

Cambio de tecnología, estandarización y modularización de equipos de bombeo de inyección de agua para disminuir pérdidas de producción asociada e incrementar eficiencia energética.

Gabriel Marcelo Costarelli

Empresa YPF S.A.

Mail: gabriel.costarelli@ypf.com

Sinopsis

En las plantas de inyección de los yacimientos operados por YPF en la provincia de Mendoza, se utilizan generalmente bombas alternativas o bombas centrífugas multietapas. Dicho parque de bombas tiene una antigüedad que va desde los 15 a los 30 años, donde la tasa de falla es muy alta debido al desgaste de los elementos internos del equipo, sumado a corrosión/erosión.

Dada la necesidad de contar con muy alta disponibilidad de estos equipos, cada falla o paro no programado repercute directamente en pérdidas de producción asociadas.

La presentación mostrará un proyecto en ejecución cuya finalidad es el incremento de disponibilidad y confiabilidad de los equipos con la correspondiente disminución de pérdidas de producción asociada. La ejecución se realizará por medio de la estandarización de las bombas centrífugas, motores eléctricos, variadores de velocidad, transformadores, sistemas de control, etc.

Para suplir las diferencias de presiones y caudales existentes entre los distintos reservorios, se plantea la colocación de equipos modulares para adaptarse a las diferentes presiones y la variación de caudales se puede manejar por medio de variadores de velocidad.

Se analizará además una alternativa para nuevos desarrollos de recuperación secundaria, donde la descentralización de las plantas de inyección puede incrementar la vida remanente de las cañerías.

Por último, veremos que la ventaja del sistema estandarizado sirve también para ahorro energético, por la pérdida de eficiencia en las bombas, que en algunos casos ronda el 15 al 20%.

Introducción:

En los últimos 5 años, en las plantas de inyección de agua para Recuperación Secundaria de los yacimientos operados por YPF en Malargüe, provincia de Mendoza, se observó un incremento sostenido de la tasa de falla en bombas de inyección de agua, por lo cual se analizaron estadísticas de paros, pérdidas de producción asociadas y causas de falla para tomar acciones correctivas.

Se evaluaron alternativas y se decidió generar un plan de reemplazo de las bombas por equipos nuevos, donde se seleccionó modelo, configuración, tipo de protecciones, diseño de cañerías, etc. con el propósito de armar un proyecto integral y estándar en todas las plantas.

Este sistema es aplicable para la mayoría de los yacimientos, independiente de la configuración de su sistema de inyección e incluso es adaptable para el transporte de crudo neto o semi neto.

Desarrollo

Se lista parque de equipos de bombeo y se sectoriza por funciones (bombeo de transferencia de agua, bombeo de crudo, etc.) y por clasificación de tipo de bomba.

Planta/Batería	Equipo	Modelo bomba	Tipo
Planta Tratamiento Gas	736298701	GOULDS-SCHMITT 3735 M	Centrífuga
	736298702	GOULDS-SCHMITT 3735 M	Centrífuga
	130149	BOMBA 804A	Centrífuga
	130152	BOMBA 804B	Centrífuga
	BBA000056	BOMBA	Centrífuga
	EI050549	PEERLESS PUMP F1-820-AM-BF	Centrífuga
	77003	SCHMITT Y CIA HIPRESS HI-250-1C	Centrífuga
	77004	SCHMITT Y CIA HIPRESS HI-250-1C	Centrífuga
	BBA000053	BOMBA A PISTON	Alternativa
	130145	BOMBA ALTERNATIVA UNION	Alternativa
	130147	BOMBA ALTERNATIVA UNION	Alternativa
	130134	BOMBA CENTRIFUGA	Centrífuga
	130136	BOMBA CENTRIFUGA	Centrífuga
	BBA000054	BOMBA	Centrífuga
	BBA000055	BOMBA	Centrífuga
Planta Inyección Agua CD	122675	SIAM J-275 MCA	Alternativa
	125908	SIAM J-275 MCA	Alternativa
	43595	SIAM J-275 MCA	Alternativa
Planta Tratamiento Crudo	BBA000036	BBA CENTRIFUGA ACER 220V/14A	Centrífuga
	113409	BBA KAYAK	Centrífuga
	88065	BBA KAYAK 8X6	Centrífuga
	LV00061	SIAM J-275	Alternativa
	BBA000033	STORK SP 50-100	Alternativa
	1548	STORK SP 50-100	Alternativa
	1303	STORK SP 50-100 (0615)	Alternativa
	522	STORK SP 50-100	Alternativa
	BBA000034	BBA ELECTROSUMERGIBLE	Centrífuga
	BBA000035	BBA ELECTROSUMERGIBLE	Centrífuga
	25414	GADNER DENVER "FXQ" 172	Alternativa
	13373/1	KSB/CSB RDL150-44	Centrífuga
	13373/2	KSB/CSB RDL-150-44	Centrífuga
Planta Transferencia Agua Cerro Fortunoso	249	SIAM J-165 - TRIPLEX	Alternativa
Planta Inyección Agua Loma Alta sur	925006	SIAM J-165 - TRIPLEX	Alternativa
	100-OMK	SIAM J-275 MCA	Alternativa
	112334	SIAM J-275 MCA	Alternativa
	122238	SIAM J-275 MCA	Alternativa
Batería 1 CF	63514	BORNEMAN	Alternativa
	106173	BOMBA ALTERNATIVA STORK SP 50-100	Alternativa
	90012	BOMBA ALTERNATIVA STORK SP 50-100	Alternativa

Batería 2 CF	855	STORK SP 50-100	Alternativa
	654	STORK SP 50-100	Alternativa
	BBA000037	STORK SP 50-100	Alternativa
Batería 1 Loma Alta Sur	453	STORK SP 50-100	Alternativa
	454	STORK SP 50-100	Alternativa
	1605	STORK SP 50-100	Alternativa
	1585	STORK SP 50-100	Alternativa
Batería 2 Loma Alta Sur	127-18	OIL WELL A368 DUPLEX	Alternativa
	25411	GADNER DENVER	Alternativa
Batería 1 Los Cavaos	641	STORK SP 50-100	Alternativa
	492	STORK SP 50-100	Alternativa
	122113	STORK SP 50-100 (0865)	Alternativa
	13403/561	KSB/CSB WK 125/2	Centrifuga
Planta Inyección Agua Los Cavaos	106860	SIAM J-275 MCA	Alternativa
	171600126-6-84	SIAM J-275 MCA	Alternativa
	LV00063	SIAM J-275	Alternativa
Batería 2 Los Cavaos	864	STORK SP 50-100	Alternativa
Batería 3 Los Cavaos	STMDM004	STORK SP 50-100	Alternativa
Planta Inyección Agua Malal del medio	1716001	SIAM J-275 MCA	Alternativa
	SIRG001	SIAM J-275 MCA	Alternativa
Batería 1 Malal del medio	68543	STORK SP 50-100	Alternativa
	68545	STORK SP 50-100	Alternativa
Batería 1 Pampa Palauco	1554	STORK SP 50-100	Alternativa
	112452	STORK SP 50-100 (652)	Alternativa
Batería 1 Río Grande	105014	STORK SP 50-100 (0104)	Alternativa
	1677	STORK SP 50-100	Alternativa
	102	STORK SP 50-100	Alternativa
Batería RG28	BBA000038	STORK SP 50-100	Alternativa
Planta Inyección Agua CF	248	SIAM J-165 - TRIPLEX	Alternativa
Batería 1 Loma de la mina	BBA000039	STORK SP 50-100	Alternativa

Con el parque de bombas identificado, se deben analizar las estadísticas de fallos para poder evaluar el Tiempo Medio entre Fallas (TMEF), determinar la confiabilidad histórica y la tendencia para poder predecir la confiabilidad a futuro.

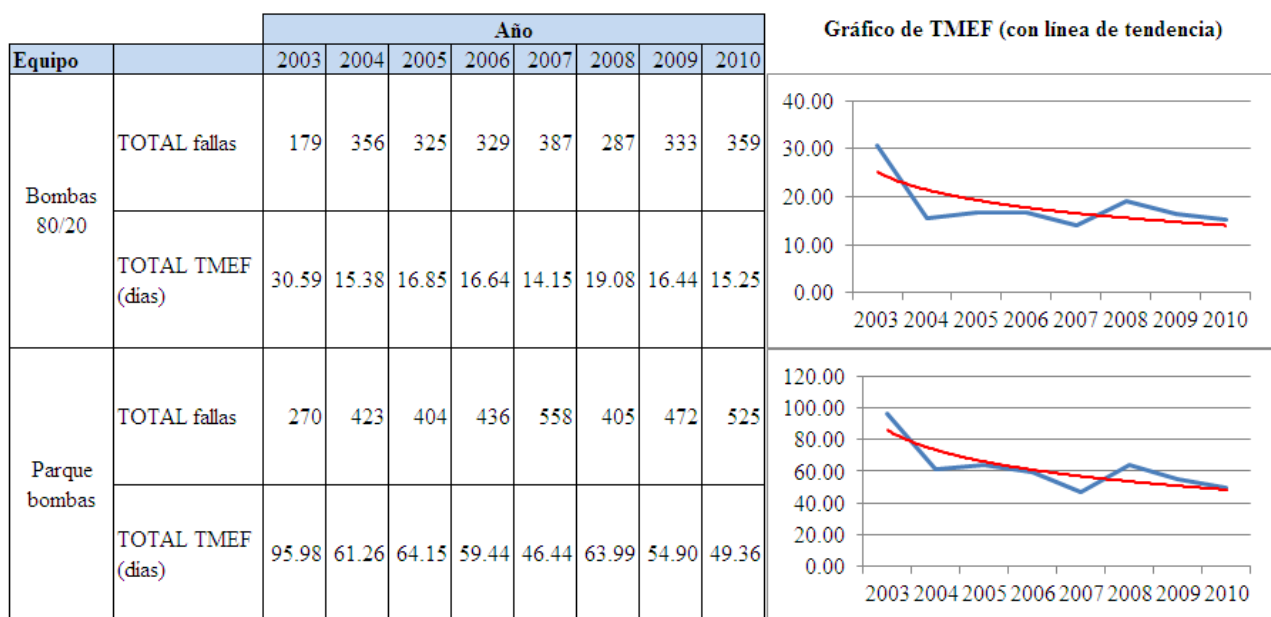
Haciendo un análisis 80/20, se identifican que las siguientes 12 bombas alternativas han tenido aproximadamente el 75,5% de las fallas totales de los 71 equipos que conforman el parque.

Planta/Batería	N° Equipo	Modelo bomba	Fallas (2003-2010)
Planta Inyección Agua Los Cavaos	106860	SIAM J-275 MCA	452
Planta Inyección Agua CD	122675	SIAM J-275 MCA	348
Planta Inyección Agua Malal del medio	1716001	SIAM J-275 MCA	314
Planta Inyección Agua CD	43595	SIAM J-275 MCA	252
Planta Inyección Agua CD	125908	SIAM J-275 MCA	213

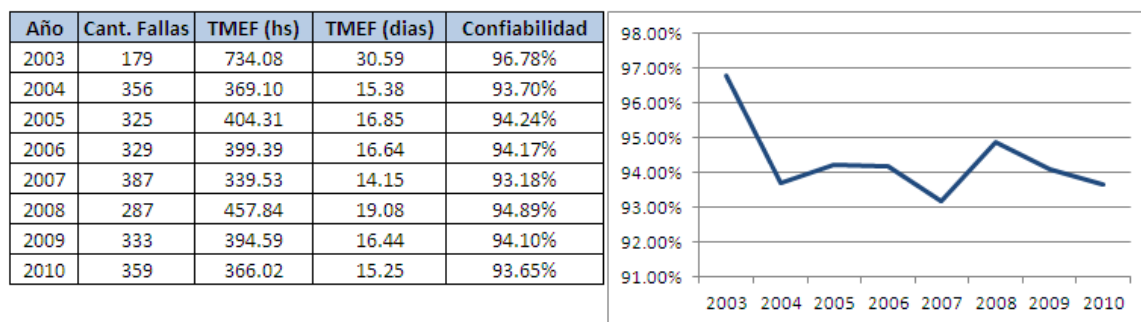
Planta Inyección Agua Los Cavaos	171600126-6-84	SIAM J-275 MCA	211
Planta Inyección Agua Loma Alta sur	122238	SIAM J-275 MCA	170
Planta Inyección Agua Los Cavaos	LV00063	SIAM J-275 MCA	162
Planta Inyección Agua CF	248	SIAM J-275 MCA	133
Planta Inyección Agua Malal del medio	SIRG001	SIAM J-275 MCA	107
Planta Transferencia Agua Cerro Fortunoso	249	SIAM J-165 - TRIPLEX	98
Planta Inyección Agua Loma Alta sur	100-OMK	SIAM J-275 MCA	95

Definidos los equipos-problema, se obtienen datos estadísticos para evaluar su desempeño en los últimos años

- Tiempo medio entre fallas (TMEF)

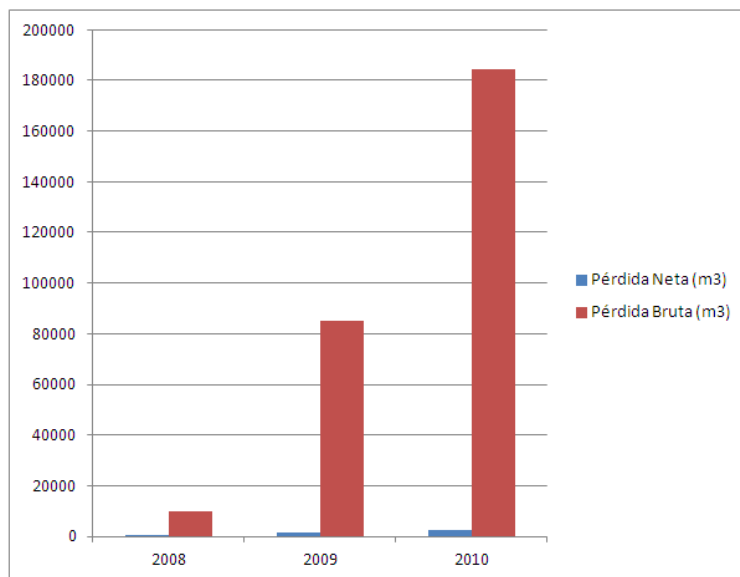


- Confiabilidad



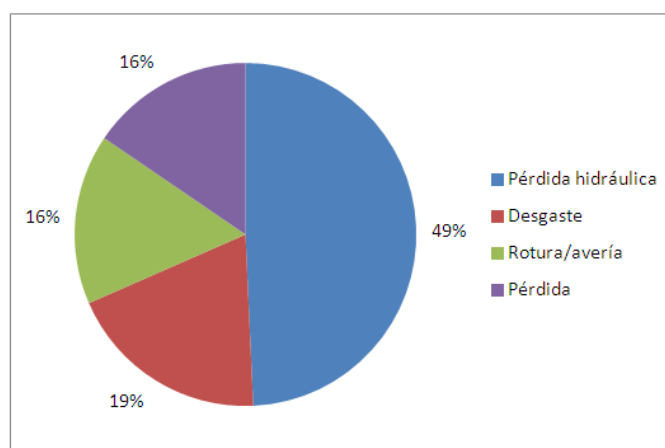
- Pérdida producción asociada (Desperfectos mecánicos)

Año	Pérdida Neta (m3)	Pérdida Bruta (m3)
2008	216.42	10074.05
2009	1470.28	85324.56
2010	2381.52	184474.28
Total general	4068.22	279872.89



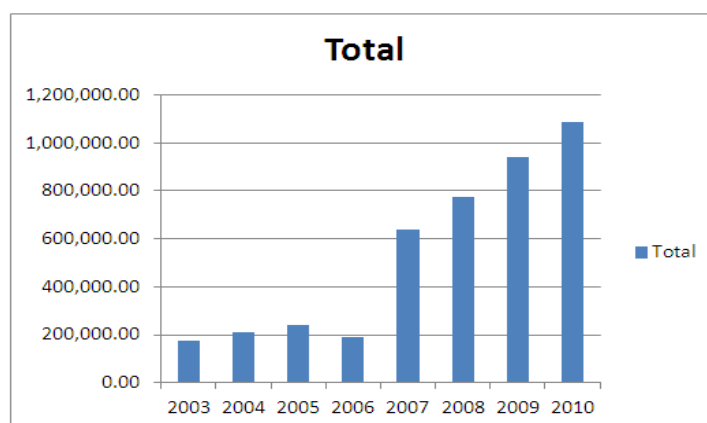
- Modo de falla (Estadística 2003-2010, seleccionando los 4 principales modos)

Tipo desperfecto	Cantidad
Pérdida hidráulica	1169
Desgaste	454
Rotura/avería	382
Pérdida	367



- Costos de reparación (Estadística 2003-2010 solo para desperfectos mecánicos de bombas)

Año	Costo \$ARG
2003	174,311.86
2004	211,632.66
2005	237,963.22
2006	188,232.24
2007	638,311.95
2008	776,065.52
2009	939,694.83
2010	1,086,401.90
Total general	4,252,614.18



Con esta información se pueden hacer las siguientes determinaciones:

- El TMEF es cada vez menor, aunque tiende a estabilizarse en un valor muy bajo, con lo que la confiabilidad ha disminuido notablemente.
- Las pérdidas de producción se han incrementado a valores muy elevados e inaceptables para los campos donde están estos equipos (6,6 m3/día – 41,5 BPD)
- El costo de reparación también se incrementó en forma lineal en los últimos años y por los modos de falla (desgaste) se infiere que el parque de equipos está con el ciclo de vida cumplido. Esto indica que las fallas se incrementarán en forma exponencial en los próximos años.

A partir de estas determinaciones surgen las siguientes preguntas:

Seguir reparando o cambiar? Reemplazo 1x1 o estandarizar? Configuración con 1 equipo, 2 equipos? Reserva?

Toma de decisiones:

Se analiza como caso de negocio el seguir reparando o la compra de equipamiento nuevo y se define esta última, teniendo en cuenta el decremento estimado de la confiabilidad y el incremento de los costos de reparación y las pérdidas de producción asociadas.

Se define el reemplazo de los equipos de las plantas de inyección de agua:

Planta	Caudal	Presión de Descarga	Presión de Aspiración (ANPA disponible)	Metros snm	Cantidad bombas
Cerro Divisadero	1.800 m3/d	120 Kg/cm2g	12 mts	1600	3
Loma Alta	2.400 m3/d	90 Kg/cm2g	8 mts	1900	4
Los Cavaos	2.000 m3/d	100 Kg/cm2g	7 mts	1700	4
Malal del medio	700 m3/d	100 Kg/cm2g	10 mts	1700	2
Cerro Fortunoso	400 m3/d	120 Kg/cm2g	8 mts	1600	2

Los datos comunes son:

Fluido: Agua de Formación

Servicio: Continuo

Temperatura 65 ° C

Densidad 1.03 Kg/m3

Clasificación de Área: No peligrosa

Se establece que los nuevos equipos serán bombas centrífugas en lugar de bombas alternativas. Los motivos son menor tasa de falla, versatilidad de operación y gran cantidad de proveedores de equipos y repuestos en el mercado nacional.

También se determina que se estandarizarán todos los equipos, con la premisa de tener mayor mantenibilidad, teniendo en cuenta que se unificarán los repuestos en almacén y que el personal operador y mantenedor conocerán el equipamiento en profundidad.

Esto se logrará con la versatilidad que tienen las bombas centrífugas en función del cambio de velocidad, lo que permite la variación de caudal, presión y potencia teniendo en cuenta los parámetros determinados en la ley de afinidad:

$$\frac{N1}{N2} = \frac{Q1}{Q2}$$

$$\left(\frac{N1}{N2}\right)^2 = \left(\frac{H1}{H2}\right)^2$$

$$\left(\frac{N1}{N2}\right)^3 = \left(\frac{P1}{P2}\right)^3$$

Donde:

N1= velocidad condición 1 (rpm)

H1= altura condición 1

N2= velocidad condición 2 (rpm)

H2= altura condición 2

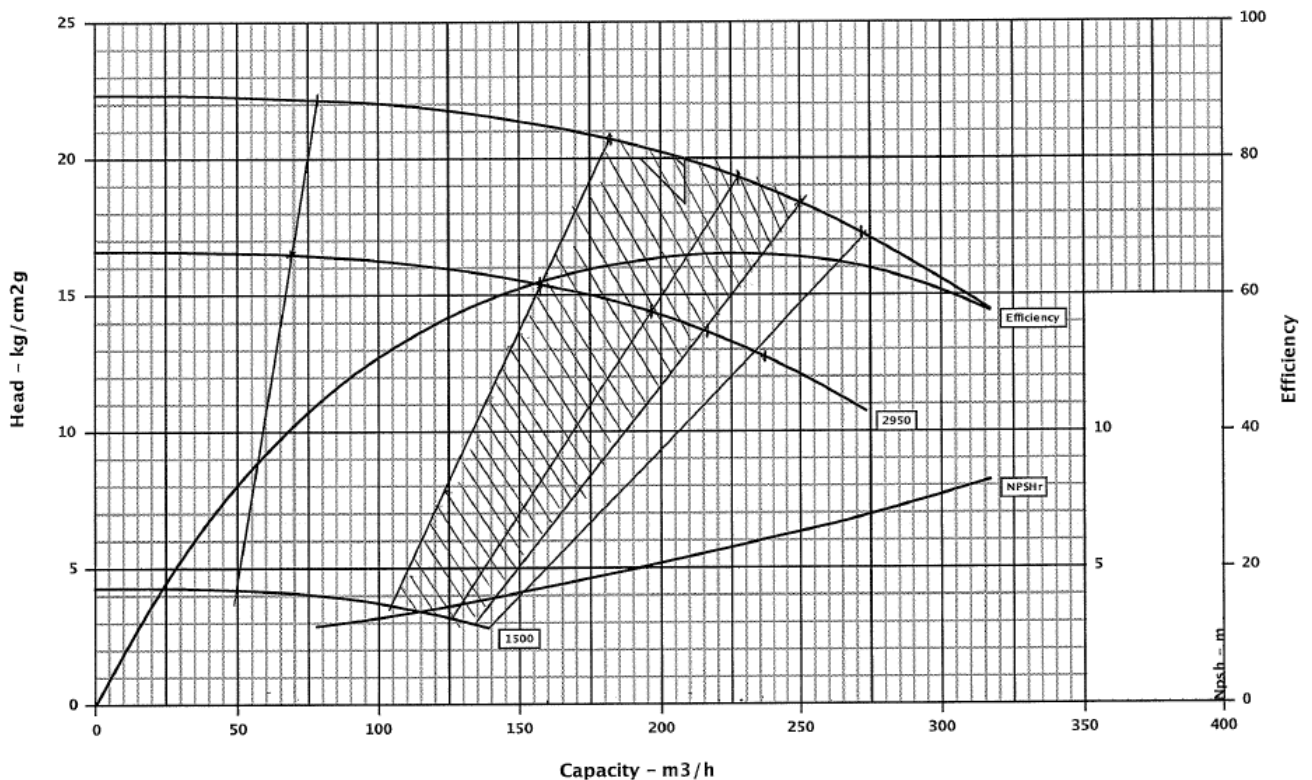
Q1= caudal condición 1

P1= potencia condición 1

Q2= caudal condición 2

P2= potencia condición 2

En la siguiente figura vemos un ejemplo de la ventana de operación de las curvas de desempeño de una bomba centrífuga, donde variando el rango de velocidades se puede observar la amplitud de condiciones operativas.



Se define la nueva configuración de equipos de la siguiente manera:

Planta	Caudal	Presión de Descarga	Cantidad bombas	Fecha puesta en marcha
Cerro Divisadero	1.800 m3/d	120 Kg/cm2g	2	Enero 2012
Loma Alta	2.400 m3/d	90 Kg/cm2g	3	Diciembre 2012
Los Cavaos	2.000 m3/d	100 Kg/cm2g	2	Marzo 2011
Malal del medio	700 m3/d	100 Kg/cm2g	1	Agosto 2013
Cerro Fortunoso	400 m3/d	120 Kg/cm2g	1	Abril 2013

Con este cronograma se proyectó una obra general para adaptar las instalaciones de superficie en todas las plantas, generar contratos y comprar materiales, a modo de poder ejecutar las modificaciones con los equipos actuales en marcha y prever todas las conexiones de cañería, energía e instrumentación para realizarse en un paro de planta no mayor a 8 o 12 hs a con el objetivo de no afectar producción.

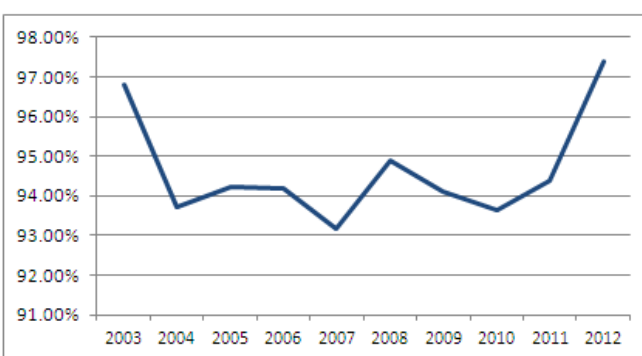
Se analizaron varias alternativas y se optó por un sistema de leasing para adquirir las bombas centrífugas, con la ventaja de evitar grandes erogaciones al comienzo del proyecto.

Conclusiones

Análisis de resultados del proyecto a la fecha de análisis (diciembre 2012), con tres plantas en marcha:

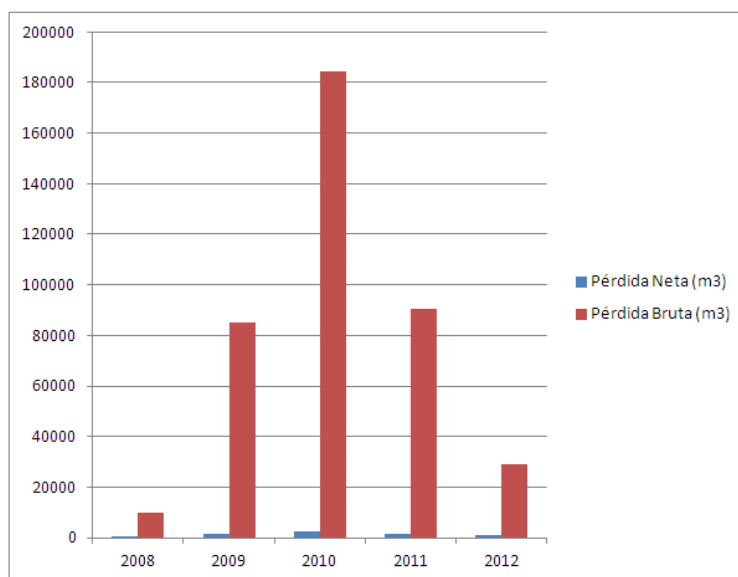
- Incremento de Tiempo medio entre fallas (TMEF) y Confiabilidad

Año	Cant. Fallas	TMEF (hs)	TMEF (días)	Confiabilidad
2003	179	734.08	30.59	96.78%
2004	356	369.10	15.38	93.70%
2005	325	404.31	16.85	94.24%
2006	329	399.39	16.64	94.17%
2007	387	339.53	14.15	93.18%
2008	287	457.84	19.08	94.89%
2009	333	394.59	16.44	94.10%
2010	359	366.02	15.25	93.65%
2011	317	414.51	17.27	94.37%
2012	145	906.21	37.76	97.39%



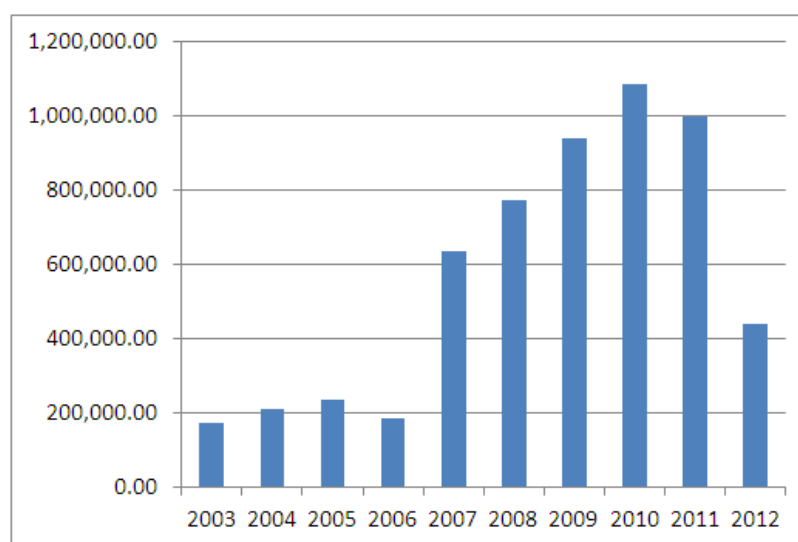
- Disminución de pérdidas de producción asociada (Desperfectos mecánicos)

Año	Pérdida Neta (m3)	Pérdida Bruta (m3)
2008	216.42	10074.05
2009	1470.28	85324.56
2010	2381.52	184474.28
2011	1604.39	90569.66
2012	784.77	29099.9
Total general	6457.38	399542.45



- Disminución de costos de reparación

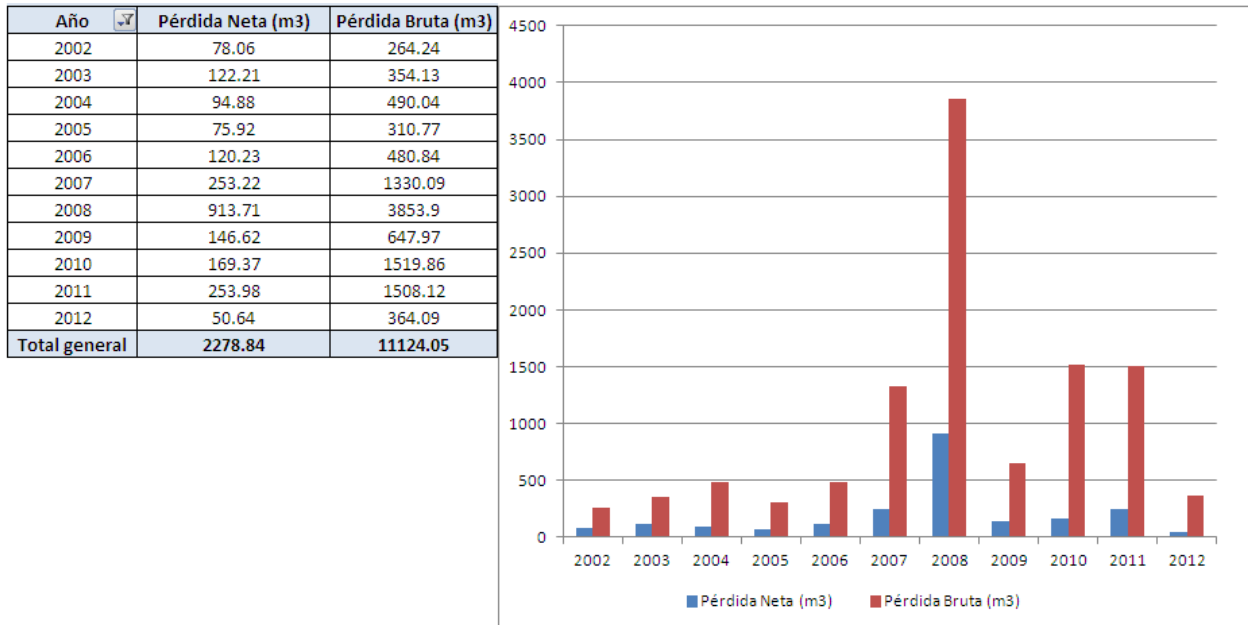
Año	Costo \$ARG
2003	174,311.86
2004	211,632.66
2005	237,963.22
2006	188,232.24
2007	638,311.95
2008	776,065.52
2009	939,694.83
2010	1,086,401.90
2011	997,966.56
2012	439,085.45
Total general	5,689,666.19



- Disminución de fallas en cañerías de conducción

Otro dato relevante que se observó analizando las estadísticas de pérdidas es la afectación que tenía el bombeo alternativo en las fallas de cañerías por fatiga dada por las pulsaciones cíclicas, especialmente en las uniones soldadas y en las válvulas.

En el gráfico siguiente se puede visualizar como disminuyen las pérdidas asociadas a cañerías de conducción de agua y petróleo a partir del cambio de sistema.



- Conclusión anexa 1: Descentralización del bombeo con transferencia en media presión

Para casos como el analizado o para proyectos nuevos de Recuperación Secundaria, la alternativa de descentralizar el bombeo basado en la versatilidad y modularidad de las bombas centrífugas, incrementaría la vida remanente de las cañerías de transferencia en forma drástica.

Para implementar esta mejora se debe bombear el fluido en media presión desde la Planta de Tratamiento de Agua hasta los “satélites o distribuidores” de inyección, en donde se montan las bombas que a partir de ese punto incrementarán la presión del fluido hasta el valor definido según el plan de inyección.

El principal requerimiento o debilidad en la implementación de este cambio es la factibilidad técnico-económica de energía eléctrica en dichas locaciones y el comportamiento hidráulico de la cañería de transferencia.

Haciendo un análisis teórico utilizando el modelo planteado en la normativa API 570 Inspección, reparación, cambios y reclasificación de sistemas de cañería en servicio, en el Punto 7.2 Determinación de la Máxima Presión de Trabajo Permitida (MAWP según las siglas en inglés), se utiliza como base la ecuación 3b del Código ASME B31.3:

$$t = \frac{P(d + 2c)}{2[SEW - P(1 - Y)]} \quad (3b)$$

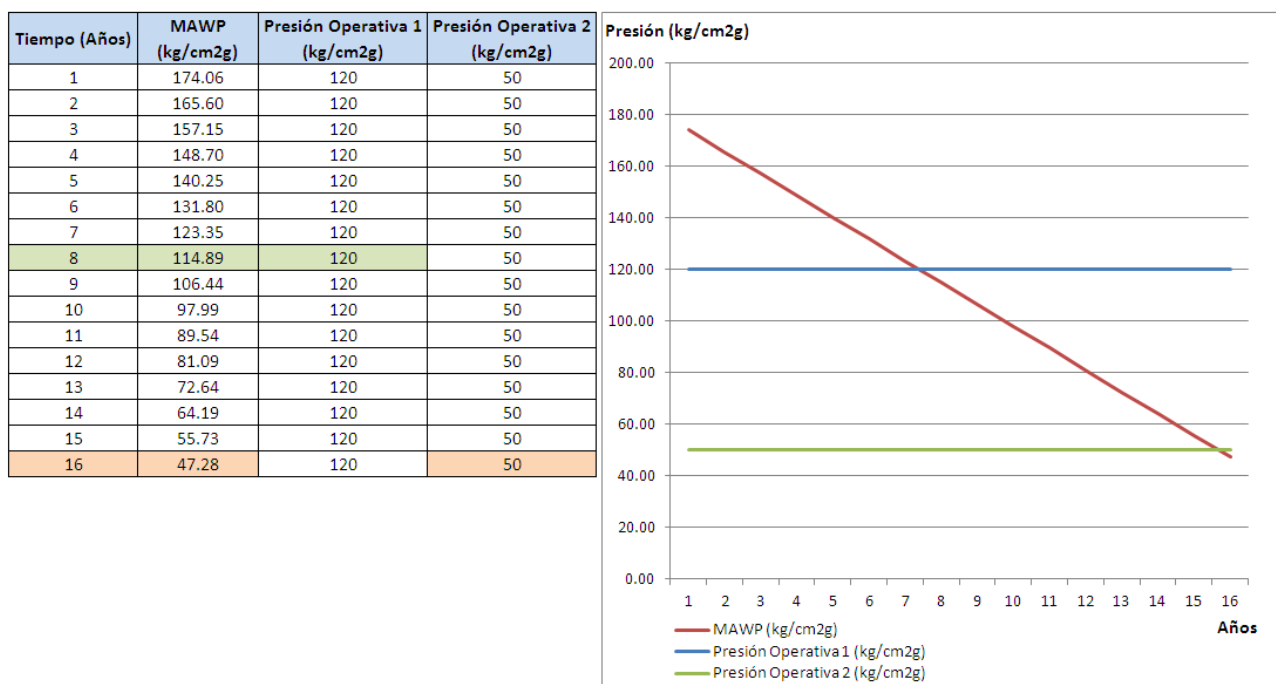
Con dicha ecuación, la norma API 570 hace simplificaciones para calcular la MAWP quedando:

$$MAWP = 2SE(t - 2tc)/D$$

Donde:

Datos	Valor	Unidad
Presión Diseño	120	kg/cm2
Tipo cañería	A-106 B	
Diámetro exterior - D	168.3	mm
Tensión admisible - S	1400	kg/cm2
Eficiencia de soldadura longitudinal - E	1	
Espesor definido por diseño - t	10.97	mm
Velocidad corrosión	0.254	mm/año
Tiempo próxima intervención/Cambio	5	años
Pérdida espesor por corrosión - tc	1.27	mm
MAWP (para tiempo definido: 5 años)	140.25	kg/cm2

Planteando estas condiciones en el tiempo se pueden analizar las alternativas de dos presiones operativas, una realizando la transferencia de fluido en alta presión (120 kg/cm2g) y otra transfiriendo en media presión (50 kg/cm2g).

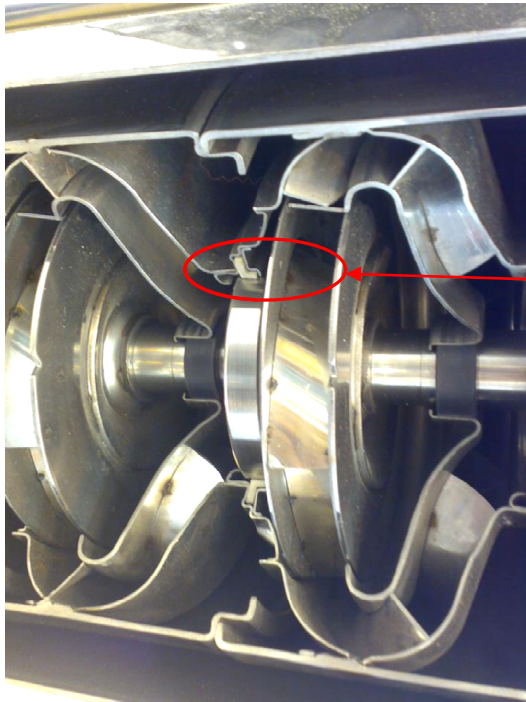


Se observa claramente en el gráfico que el Tiempo de vida remanente depende en forma lineal de la presión y con el simple hecho de disminuir la misma el tiempo hasta la falla prácticamente se duplica. Este planteamiento toma como base que el modo de falla principal es la corrosión interior y que dicha velocidad de corrosión es constante a lo largo del tiempo.

- Conclusión anexa 2: Mejora de eficiencia energética

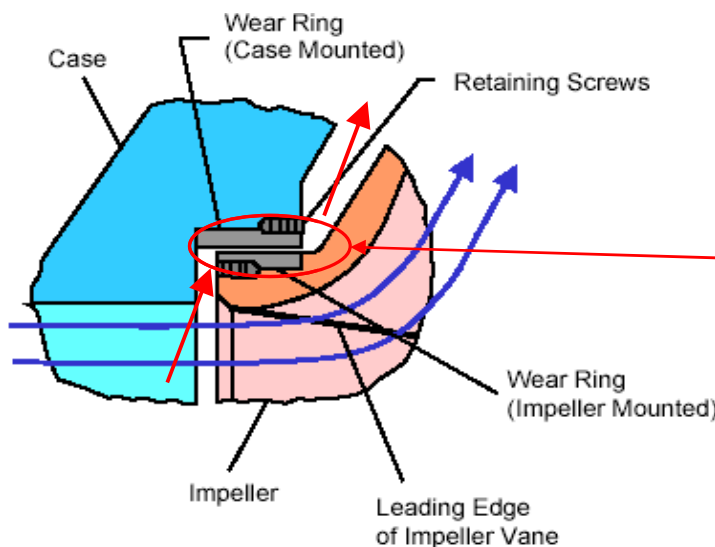
Con un sistema de bombeo estandarizado y modular, se puede implementar en forma sencilla, con mínimas pérdidas asociadas y a bajo costo de reparación un plan de seguimiento del rendimiento energético de los equipos, para efectuar su reparación en el momento óptimo.

Las bombas centrífugas sufren un proceso de desgaste en el tiempo en las zonas de cierre hidráulico entre elementos rotantes (impulsores y eje) y elementos estáticos (difusores y cuerpo).



de desgaste

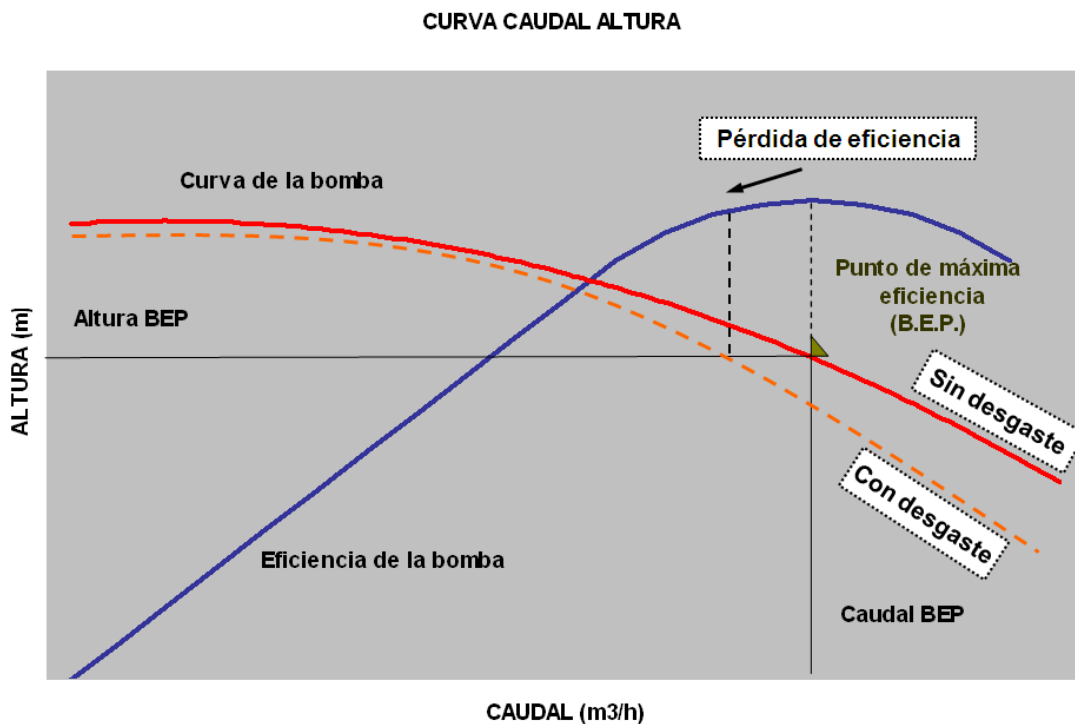
Fotografía de corte donde se visualizan impulsores y difusores



sgaste

Esquema donde se visualiza el sector donde se produce el desgaste

Este desgaste provoca recirculaciones internas y pérdida de rendimiento, lo cual se ve reflejado en la curva de desempeño de los equipos como en el siguiente esquema:



Este desempeño se puede cuantificar con la ecuación que determina la potencia de las bombas centrífugas para las diversas condiciones operativas:

$$N_{(KW)} = \frac{Q \text{ (m}^3/\text{h)} \times h \text{ (m)} \times \delta \text{ (Kg/dm}^3\text{)}}{270 \times \eta \times 0,7456}$$

Donde:

Q = Caudal

h = Altura

δ = Peso específico

η = Rendimiento (Eficiencia)

N = Potencia al freno

En esta ecuación se observa la dependencia inversamente proporcional que tiene el rendimiento respecto a la potencia. Para determinar la Energía consumida, debemos plantear el consumo de potencia respecto al tiempo.

Por lo tanto, realizando un seguimiento de la Energía consumida a través de instrumentos on-line o por mediciones regulares sabremos el estado de los equipos y podremos determinar el momento óptimo de reparación o recambio.

Con equipos estandarizados y modulares se pueden simplificar las mediciones de desempeño, la gestión de reparación, la gestión de stock de repuestos y con ello disminuir los costos operativos y las pérdidas de producción asociadas.

Bibliografía

Norma API 570 SECOND EDITION, OCTOBER 1998: Inspection, Repair, Alteration, and Rerating of In-Service Piping Systems

Código ASME B31.3-2006 Process Piping

Ingeniería de Confiabilidad y Análisis Probabilístico de Riesgo - Yañez, Medardo; Gómez de la Vega, Hernando; Valbuena Genebelin – ISBN 980-12-0116-9 - Junio 2003

Norma API 610 Centrifugal Pumps for Petroleum, Petrochemical and Natural Gas Industries