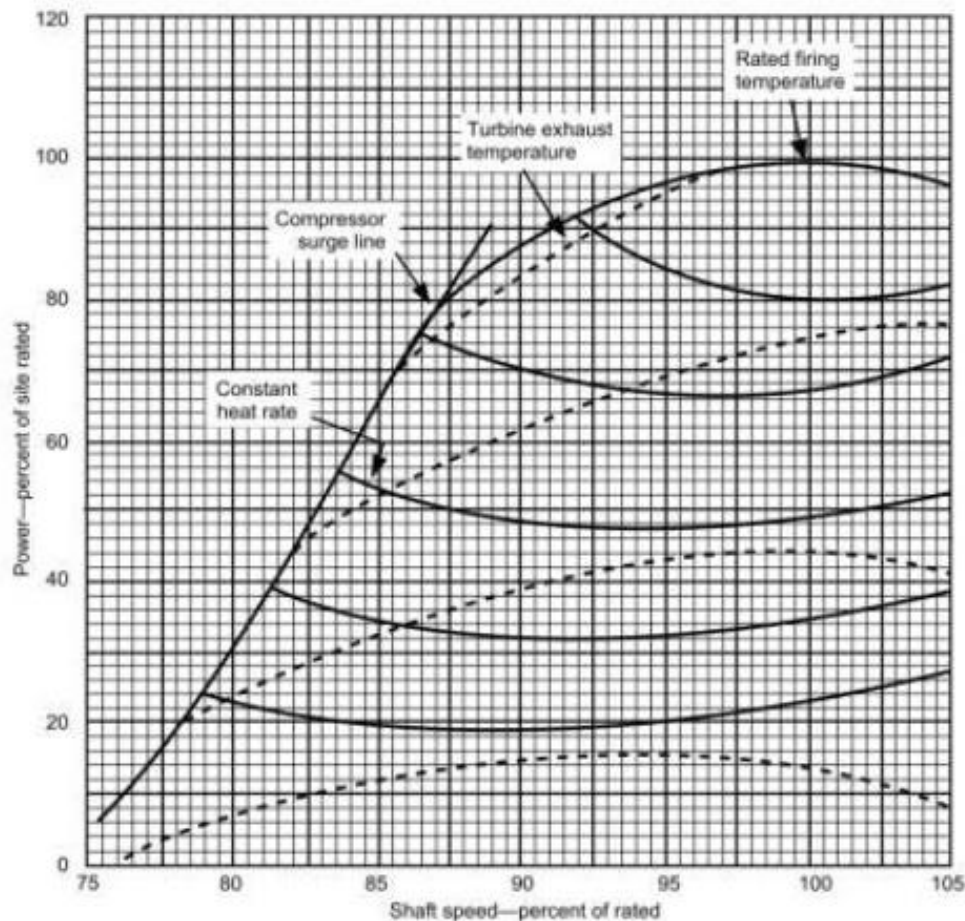
f_{od} : factor de corrección por operación “off design” (RPM y $HP \leftrightarrow$ “rated”), según mapa turb.

f_l : factor de corrección por pérdida de eficiencia

“rated” : punto de operación a 100% de la velocidad y potencia de salida limitada *Tesc*.

ISO : condiciones a temp. ambiente de 59°F, presión ambiente de 14.7 psia (nivel del mar)

Mapa de turbina

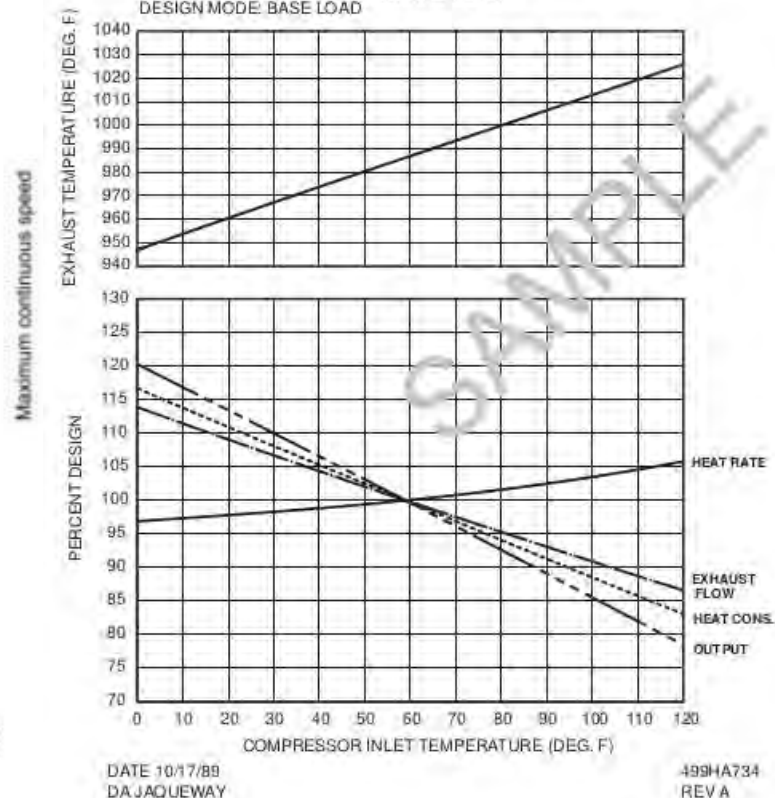


Curvas de corrección

GENERAL ELECTRIC MODEL PG7111(EA) GAS TURBINE

Effect of Compressor Inlet Temperature on
Output, Heat Rate, Heat Consumption, Exhaust Flow
And Exhaust Temperature at 100% Speed

FUEL: NATURAL GAS & DISTILLATE OIL
DESIGN VALUES ON CURVE 499HA733 REV A
DESIGN MODE: BASE LOAD



Fuente: [1] Satyendra Nath Dwivedi (<https://www.slideshare.net/merijan10/gas-turbine-driven-compressors>)
[2] GE GTS-111D

Parámetros y ecuaciones del modelo politrópico (ASME PTC-10)

Potencia

$$P_G = \dot{m}(h_2 - h_1)$$

Eficiencia
politrópica

$$\eta_P = \frac{H}{h_2 - h_1}$$

Coef. de flujo

$$\frac{Q}{N} = \frac{\dot{m} v_1}{N}$$

Coef. de cabezal
politrópico

$$\mu_P = \frac{H}{\sum U^2}$$

Coef de entrada
de trabajo

$$\mu_{IN} = \frac{\mu_P}{\eta_P}$$

Cabezal Politrópico

$$H = f \left(\frac{n}{n-1} \right) [P_2 v_2 - P_1 v_1]$$

Coef. Corrección (Schultz)

$$f = \frac{h_{2s} - h_1}{\left(\frac{n_s}{n_s - 1} \right) [P_2 v_{2s} - P_1 v_1]}$$

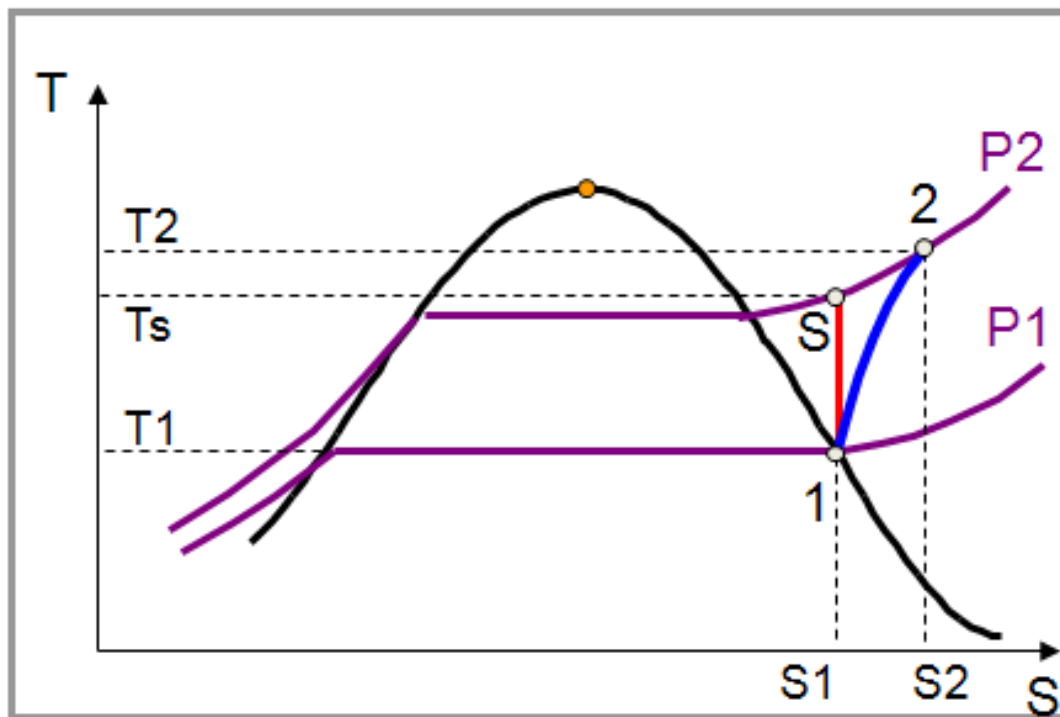
Exp. politrópico

$$n = \frac{\log \left(\frac{P_2}{P_1} \right)}{\log \left(\frac{v_1}{v_2} \right)}$$

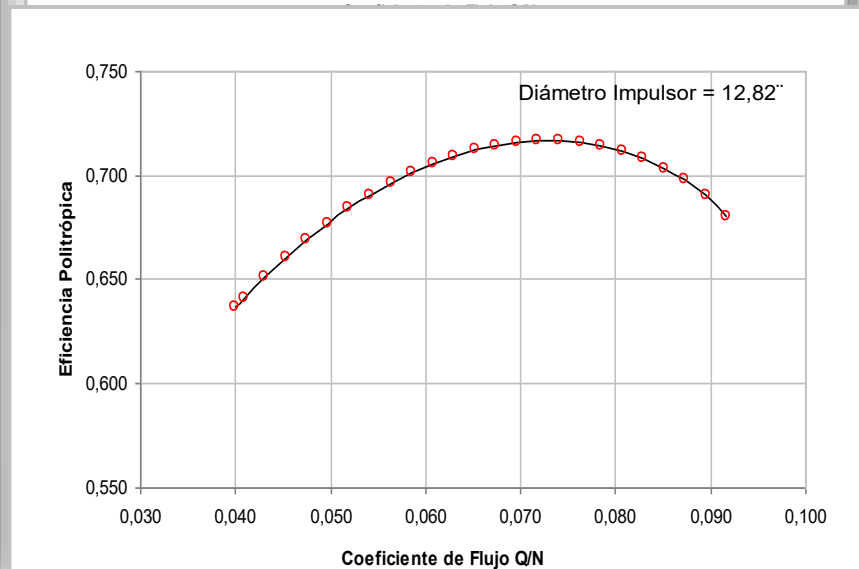
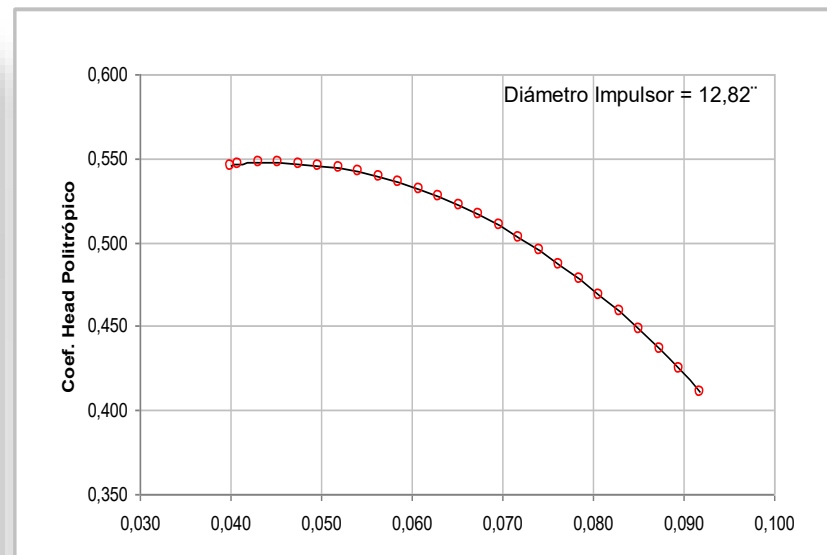
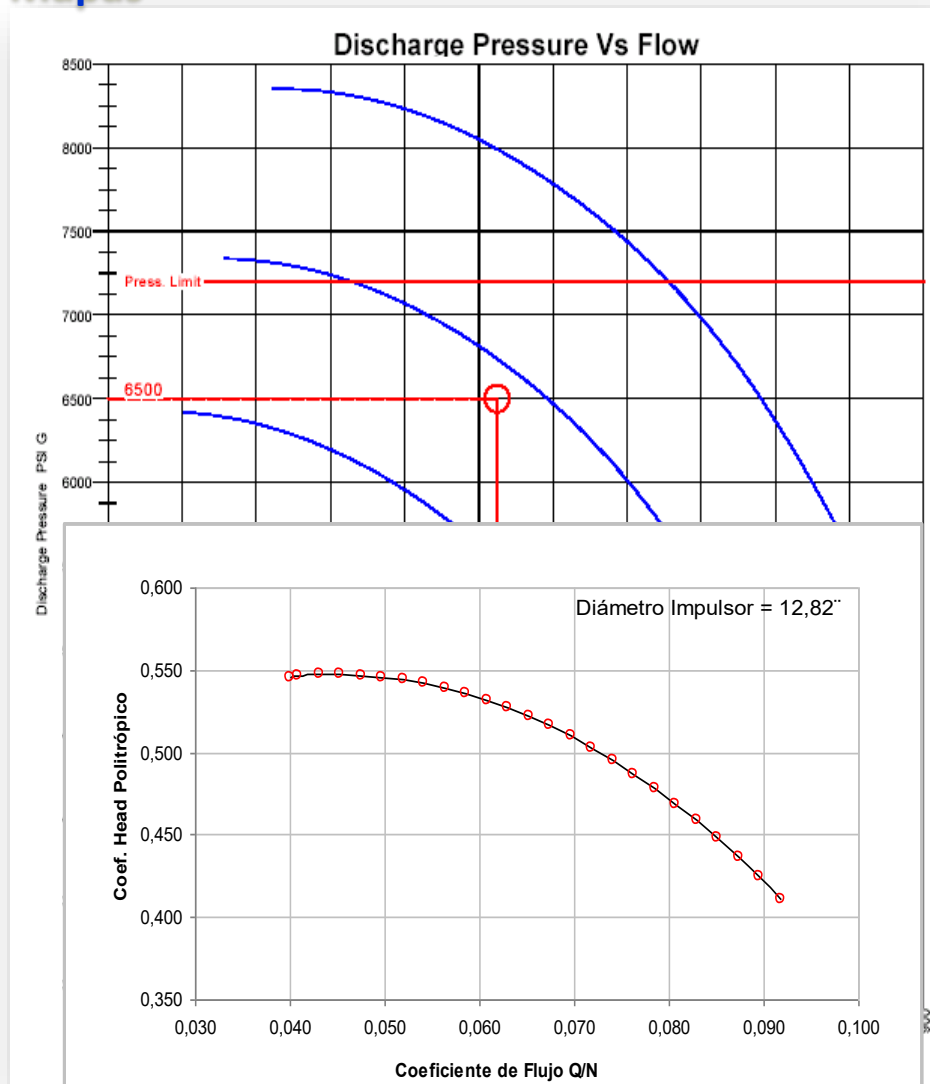
Exp. isentrópico

$$n_s = \frac{\log \left(\frac{P_2}{P_1} \right)}{\log \left(\frac{v_1}{v_{2s}} \right)}$$

Diagrama Temperatura-Entropía



Mapas



Ecuación de estado (EOS)

- El cálculo del volumen específico v , entalpía h y entropía s , requiere Ecuación de Estado con validez probada.
- Entre otras: PR (Peng-Robinson), LKP (Lee-Kesler-Ploecker), BWRS (Benedict-Webb-Rubin-Starling) y SRK (Soave-Redlich-Kwong). Todas arrojan resultados razonablemente correctos [Kurz y Brun].

$$\mu_{IN} = \frac{\mu_P}{\eta_P}$$

$$p = p_R T \left(1 + \frac{C_1}{T} + \frac{C_2}{T^2} + \frac{C_3}{T^3} + \frac{C_4}{T^4} + \frac{C_5}{T^5} + \frac{C_6}{T^6} + \frac{C_7}{T^7} + \frac{C_8}{T^8} + \frac{C_9}{T^9} + \frac{C_{10}}{T^{10}} \right) \left(1 + \frac{d_1}{T} + \frac{d_2}{T^2} + \frac{d_3}{T^3} + \frac{d_4}{T^4} + \frac{d_5}{T^5} + \frac{d_6}{T^6} + \frac{d_7}{T^7} + \frac{d_8}{T^8} + \frac{d_9}{T^9} + \frac{d_{10}}{T^{10}} \right) \left(1 + \frac{e_1}{T} + \frac{e_2}{T^2} + \frac{e_3}{T^3} + \frac{e_4}{T^4} + \frac{e_5}{T^5} + \frac{e_6}{T^6} + \frac{e_7}{T^7} + \frac{e_8}{T^8} + \frac{e_9}{T^9} + \frac{e_{10}}{T^{10}} \right)$$

Ecuación BWRS

$$B_0 = \sum_{i=1}^n X_i \cdot B_{0i}$$

$$A_0 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n X_i \cdot X_j \cdot A_{0i}^{1/2} \cdot A_{0j}^{1/2} \cdot (1 - K_{ij})$$

$$C_0 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n X_i \cdot X_j \cdot C_{0i}^{1/2} \cdot C_{0j}^{1/2} \cdot (1 - K_{ij})^3$$

$$D_0 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n X_i \cdot X_j \cdot D_{0i}^{1/2} \cdot D_{0j}^{1/2} \cdot (1 - K_{ij})^4$$

$$E_0 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n X_i \cdot X_j \cdot E_{0i}^{1/2} \cdot E_{0j}^{1/2} \cdot (1 - K_{ij})^5$$

$$\gamma = \left[\sum_{i=1}^n X_i \cdot \gamma_i^{1/2} \right]^2$$

$$a = \left[\sum_{i=1}^n X_i \cdot a_i^{1/3} \right]^3$$

$$b = \left[\sum_{i=1}^n X_i \cdot b_i^{1/3} \right]^3$$

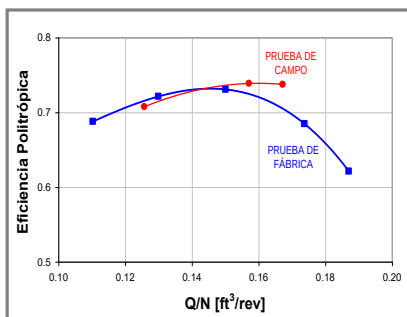
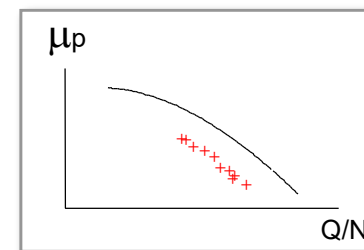
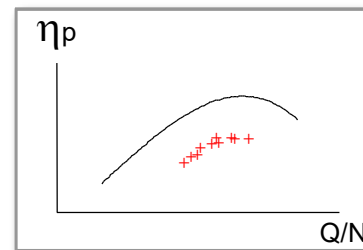
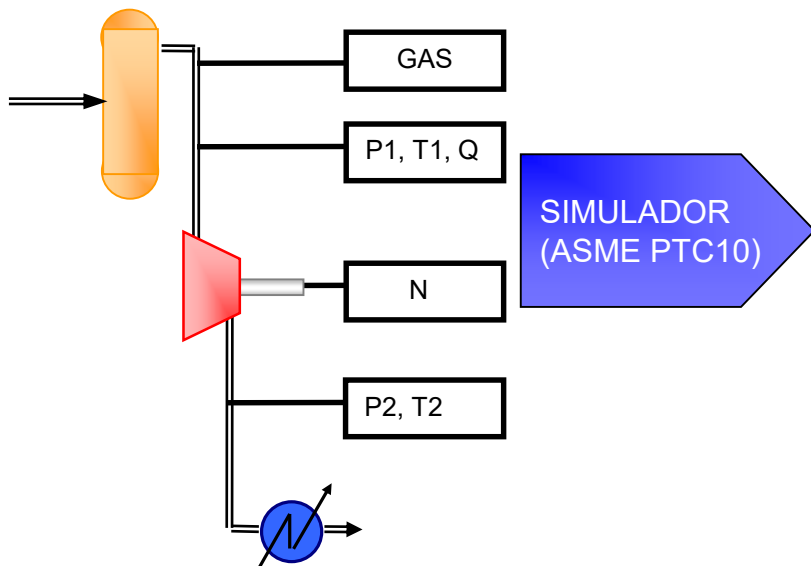
$$\alpha = \left[\sum_{i=1}^n X_i \cdot \alpha_i^{1/3} \right]^3$$

$$c = \left[\sum_{i=1}^n X_i \cdot c_i^{1/3} \right]^3$$

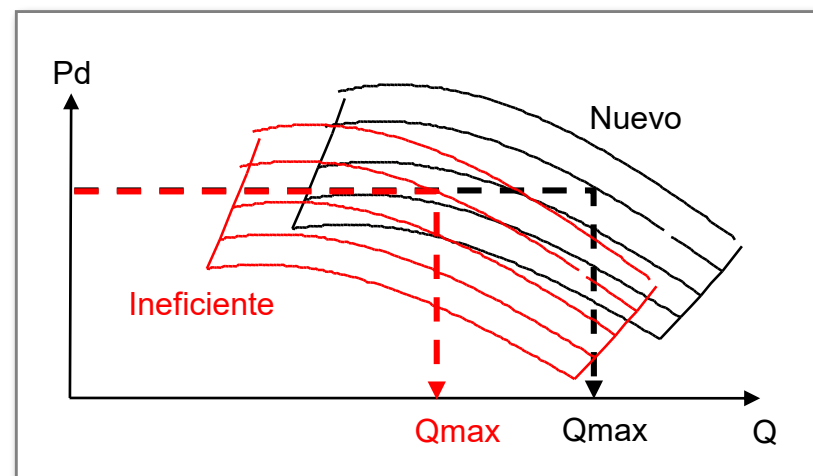
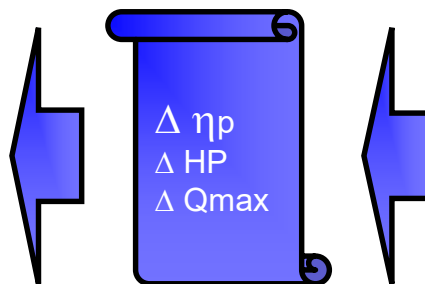
PREPARACIÓN Y EJECUCIÓN

De las Pruebas

PREPARACIÓN Y EJECUCIÓN DE LAS PRUEBAS



¿Reparar?



PREPARACIÓN Y EJECUCIÓN DE LAS PRUEBAS

- Una prueba de eficiencia requiere de:
 - Toma de datos operacionales
 - Muestra y análisis cromatográfico del gas manejado.
 - Ecuación de estado que prediga satisfactoriamente las propiedades termodinámicas del gas, y
 - Modelo matemático que simule el proceso de compresión y los cambios de estado del gas en su paso por los internos del compresor.
- Los dos últimos, a pesar de la complejidad analítica, no representan mayor obstáculo ya existen programas computarizados con las ecuaciones necesarias para efectuar los cálculos.
- Es en la obtención de los datos y en las muestras de gas donde el personal encargado de las pruebas debe concentrar el mayor esfuerzo, planificación y cuidado, y es justamente en estos puntos hacia donde debemos enfocar la atención.

Planificación Previa (Etapa Más Importante):

- Los requerimientos operacionales abren ventanas muy limitadas de tiempo para la ejecución de actividades preparatorias. **Aprovechar paros programados** por mantenimiento.
- Concéntrese en las **actividades relevantes durante los paros**: calibración de instrumentación e instalación de instrumentación portátil adicional que se requiera.
- Actividades que no requieren paro** de unidad deben ser ejecutadas antes del paro. Ejemplo:
 - Identificación de puntos para instalación de la instrumentación portátil.
 - Punto para toma de las muestras de gas.
 - Tipo, rango y precisión de instrumentación portátil requerida.
 - Longitud de inserto de los termopozos.
 - Revisión del certificado de calibración de instrumentación portátil.
 - Revisión de funcionalidad del DAS y las impresoras.

Planificación Previa (Etapa Más Importante):

- ❏ **Procedimientos Escritos.** La planificación, ejecución e interpretación de resultados debe ser independiente del equipo de personas que están involucradas. Desarrollarlos si no existen.
- ❏ **Requerimientos de Personal:** líder de prueba, representante de operaciones, instrumentistas, analista de vibraciones (pruebas “surge”), especialista sistema “antisurge”.



Planificación Previa (Etapa Más Importante):

Requerimientos de Equipos:

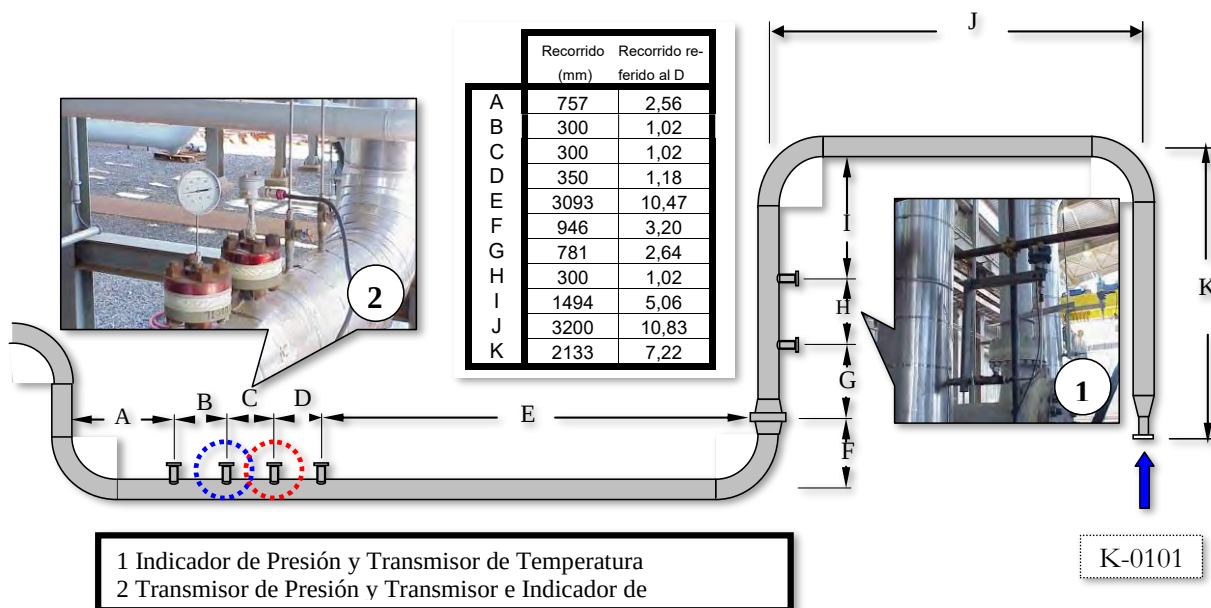
- Instrumentación portátil (termómetros, manómetros, RTDs, etc).
- Equipos para calibrar la instrumentación portátil y la permanente de la planta.
- Analizador de vibraciones en tiempo real, para la predicción de acercamiento a la condición de “surge”.
- Cilindros para muestras de gas.
- Computador portátil con programas que estime las propiedades termodinámicas del gas y las características adimensionales del compresor.
- Radios para la comunicación interna del personal.
- Formatos de toma de datos.
- Herramientas típicas de trabajo de los instrumentistas.



Planificación Previa (Etapa Más Importante):

Ubicación de Puntos de Medición:

- Identificar puntos donde se encuentra instalada la instrumentación permanente de la planta.
- Verificar que la posición y forma de instalación de los sensores de presión, temperatura y flujo son las adecuadas (ASME PTC).
- Verificar la separación aguas arriba y aguas debajo de los sensores respecto a elementos perturbadores de flujo (codos, válvulas, placas orificio, enfriadores, depuradores, etc.)



Planificación Previa (Etapa Más Importante):

Ubicación de Puntos de Medición:

- **Sensores de presión** - Verificar que no hay **acumulación de líquidos**. Purgar. Usar válvulas de aislamiento (aguja por ejemplo), con puertos para purga entre el sensor y la toma del proceso.
- **Sensores de temperatura**: Verificar que la **longitud de penetración del termopozo y del inserto del sensor** es acorde al diámetro de la tubería. Usar fluido barrera (aceite).
- Ubicar la **instrumentación portátil** (de ser posible) en puntos **adyacentes** a los de la instrumentación permanente. De no ser posible, escoger puntos donde las mediciones sean igualmente representativas.

Planificación Previa (Etapa Más Importante):

Selección de la Instrumentación Portátil:

- Usar, de ser posible, instrumentos que **no requieran calibración** (termómetros de mercurio y manómetros de peso muerto).
- Usar termocuplas o RTD's para **temperatura**.
- Usar manómetros de precisión con indicación digital o de aguja para las mediciones de **presión**
- Usar la señal de referencia “key phasor”, disponible en los sistemas de supervisión de vibración, para la medición de la **velocidad** de rotación
- La medición de **flujo**, por lo general, no puede ser medida con medidor portátil (ultrasonido, etc.).

Planificación Previa (Etapa Más Importante):

Apreciación de los instrumentos:

- La apreciación de los instrumentos debe satisfacer los requerimientos del código ASME PTC-10. Se debe determinar si esta apreciación satisface la precisión con la que se desea calcular las variables adimensionales Q/N , μ_p y η_p

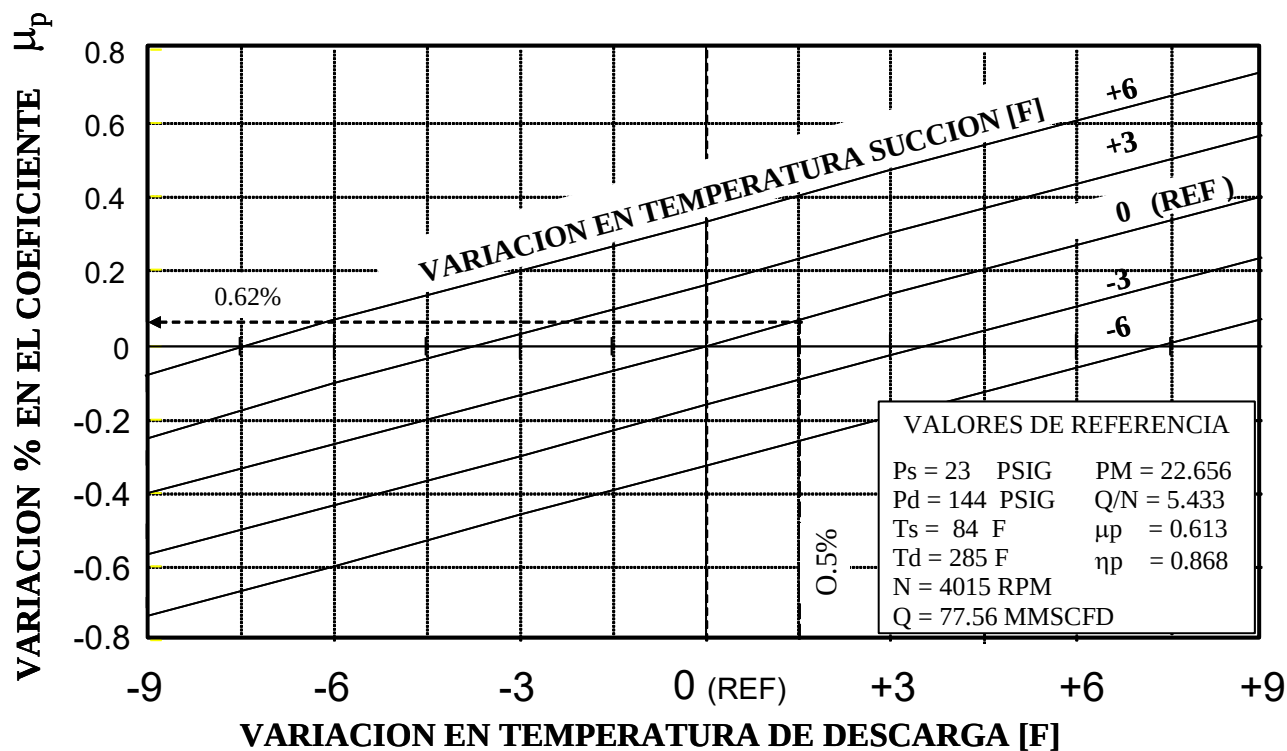


FIGURA 4.- Relación de μ_p con las Temperaturas de Succión y Descarga

Planificación Previa (Etapa Más Importante):

Calibración de la Instrumentación (portátil y permanente):

- La instrumentación permanente se calibra con la ayuda de la instrumentación portátil.
- Los **transmisores de presión y flujo** se calibran haciendo uso de una bomba o “gato” hidráulico que simule la presión. La señal de salida se compara con la indicación de los manómetros portátiles de precisión. Tres puntos (0% - 50% - 100% del rango del transmisor). Verifique que no existen fugas en las tomas y conexiones de presión.
- Las **termocuplas y RTD's**, usar fuentes generadoras de calor controlado y la señal de salida compararla con un termómetro de mercurio de precisión. Tres puntos como mínimo.
- El **tacómetro** se verifica con la asistencia de un generador eléctrico de pulsos, el cual debe conectarse directamente al monitor.
- El líder de la prueba deberá **testificar** y **certificar** el proceso de calibración de cada señal.

Planificación Previa (Etapa Más Importante):

Toma de Muestras y Análisis Cromatográfico del Gas:

- Se requieren antes y durante de la ejecución de la prueba.
- Las normas GPA 2166, 2261 y 2286 establecen guías para determinar el método de muestreo y análisis cromatográfico que se deben emplear. El “*Método de Purga - Llenado y Vaciado*” [GPA 2166] muestra ser adecuado para un amplio rango de P y T y composiciones químicas del gas.
- El cilindro, separador, válvulas y líneas deben ser de acero inoxidable.
- Los componentes deben ser apropiados para la P y T del gas.
- El gas se colecta a la succión de cada sección de compresión.
- Toma en el punto vertical superior de la tubería.
- No hacer tomas en extremos ciego o puntos donde se pueda formar líquidos.

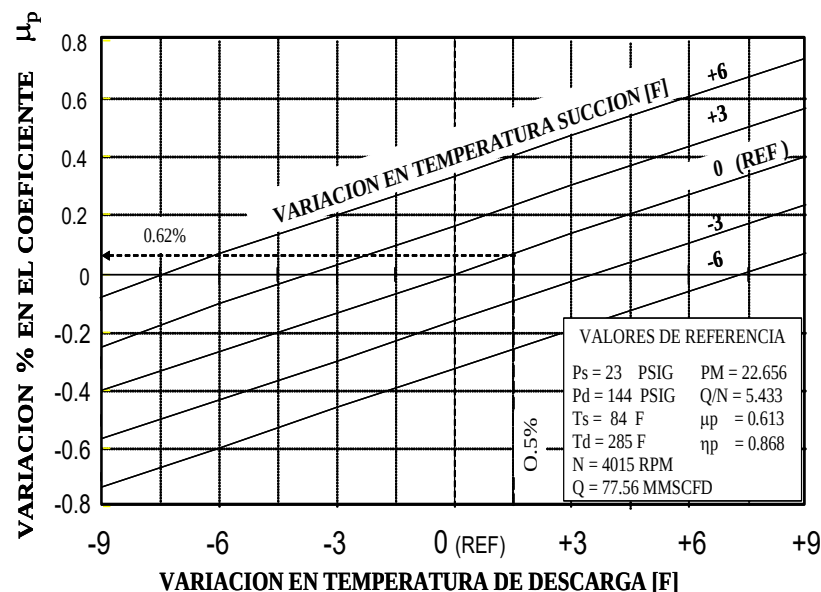
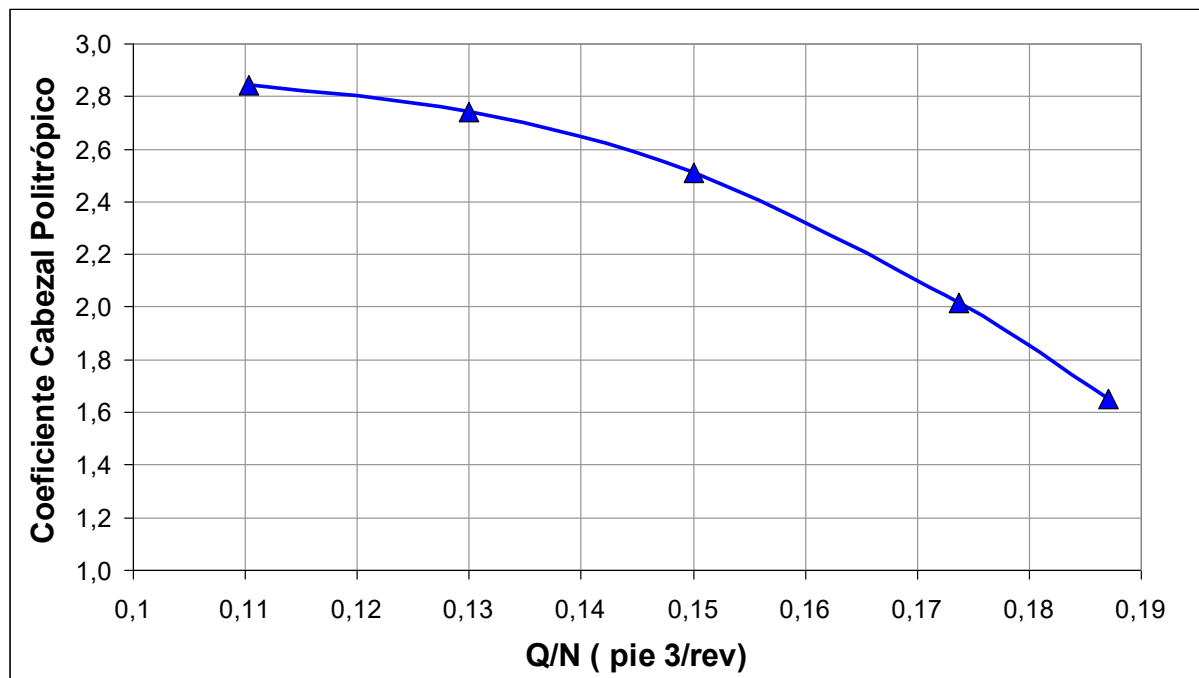


FIGURA 4.- Relación de μ_p con las Temperaturas de Succión y Descarga

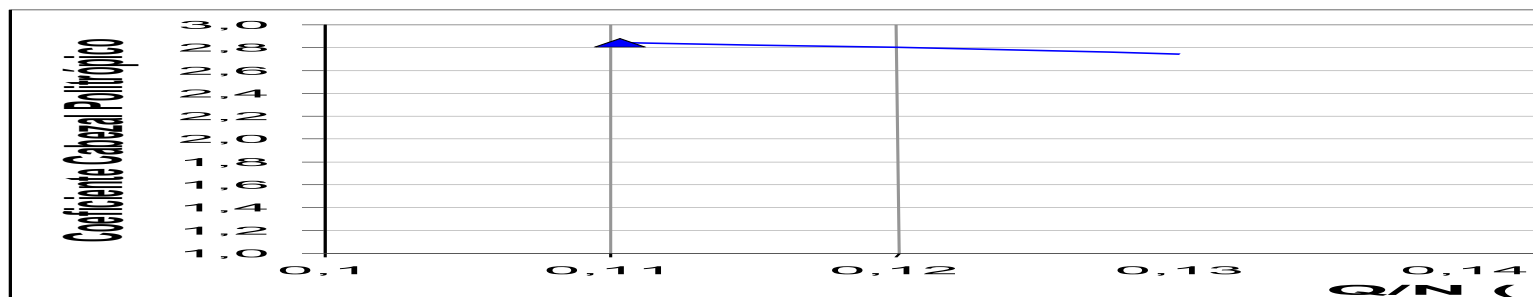
Ejecución de las Pruebas – Puntos a Probar:

- El punto de máximo Q/N queda determinado generalmente por el máximo flujo que la planta es capaz de manejar con la potencia disponible en el accionador.
- Punto de mínimo flujo Q/N lo determina la línea de control “antisurge” teórica.
- Los otros puntos Q/N (deseable 3 más) deben seleccionarse de manera que el espaciamiento sea equidistante.



Ejecución de las Pruebas – Toma de Datos de un Punto:

- Ubique la planta en el punto Q/N deseado. Mantenga la **operación en forma estable** por unos 30 minutos.
- Tome un juego completo de **datos** (presiones, temperaturas, flujo y velocidad de rotación), **en menos de 1 minuto** (en caso de ser manual).
- Calcule** las variables adimensionales: Q/N , μ_P , η_P y μ_P/η_P .
- Mantenga la operación estable. Tome un juego adicional de **datos** y **calcule** nuevamente los coeficientes.
- Compare** los valores y verifique si se cumplen los **criterios de estabilización térmica**:

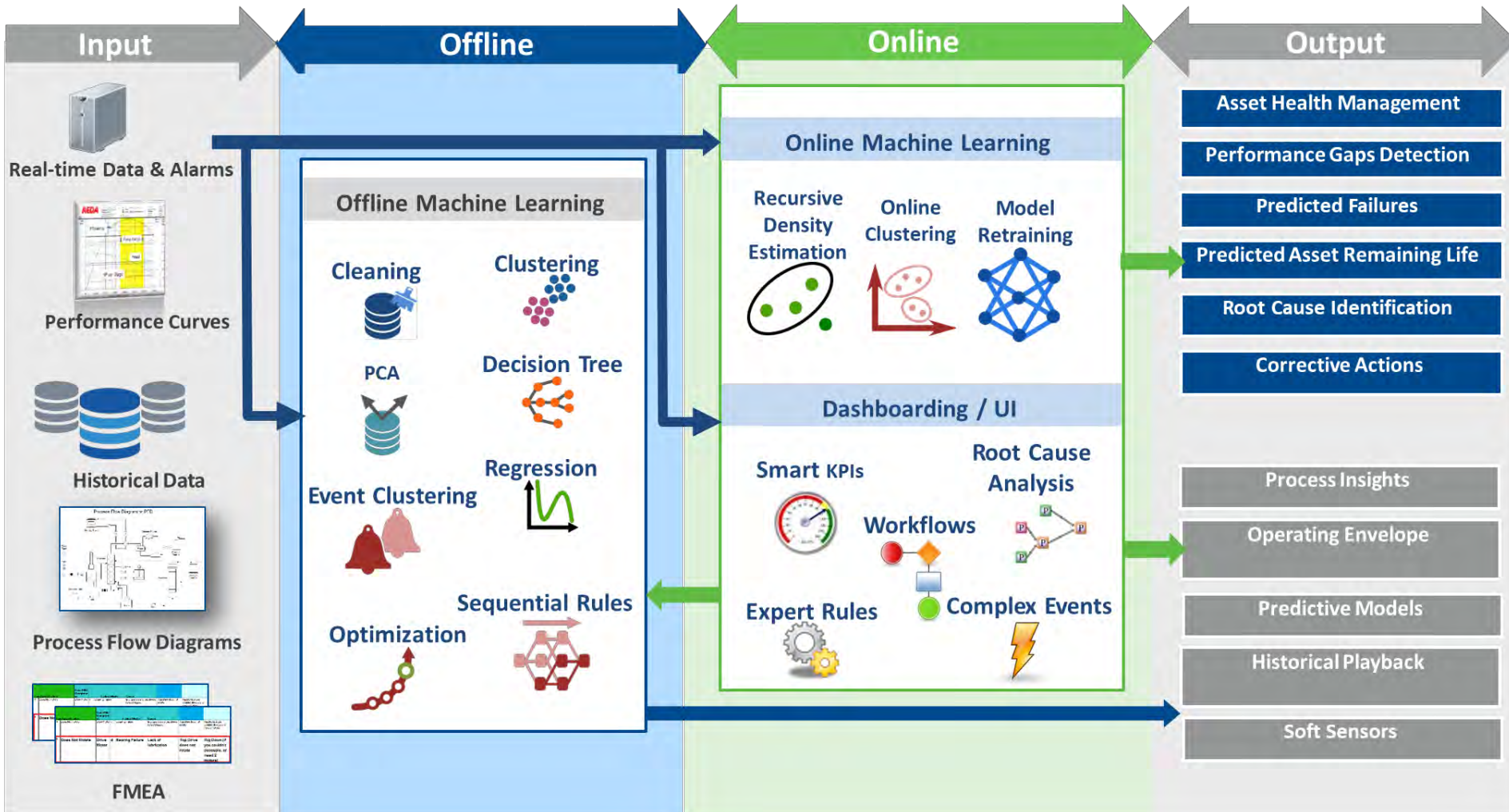


- Repetir toma de datos de ser necesario, o **moverse** a otro punto Q/N

MIRANDO AL FUTURO

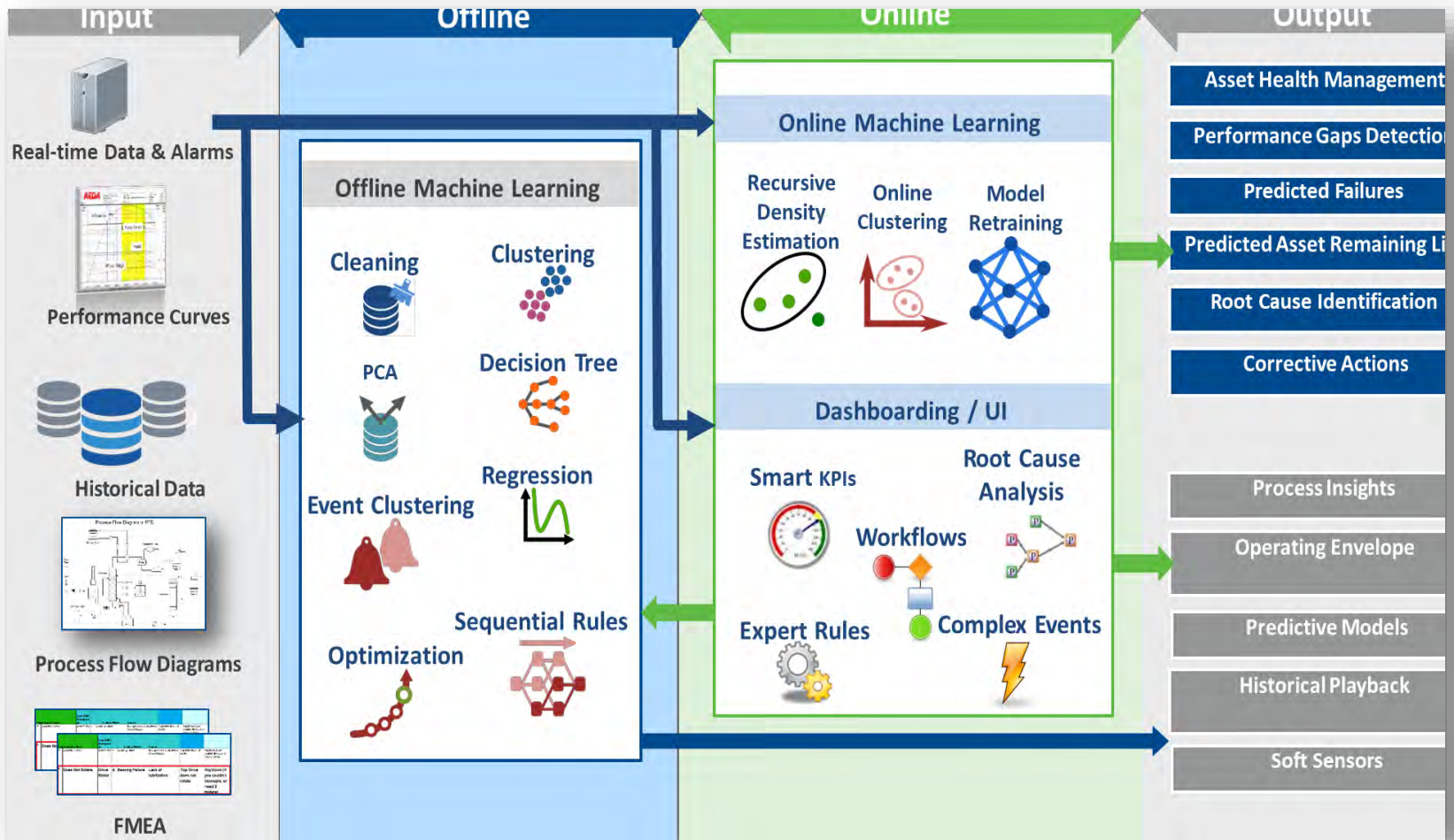
Machine Learning & Artificial Intelligence

Machine Learning & Artificial Intelligence



Fuente: Emerson Reliability Solutions

Machine Learning & Artificial Intelligence



Fuente: Emerson Reliability Solutions

Monitor de Performance para Identificar “Malos Actores”



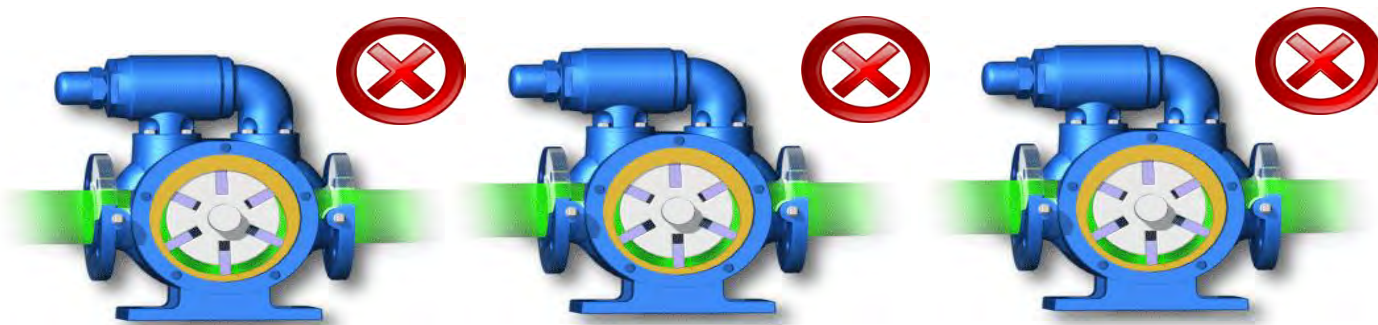
Ejecutivo



Gerente



Operador



	UNIT #1	UNIT #2	UNIT #3
Efficiency	68%	72%	75%
Performance Deviation	4%	2%	5%
Service	Cooling Water	Product	Condensate
Deviation Cost	€ 15/h	€ 120/h	€ 25/h
Mechanical Health	Predicted issue imminent	Healthy	Chronic vibration, persistent
Priority (for availability!)	1 - availability	2 - cost	3 - maintenance

Fuente: Emerson Reliability Solutions



REPARAR?

o Seguir Operando?

REPARAR O CONTINUAR OPERANDO?

- ❏ **Decisión** técnico económica.
- ❏ **Técnicamente** se verifica que los equipos sean capaces de continuar operando sin comprometer su integridad y la seguridad de las instalaciones.
- ❏ **Económicamente** se **jerarquizan las opciones de reparar y no reparar** con sus costos de ciclo de vida descontados a valor presente. Horizonte económico es el tiempo hasta el próximo mantenimiento.
- ❏ **Los costos de ciclo de vida** toman en cuenta el consumo energético (gas combustible ó electricidad), los costos de operación y mantenimiento y las pérdidas de oportunidad ó penalizaciones por paros programados y no programados en el horizonte económico.
- ❏ Las **pérdidas de oportunidad** están asociadas a la actividad económica soportada por la compresión. Si no se repara, existe una merma en la capacidad de compresión o un exceso en el consumo energético, y si se repara, hay un balance entre lo que se deja de comprimir durante la reparación y lo que se recupera posterior a la misma.
- ❏ En el caso más general la evaluación toma en cuenta si existe o no capacidad de compresión de **respaldo**.



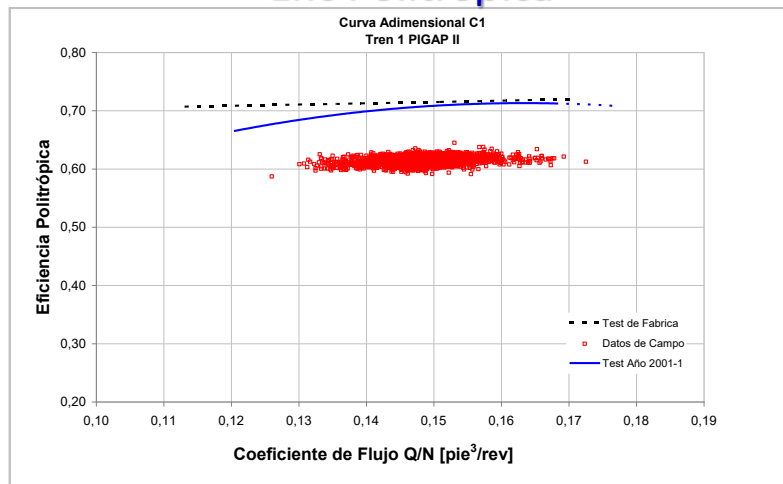
EXPERIENCIAS

Casos de aplicación

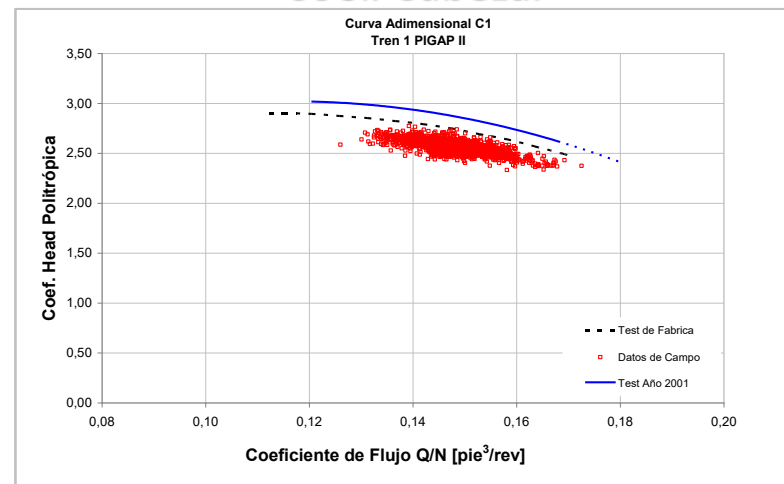
CASO DE APLICACIÓN – CASO 1

Caso 1: Datos de campo (2005) vs. “test de fábrica”, “test aceptación de campo” (2001)

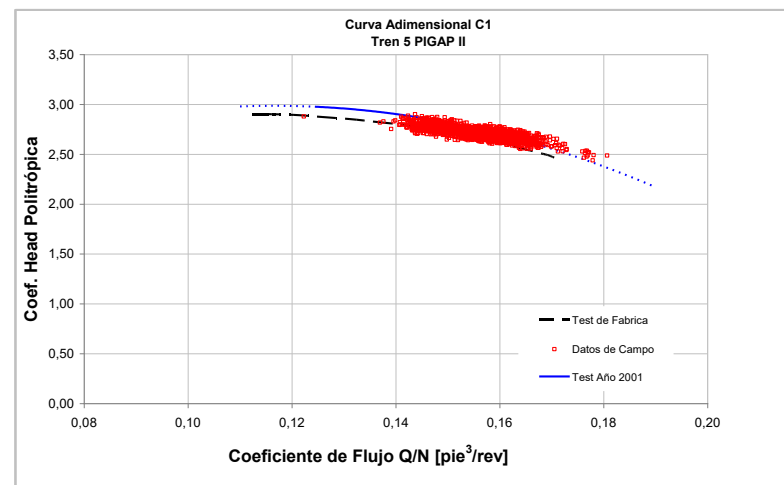
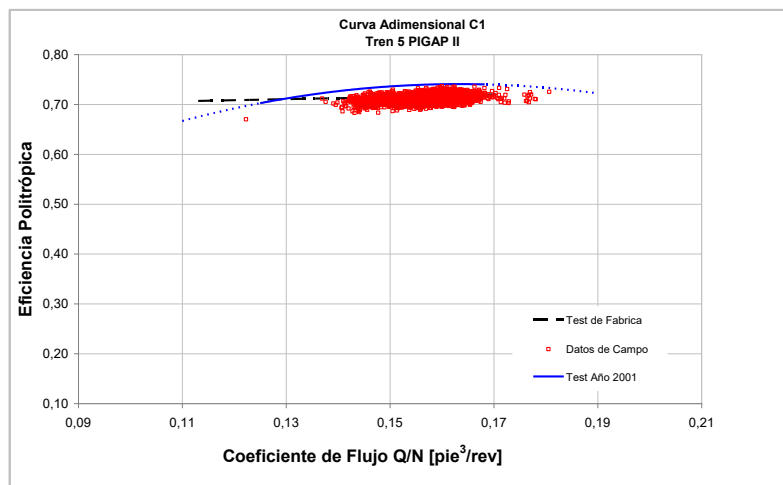
Efic Politropica



Coef. Cabezal

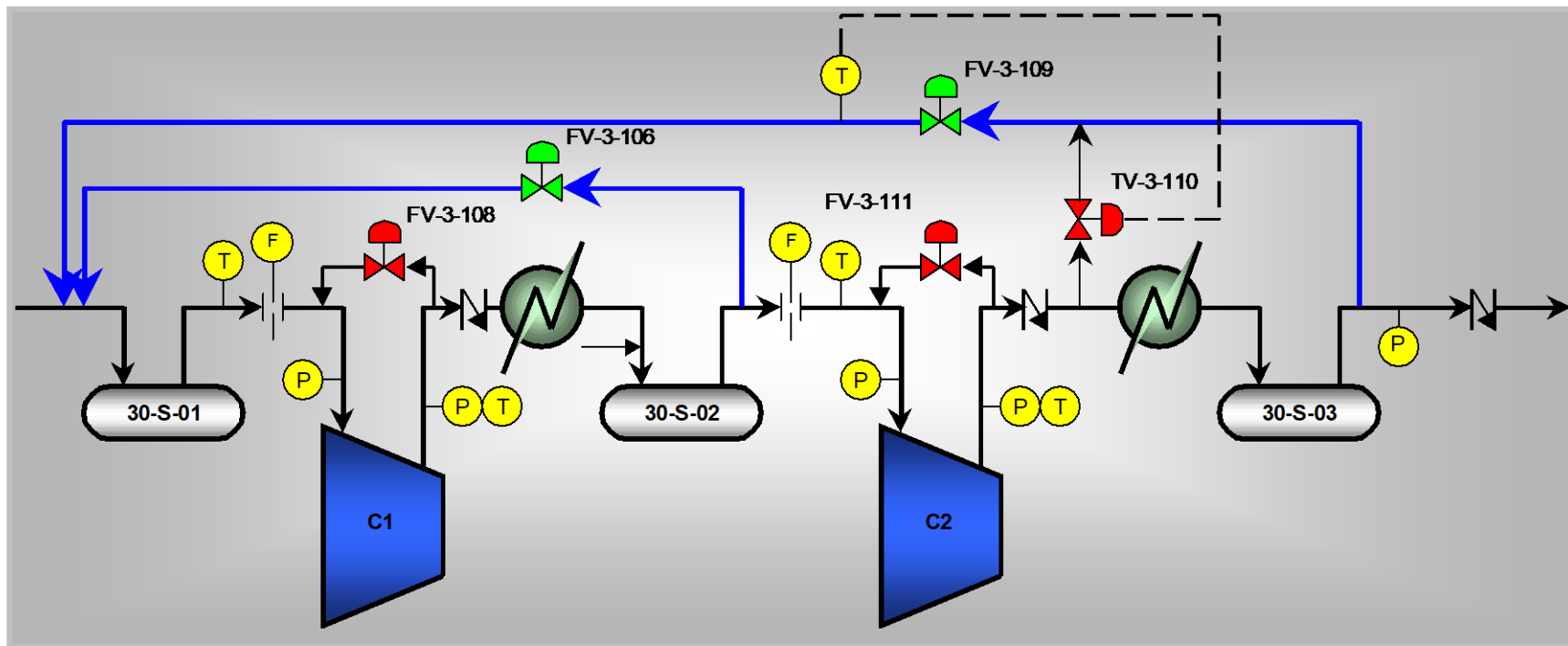


TC-5



Caso 2: Compresor ineficiente

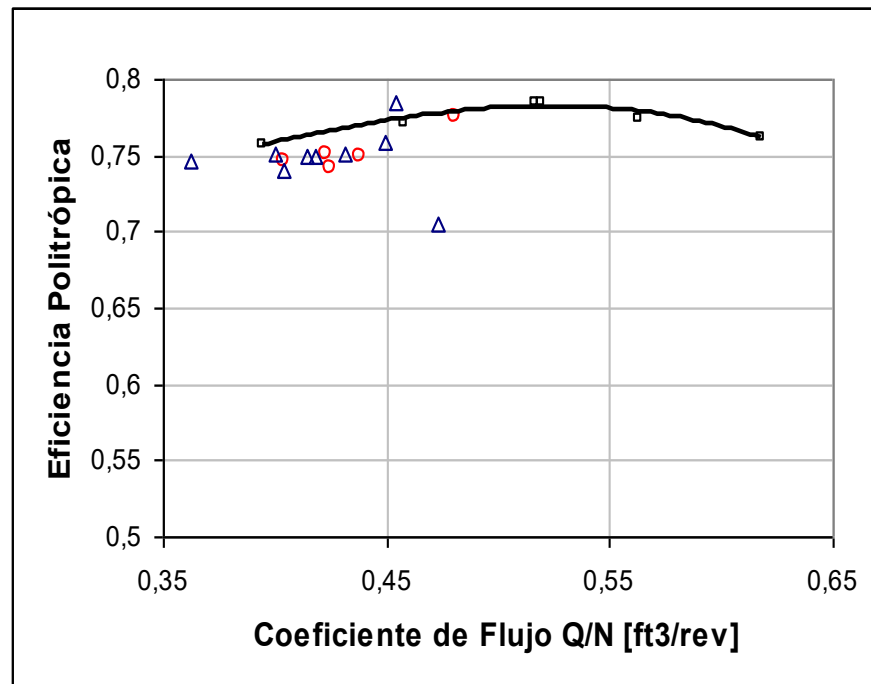
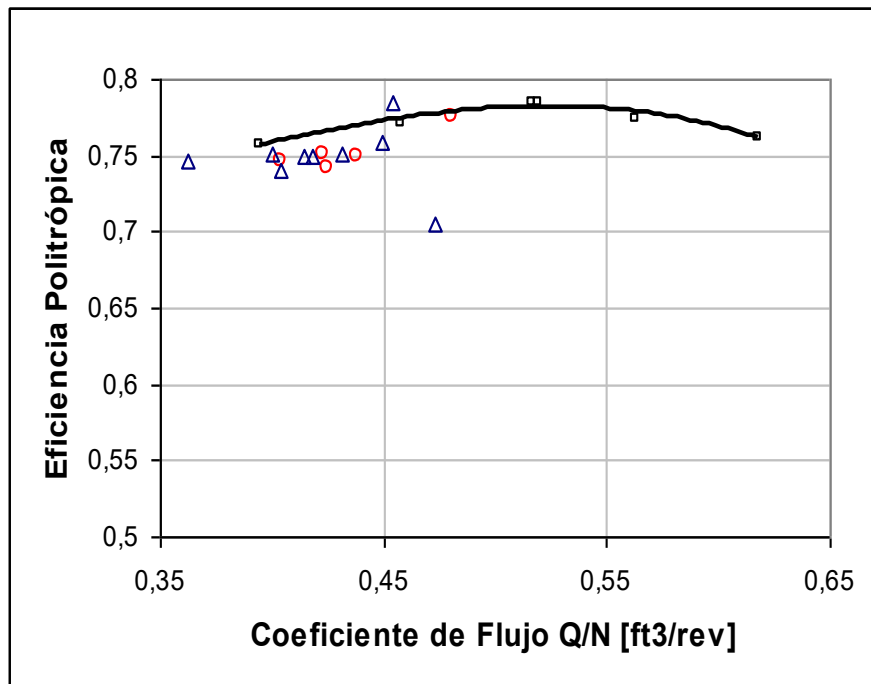
- Compresor C1 recircula continuamente y maneja 45 vs. 55 MMscfd de diseño. Debe repararse?



RECIRCULACIÓN NORMAL

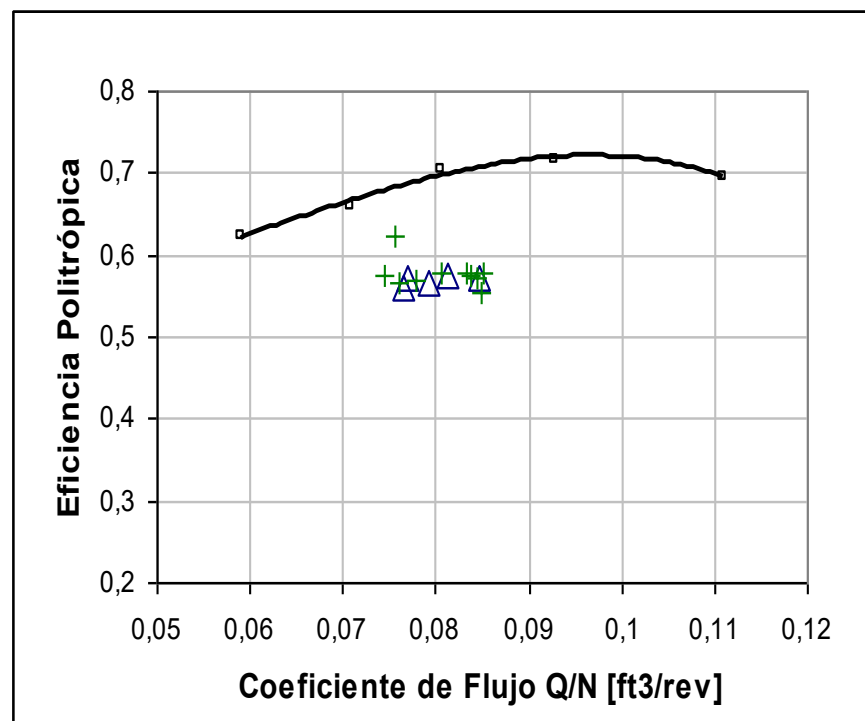
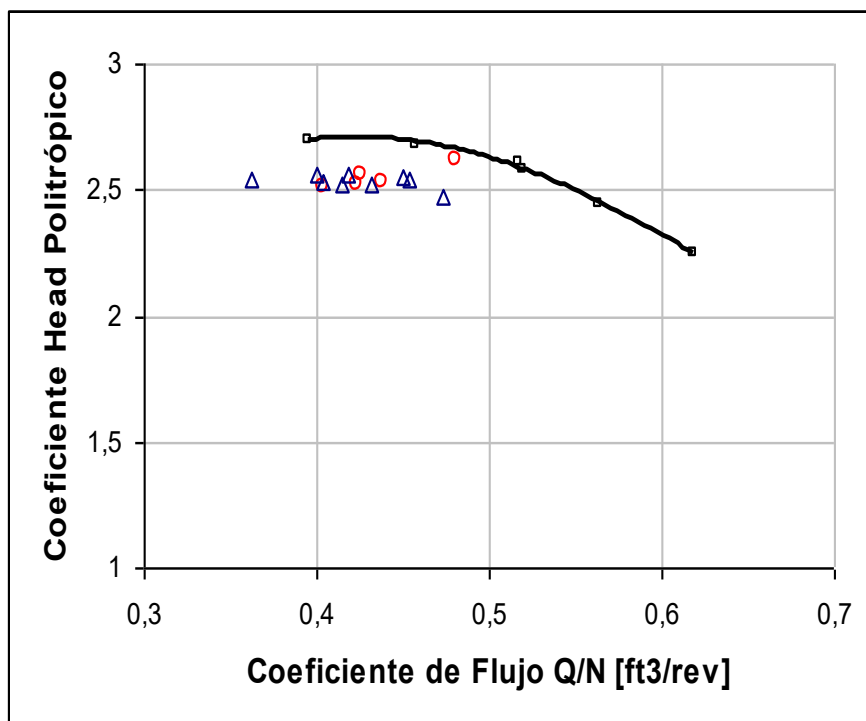
Caso 2: Compresor Ineficiente

- Cálculos del comportamiento real del C1 indican que tiene un deterioro de **2.63%** en la eficiencia y **5.59%** en el coeficiente de cabezal politrópico.



Caso 2: Compresor Ineficiente

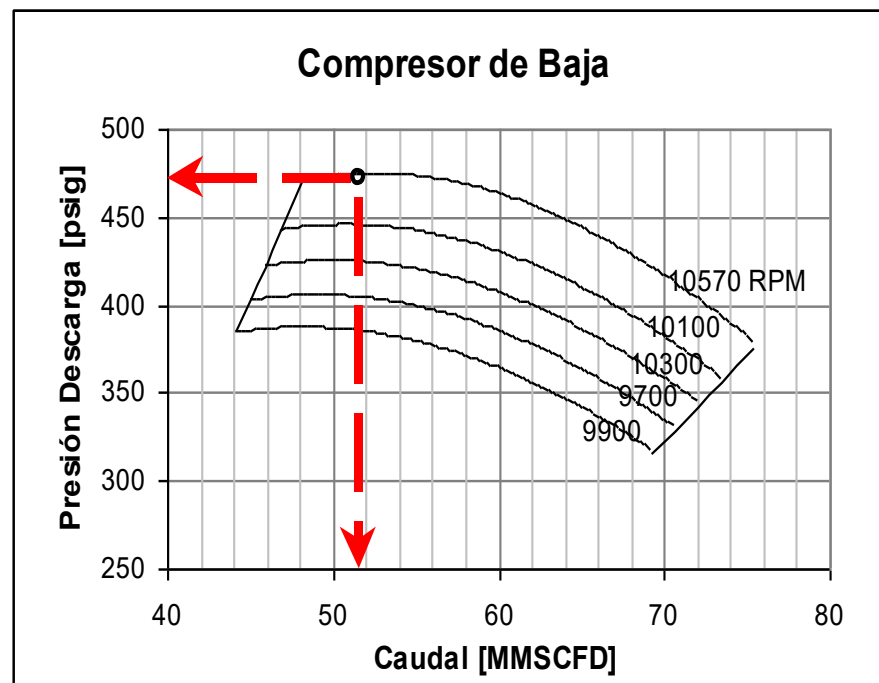
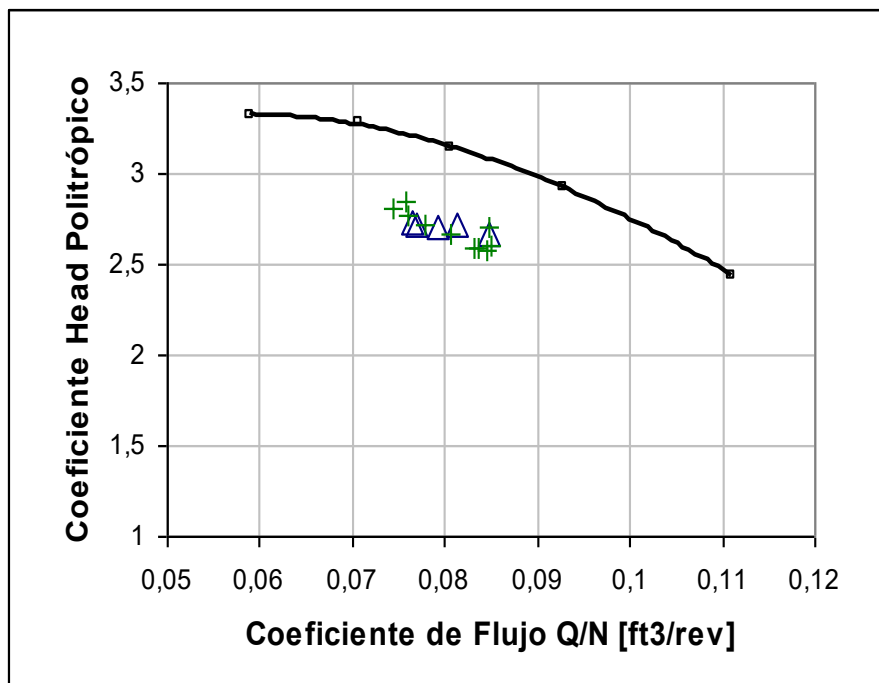
- El C2 por su parte muestra un deterioro de 17.83% en la eficiencia y 15.01% en el coeficiente cabezal.



El C2 es el que está bastante ineficiente, y no el C1 !!!!
Por Que Recircula el C1????

Caso 2: Compresor Ineficiente

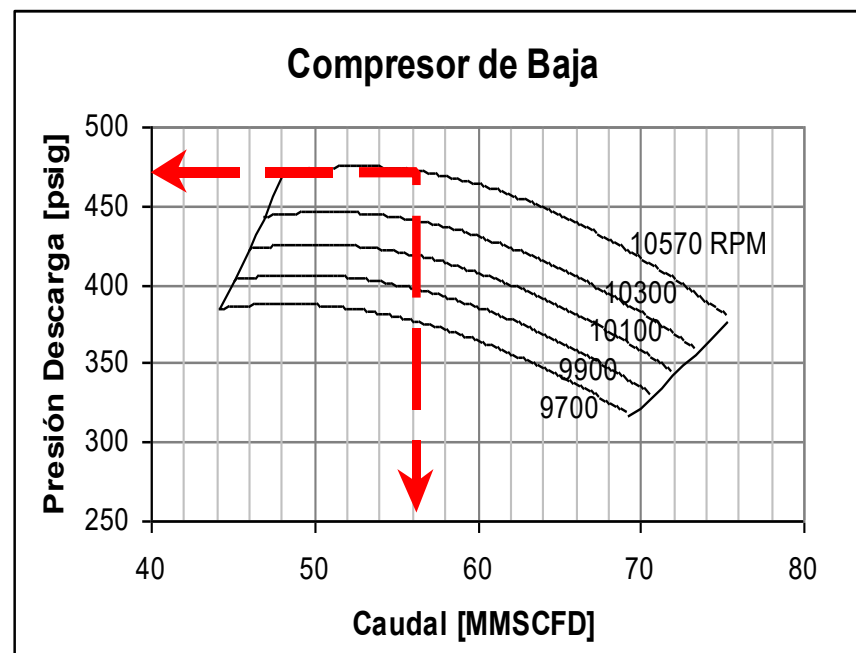
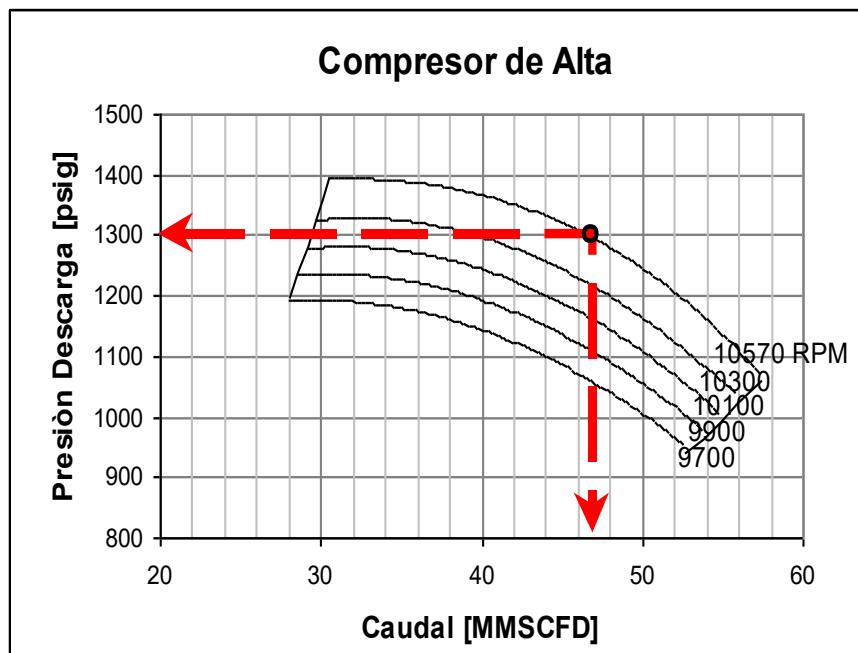
- Se generaron **mapas de comportamiento real** con puntos adimensionales obtenidos. Se ve que el C1 está en control de surge a 46 MMPCED, pero no puede manejar más flujo porque el tren está en control de velocidad (MCS). Para esta condición el C2 está bastante separado de su límite de surge.



Caso 2: Compresor Ineficiente

Que pasa si se repara el C2?

Se descargan 54,7 MMPCED y el C1 puede operar con 17% de margen a surge. El tren continúa en control de velocidad.



Caso 2: Compresor Ineficiente

Beneficios del análisis:

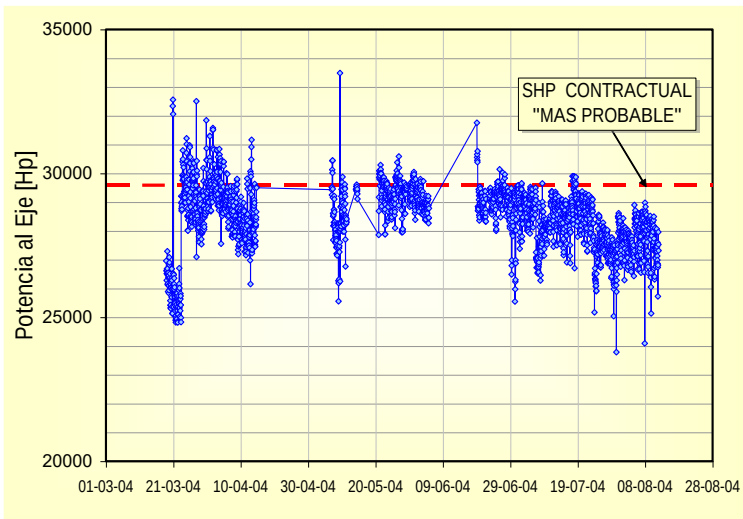
- Se evitó remoción del C1 para reparación, **ahorro de 150 Mil US\$**
- Se mejoró la disponibilidad de la planta en 5 días, evitándose el venteo de gas ó cierre de producción. Cinco días representan un venteo de 235 MMscf de gas natural, valorados en **235 Mil US\$** (a un precio del gas de 1.000 US\$/MMscf), o un cierre de producción de petróleo de 37.500 barriles, valorados en aproximadamente **3 Millones de US\$** (a un precio del crudo de 80 US\$/barril).

Beneficios de la acción de mantenimiento:

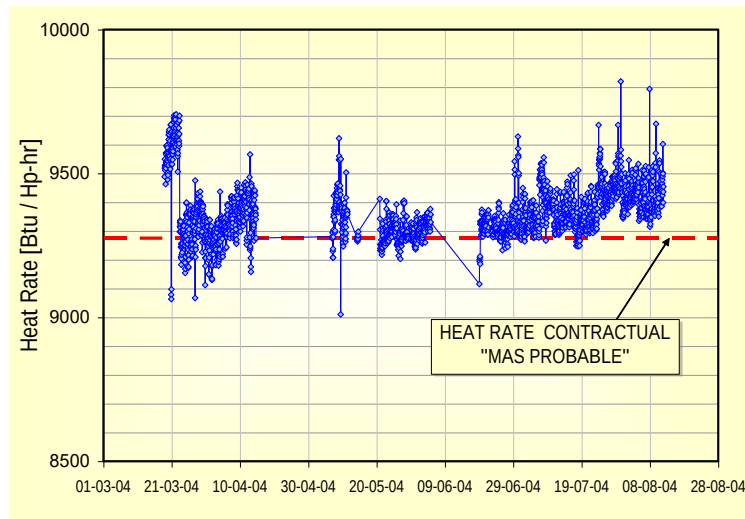
- Se incrementó en **6 MMPCED** la capacidad de compresión. Como referencia, el servicio de alquiler de este volumen de gas para las condiciones de la planta en cuestión cuesta entre **37.5 y 42.5 MUS\$/mes**

CASO DE APLICACIÓN – CASO 3

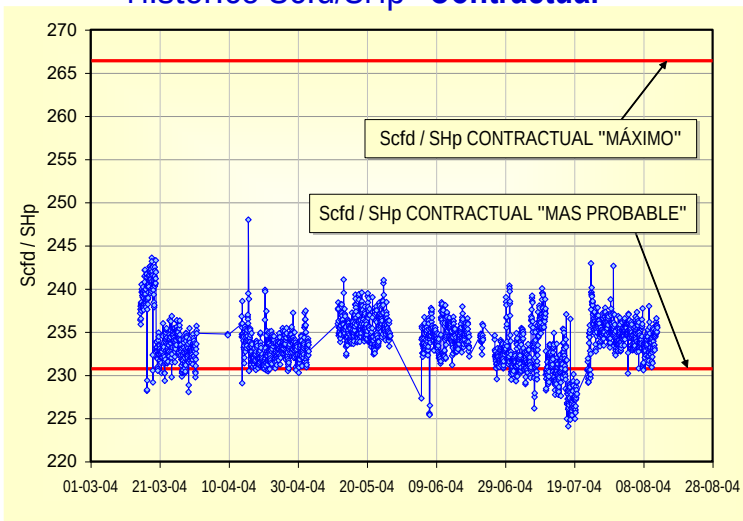
Histórico SHP “Contractual”



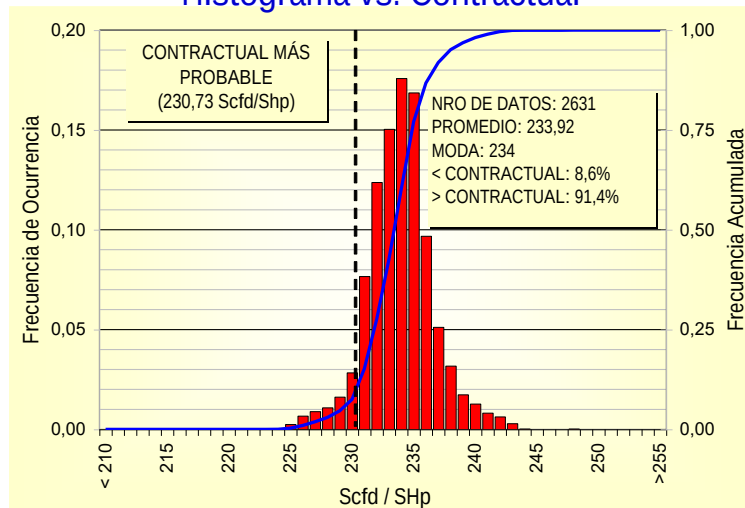
Histórico HR “Contractual”



Histórico Scfd/SHp “Contractual”

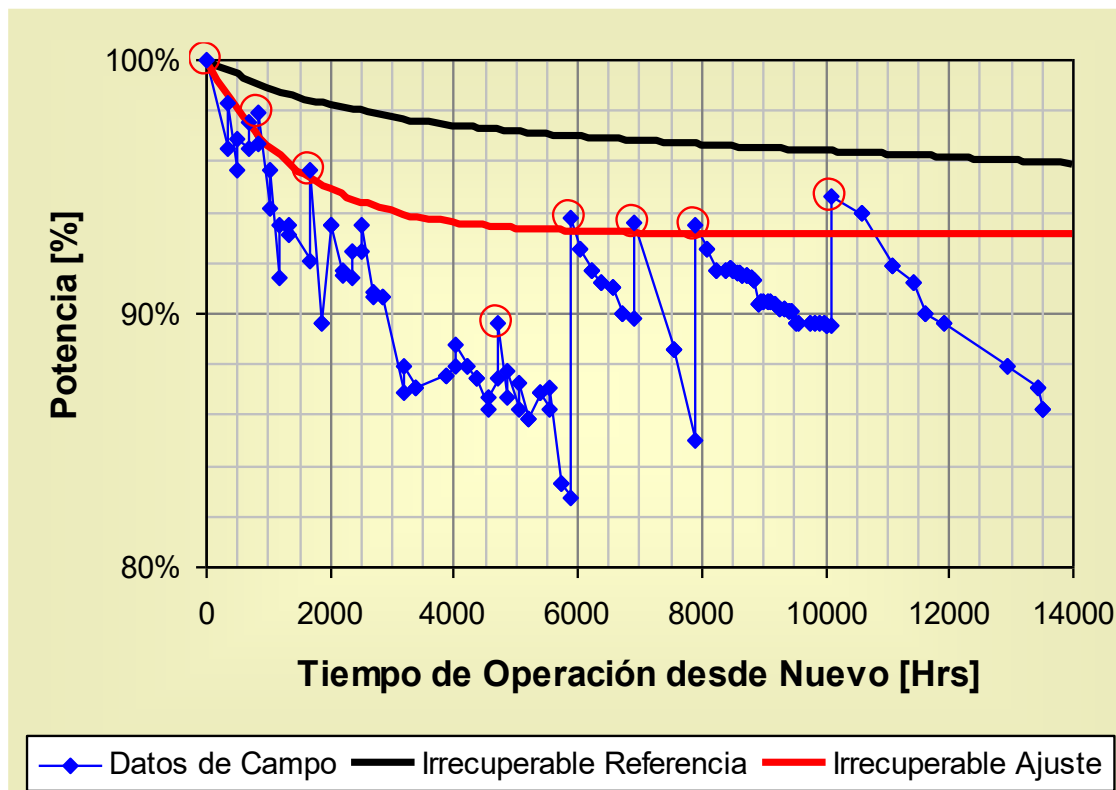


Histograma vs. Contractual



CASO DE APLICACIÓN – CASO 4

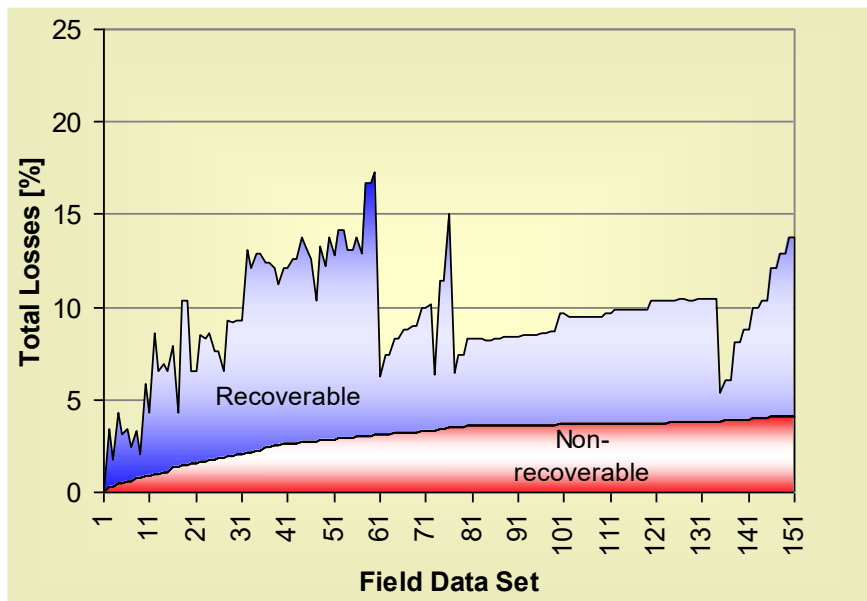
La *Figura* ilustra la variación (%) de la potencia al eje con las horas de operación, causada por el desgaste y el ensuciamiento. La curva con puntos azul muestra el comportamiento observado por una turbina aeroderivada que fue sometida a diferentes regímenes de lavados en línea y fuera de línea, en sus primeras 13500 hrs de operación [Crease, 1994]. La curva roja representa la tendencia del deterioro irrecuperable y fue obtenida por el mejor ajuste de las potencias obtenidas después de un lavado fuera de línea (puntos encerrados por circunferencias).



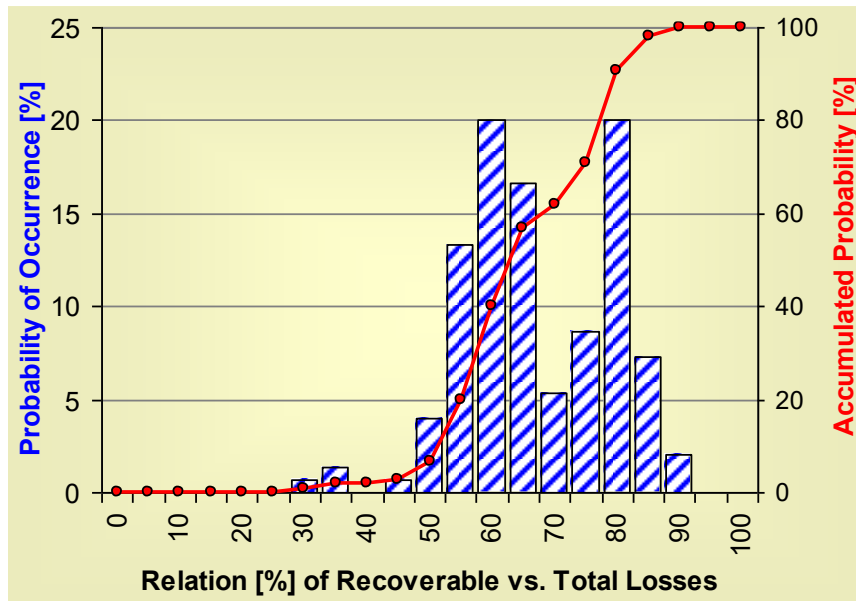
Como referencia, curva negra de caída más suave, se incluye el deterioro irrecuperable esperado de una turbina industrial de potencia similar [Nuovo Pignone, 1995]. Es claro que después del primer semestre de operación, la potencia perdida estará oscilando entre 6% y 17%, dependiendo de la cantidad y tipo de contaminantes suspendidos en el aire, la efectividad del sistema de filtración de aire y de las políticas de lavado que se adopten.

CASO DE APLICACIÓN – CASO 4

Pérdidas Recuperables vs. No Recuperable



Histograma de Razón de Pérdidas



La segregación de la pérdida de potencia en recuperable y no recuperable, y el histograma de frecuencia de la razón entre la pérdida recuperable y la pérdida total, se presenta en las figuras superiores. Puede observarse como más del 90% del tiempo las pérdidas recuperables representan el 50% al 85% del total de las pérdidas, situándose el promedio en 68%.

ACCIONES

Preventivas, Predictivas y de Diseño

Sistema de filtración de aire:

- ⌚ **Inspección periódica (visual y NDT):** internos y externos de la estructura, láminas, soportes de filtros, soldaduras, filtros, etc.
- ⌚ **Reemplazo de filtros:** por tiempo o condición, etc. Monitoreo del diferencial de presión a través de los filtros como técnica predictiva.
- ⌚ **Diseño:**
 - ⌚ **Orientación caseta – vientos predominantes apropiada:** asegurar que las casetas de admisión de aire no quedan en el trayecto de los venteos de los vapores de aceite, gas y otros).
 - ⌚ **Sistemas de filtración de alta eficiencia en varias etapas** con inerciales, coalescentes, prefiltros, y filtros de alta eficiencia.
 - ⌚ **Casetas en acero inoxidable:** justificadas por análisis de costo en ciclo de vida.

Limpieza del compresor axial de la turbina:

- Monitoreo de variables asociadas al performance: eficiencia, potencia, temperatura de gases de escape, etc: como herramienta para decidir el momento óptimo (frecuencia) en el cual se deben efectuar los lavados en línea y fuera de línea de las turbinas.
- Tipo de detergente o sustancia de limpieza: acorde con el tipo de contaminante.
- Combinación óptima de lavados: con detergente y sólo agua
- Diseño:
 - Sistemas de lavado: permanentes o portátiles, accionamiento local, a distancia o por la lógica de control (hora, condición, etc.)

Sistema de tratamiento de gas combustible:

- Diseño y mantenimiento adecuado: para eliminar contaminantes sólidos (filtrado), margen de sobrecalentamiento, monitoreo de distribución de temperatura en combustores para definir limpieza de inyectores de gas, etc.

CONCLUSIONES

CONCLUSIONES

- En el caso particular de México **los costos energéticos son el componente predominante** dentro de la estructura de costos capex-opex de los turbocompresores (y turbogeneradores).
- Con los sistemas, políticas y planes de gestión de la energía apropiados, orientados a la mejora de la eficiencia de los turbocompresores y los turbogeneradores, se pudieran obtener **ahorros potenciales en el país del orden de 550 MM US\$/año, por concepto de reducción del consumo del gas combustible**. El escenario toma relevancia cuando se considera que en la actualidad México importa alrededor del 60% del gas natural consumido.
- Las **pruebas de eficiencia son la herramienta predictiva fundamental** sobre la cual se sustenta la medición y el monitoreo de la eficiencia y el consumo energético de los turbocompresores (y turbogeneradores).



CONGRESO DE
MANTENIMIENTO
& CONFIABILIDAD
M É X I C O

*Dime y lo olvido,
enséñame y lo recuerdo,
involúcrame y lo aprendo*

B. Franklin



CONGRESO DE
MANTENIMIENTO
& CONFIABILIDAD
M É X I C O | 14.
EDICIÓN

¡GRACIAS!

Enrique I. González Henríquez

enriquegonzalez@eymsolutions.com

Agradecemos a todos los participantes