



DESGASTE DE LAS BOMBAS DE INYECCIÓN MULTJETAPAS SU IMPACTO EN LOS PROCESOS DE MANTENIMIENTO Y OPERACIÓN PÉRDIDA DE EFICIENCIA EN LA PRODUCCIÓN

Ing. Jorge R. Fernández Mosconi

SKANSKA s.a.

INDICE:

1. Introducción

2. Sistema de Inyección

3. Bombas de Inyección de agua

4. Ecuaciones

4.1 Ecuaciones de potencia

4.2 Ecuación de equilibrio

4.3 Ejemplo de cálculo

4.4 Balance de potencia

5. Evolución del desgaste

5.1 Coeficiente de rendimiento relativo

5.2 Tabla de extrapolación

5.3 Curva de pérdida de rendimiento

5.4 Curvas Altura-Caudal y Rendimiento-Caudal

6. Impacto del desgaste en los procesos de mantenimiento y operación.

7. Incidencia en la producción.

7.1 Efectos del desgaste en la producción diaria

7.2 Ahorro de Energía Eléctrica.

8. Conclusiones

9. Bibliografía

1. Introducción

En los yacimientos de petróleo con Plantas de Inyección de agua, el sistema denominado “Bomba de Inyección” es quizás el de máxima criticidad.

Encontramos aquí generalmente a las bombas multietapas centrífugas encargadas de bombear agua a presiones importantes (100 a 250 Kg/cm²).

Estos equipos son de elevado valor de reposición y requieren de un tiempo bastante extenso de reparación en los talleres especializados.

En caso de no contarse con equipos de reserva, mientras dura la reparación (60 a 90 días) se pierde por completo la producción asociada a la bomba.

Luego de unos años de funcionamiento, comienzan a evidenciarse los síntomas del desgaste de sus internos con pérdida de su eficiencia, aumento de los tiempos de mantenimiento y disminución de su confiabilidad.

El seguimiento de la evolución del rendimiento de estos rotantes permite tomar decisiones para planificar el mejor momento técnico económico para la reparación y/o reemplazo de sus partes.

Se pretenden exponer los principales aspectos que deben ser tenidos en cuenta para optimizar los procesos de mantenimiento de estos equipos con índices adecuados de confiabilidad y disponibilidad operativa

2. Sistemas de Inyección de agua

En los Yacimientos denominados de “Recuperación Secundaria” se inyecta agua desde la superficie hacia los pozos productores obteniéndose como resultado una mezcla de petróleo y agua que luego es separada en las plantas.

El agua es enviada a tanques que alimentan a las bombas de inyección, completándose de esta manera el ciclo. El denominado Sistema de Inyección está compuesto de los siguientes equipos:

- Bomba
- Motor
- Celda
- Instrumentos
- Sistema de control
- Válvula reguladora y otras válvulas
- Piping

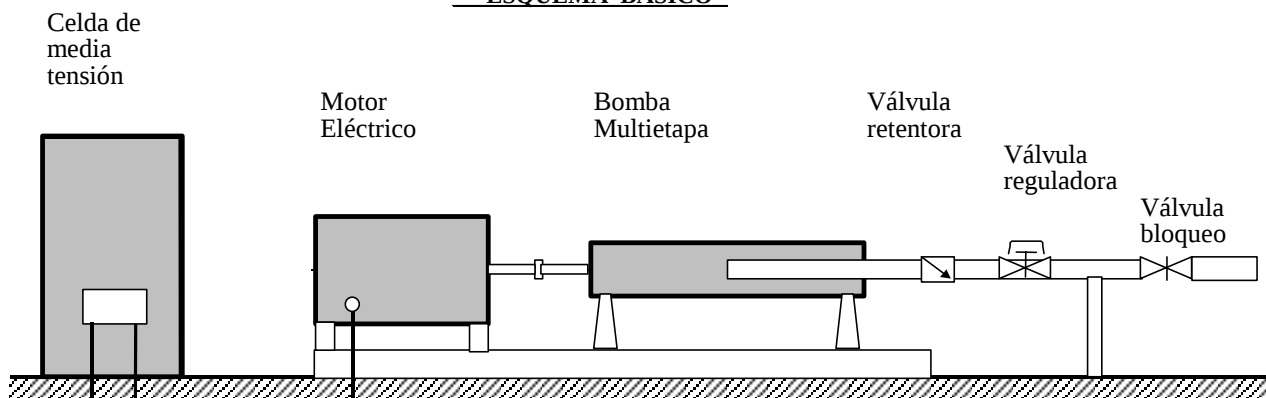
En particular, las bombas inyectoras pueden clasificarse de la siguiente manera:

Rotativas	Centrífugas multietapas	Sulzer Bingham, Byron Jackson, Soviéticas
	Tipo HPS	Reda
Alternativas	Duplex	Siam Arcon, National, Stork, Oilwell, Gardner Denver
	Triplex	
	Quintuplex	

Se muestra a continuación un esquema básico del sistema de inyección

Sistema: Bomba de Inyección

ESQUEMA BÁSICO



En las siguientes fotografías se pueden apreciar el motor eléctrico de accionamiento y la bomba inyectora multietapa

Motor eléctrico de media tensión



Fotografía 01

Bomba centrífuga multietapa



Fotografía 02

3. Bombas de Inyección de agua

Este análisis se ha realizado sobre algunas de las bombas centrífugas multietapas que operan en la cuenca neuquina.

Habitualmente, con la compra de la bomba centrífuga el fabricante entrega un “ensayo de performance” de la misma donde se puede apreciar el comportamiento de algunas de las variables, tales como altura total (m) ó presión a la salida, eficiencia (%) y potencia al freno (kW) en función de los caudales bombeados (m³/h) para una determinada velocidad de rotación (rpm).

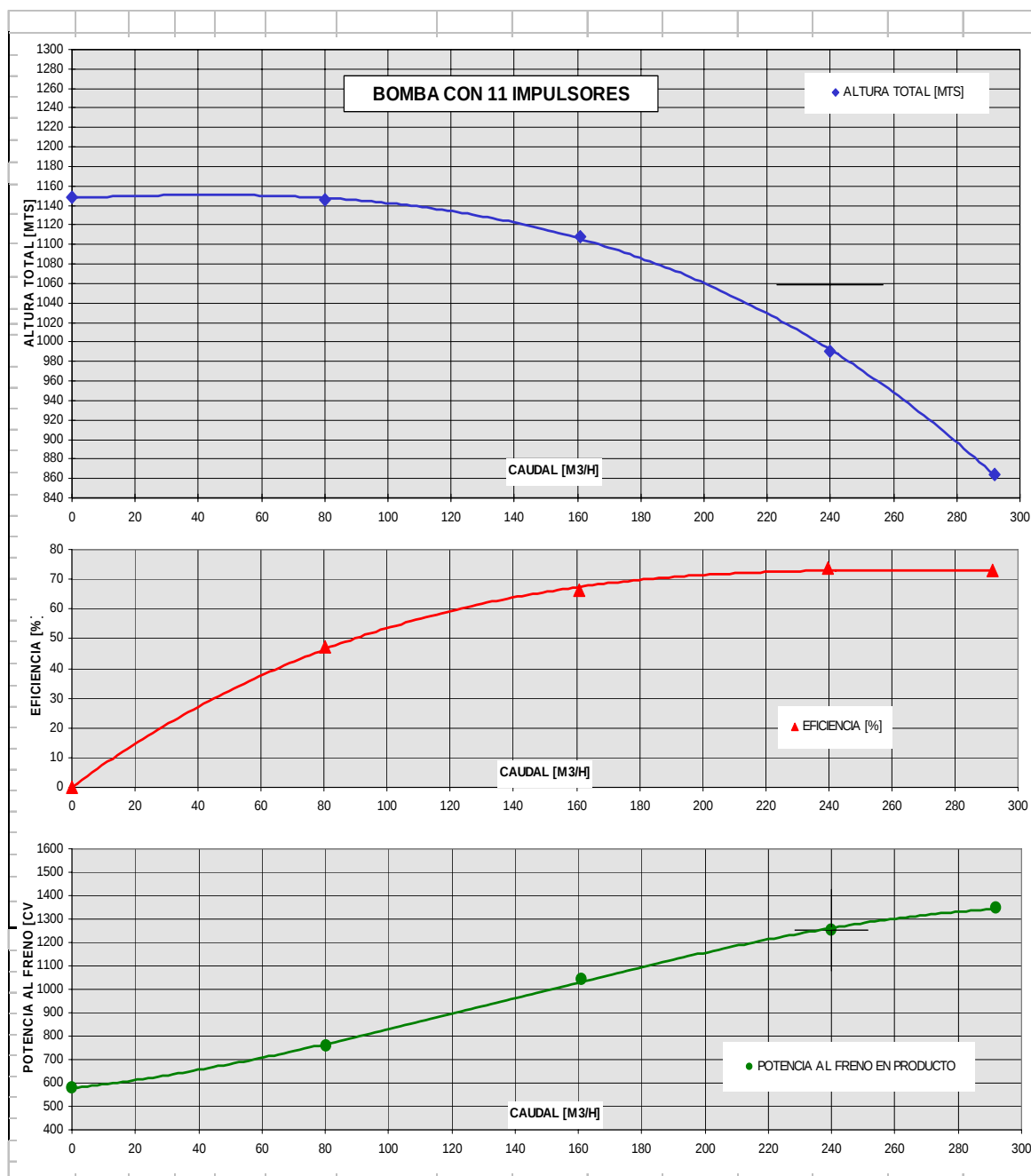
Asimismo, se informan los siguientes datos:

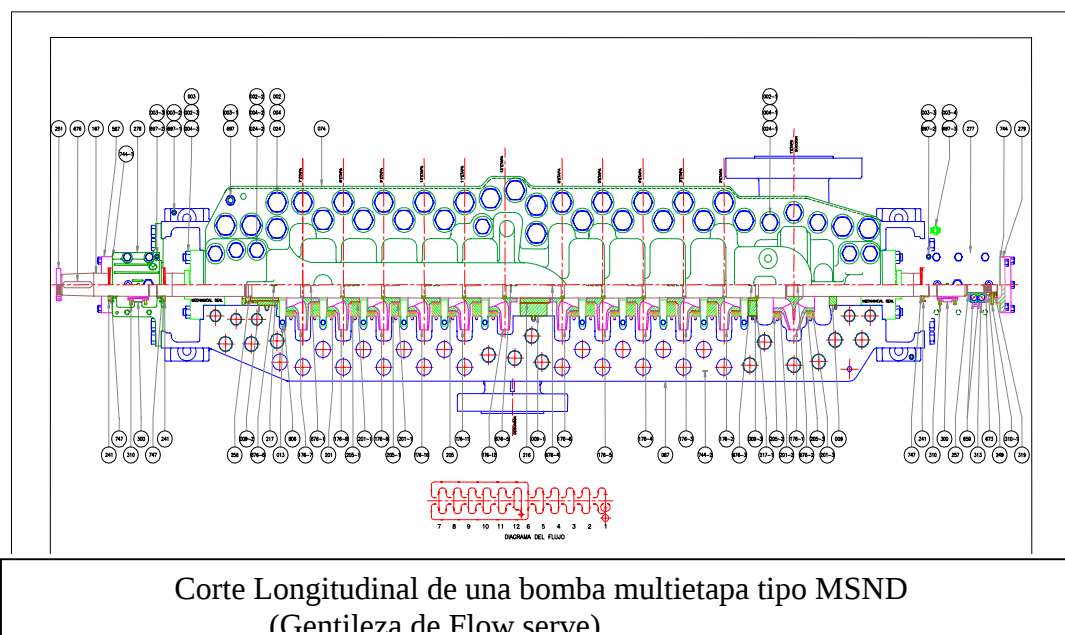
- Nro de Serie
- Tipo de bomba
- Cantidad de impulsores
- Peso específico del fluido
- Diámetro de la cañería de aspiración
- Diámetro de la cañería de impulsión
- Diámetro de los impulsores

Para el punto de funcionamiento de la bomba, quedan definidos el caudal y altura nominal, a los cuales quedan asociados la eficiencia y potencia en el eje.

Se muestran a continuación las curvas antes mencionadas para una bomba del tipo MSND 6x8x11 M de 11 etapas.

Curvas típicas Altura-Caudal, Rendimiento-Caudal y Potencia-Caudal





4. Ecuaciones de Potencia y Rendimiento

4.1 Ecuaciones de potencia

4.1.1 Potencia nominal hidráulica entregada por la bomba multietapa

$$N \text{ (CV)} = \frac{Pe \cdot Q \cdot H \cdot 9,81 \cdot 1,36}{3600} \cdot h$$

$$N \text{ (kW)} = N \text{ (CV)} / 1,36$$

Concepto	ID	Unidad
Peso específico	Pe	Kg/dm ³
Caudal	Q	m ³ /h
Altura ó p. salida	H	m
Rendimiento bomba	h	%
Coef de unidades	9,81	
Coef de unidades	1,36	
Coef de unidades	3.600	

4.1.2 Potencia eléctrica nominal suministrada en el eje de la bomba

$$N \text{ (CV)} = 1,73 \cdot U \cdot I \cdot \cos f \cdot \text{Rendm} \cdot 1,36$$

$$N \text{ (kW)} = N \text{ (CV)} / 1,36$$

Concepto	ID	Unidad
Tensión	U	kV
Intensidad	I	A
Factor de potencia	Cos f	
Coef de unidades	1,732	
Coef de unidades	1,36	
Rendimiento motor	Rendm	%

4.2 Ecuación de equilibrio de potencia (Motor y bomba)

$$P_e \cdot Q \cdot H \cdot 9,81 \cdot 1,36 / 3600 \cdot h = 1,73 \cdot U \cdot I \cdot \cos f \cdot \text{Rendm} \cdot 1,36$$

4.3 Cálculo del caudal nominal de una bomba multietapa

Si se cuenta con los siguientes valores (input), se obtiene:

Concepto	ID	Unidad		
Tensión	U	kV	3,30	INPUT
Intensidad	I	A	202	INPUT
Factor de potencia	Cos f		0,90	INPUT
Coef de unidades	1,732		1,732	
Coef de unidades	1,36		1,36	
Rendimiento motor	Rendm	%	0,95	INPUT
Potencia eje motor	N	CV	1.342,51	RESULTADO

$$N \text{ (kW)} = 987,14$$

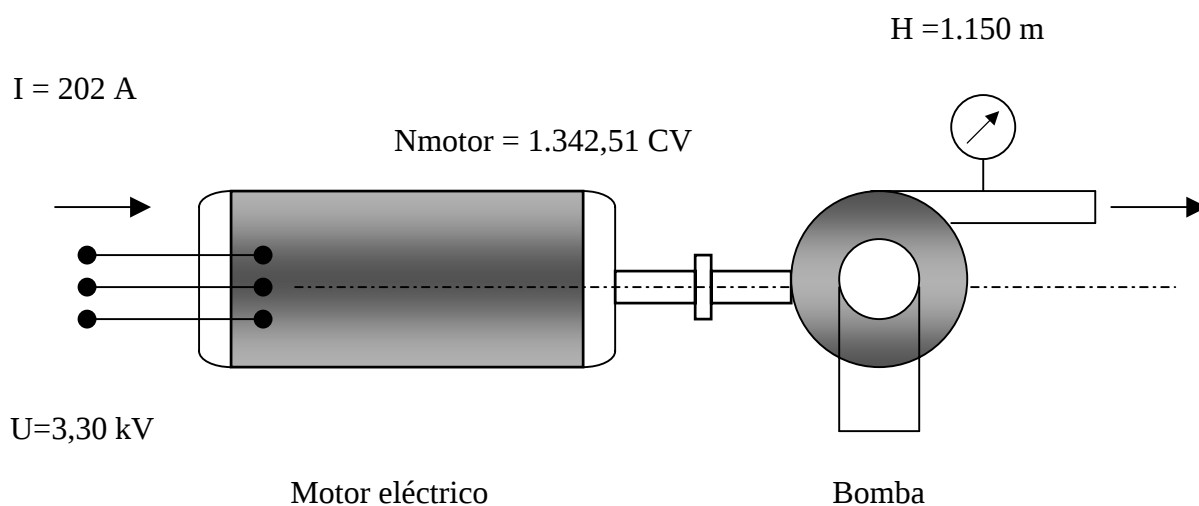
Despejando el caudal de la ecuación 4.2:

$$Q \text{ (m}^3\text{/h)} = 269,83 \cdot N(\text{CV}) \cdot h / \text{Pe} \cdot H$$

$$Q \text{ (m}^3\text{/h)} = 366,97 \cdot N(\text{kW}) \cdot h / \text{Pe} \cdot H$$

Concepto	ID	Unidad		
Peso específico	Pe	Kg/dm ³	1,05	INPUT
Altura ó p. salida	H	m	1.150,00	INPUT
Rendimiento bomba	h	%	0,80	INPUT
Coef de unidades	269,83		269,83	INPUT
Potencia en el eje	CV		1.342,51	Cálculo
Caudal	Q	m ³ /h	240,00	Resultado

4.4 Balance de Potencias. Parámetros funcionales



5. Evolución del desgaste en las bombas Multietapas

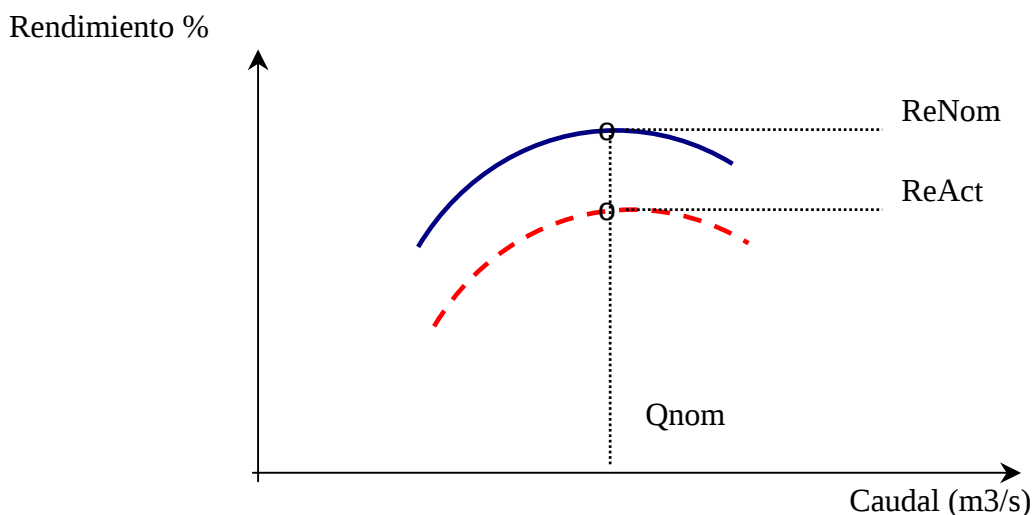
5.1 Coeficiente de rendimiento relativo (Kr)

La bomba ha estado funcionando una cierta cantidad de horas, a las cuales por comodidad las llevamos al equivalente de tiempo (t) en años.

Se ha definido un coeficiente que compara el rendimiento actual de la bomba (ReAct), con el rendimiento nominal original al salir de fábrica (ReNom) para el caudal de diseño (Qnom).

Entonces:

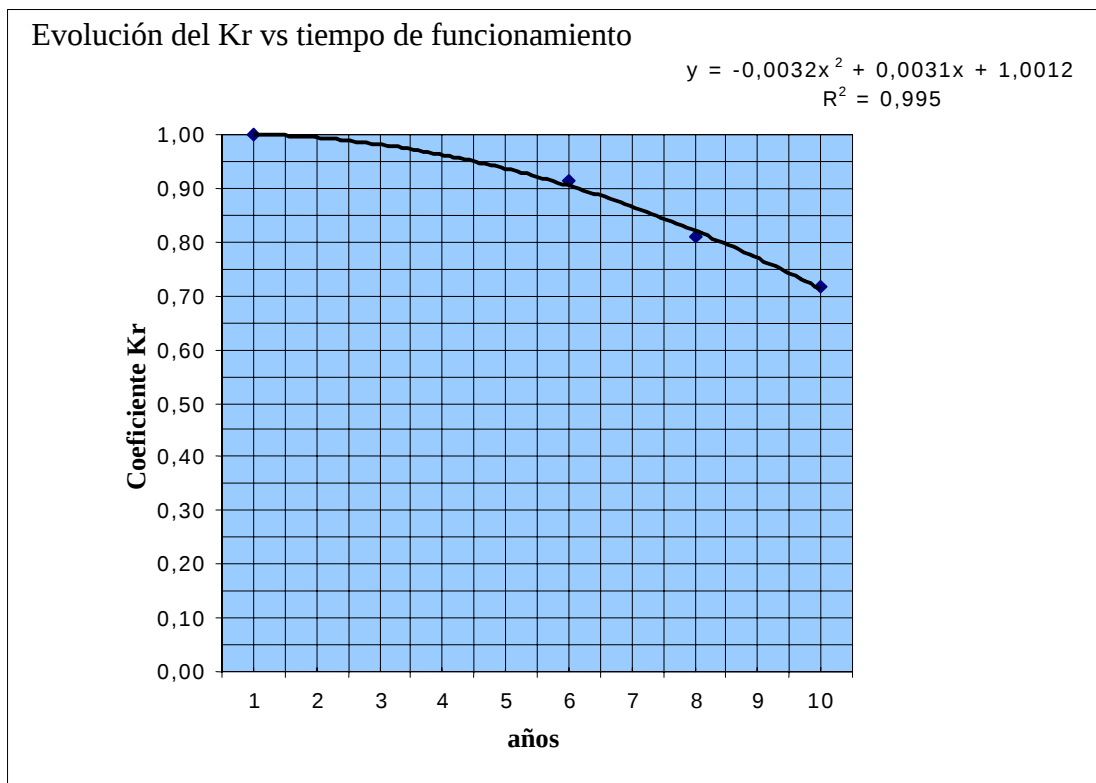
$$Kr = ReAct / ReNom$$



Los datos de ReNom se obtuvieron de las curvas del fabricante y los valores de ReAct se lograron realizando ensayos de performance en bombas del tipo MSND 6x8x11 M, del mismo yacimiento. Las tres bombas elegidas habían estado en funcionamiento por 6, 8 y 10 años, por lo cual se confecciona la siguiente tabla de valores:

Años	6	7	8	9	10
Kr	0,91		0,81		0,72

5.2 Tabla de extrapolación



Obtenida la curva de tendencia se confecciona la siguiente Tabla de Extrapolación:

Miles hrs marcha	8	16	24	32	40	48	56	64	72	80
Años:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-0,0032	1	4	9	16	25	36	49	64	81	100
0,0031	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1,0012	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Kr:	1	0,99	0,98	0,96	0,94	0,90	0,87	0,82	0,77	0,71

Ejemplo:

Sea una bomba multietapa nueva que tiene un $RenNom = 80 \%$

Calcular el rendimiento actual luego de haber funcionado durante 56.000 hrs (7 años) :

Con $RenNom = 80 \%$

$t = 7$ años

Se ingresa a la tabla, obteniéndose:

$Kr = 0,87$

Entonces:

$ReAct = 0,87 \times 80 \% = 70 \%$

Merma nominal = $80\% - 70\% = 10 \%$

Esto significa que en su punto nominal el rendimiento de la bomba sufre una merma del 10% .

Sin embargo, se hace necesario extender el análisis dado que la curva H-Q sufre una declinación asociada al desgaste. Esto se traduce en un corrimiento del punto de funcionamiento hacia menores caudales que el nominal.

Esto se verá más adelante.

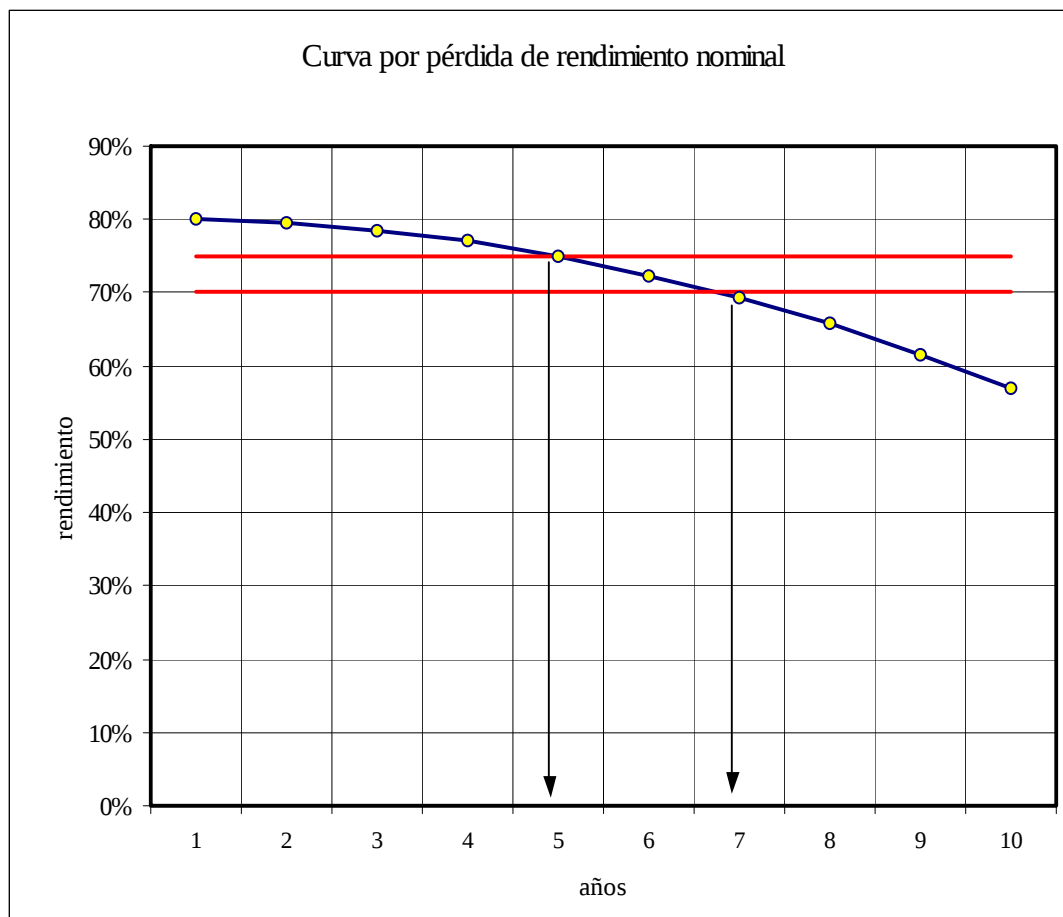
5.3 Curva de Pérdida de rendimiento

Para las bombas nuevas multietapas (6x8x11M 12et), el rendimiento en su punto nominal se ubica próximo al 80% .

Considerando un desgaste en el tiempo similar al indicado al principio, se obtiene la siguiente tabla de valores y gráfica asociada. Se han agregado Criterios de Aceptación y Límite para definir una banda de desvío.

Años	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ReAct (%)	80	80	79	77	75	72	69	66	62	57

Evolución del desgaste con las horas/años de funcionamiento



Se concluye que al fijarse una banda que establece un cierto desvío respecto de los valores nominales, cuando las bombas sufren un desgaste tal que la curva de rendimiento es interceptada (entre 5 y 7 años) debería realizarse una Inspección mayor.

Se puede adoptar el valor promedio entre ambos, es decir se propone una frecuencia de 48.000 hrs entre inspecciones.

5.4 Curvas Altura Caudal y Rendimiento Caudal

Luego de unos años de funcionamiento, las bombas sufren mermas en sus curvas características, de manera tal que se desplazan hacia abajo los parámetros de altura y rendimiento a igualdad de caudal bombeado.

Como se tiene que mantener constante la presión a la salida, el nuevo punto de funcionamiento de la bomba se desplaza hacia la izquierda y consecuentemente cae el rendimiento al apartarse de su punto nominal.

Este efecto se suma al descripto en el punto anterior.

Esta merma adicional en el rendimiento oscila entre un 2 (dos) % y un 6 (seis) % . Si adoptamos un valor medio del 4 (cuatro) %, queda para el ejemplo citado:

Merma	Nominal	10 %
	Adicional	4 %
	TOTAL	14 %

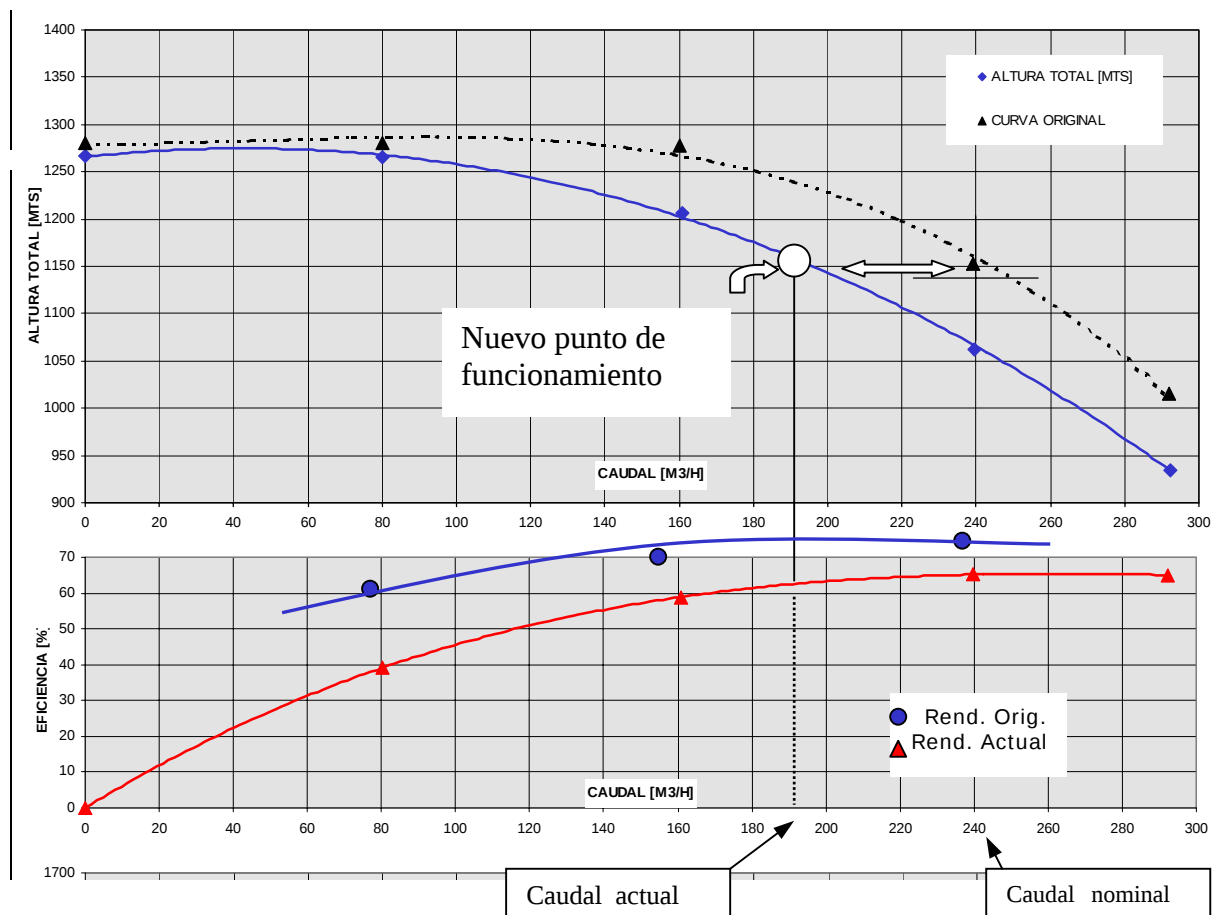
Este aspecto incide en dos conceptos relevantes. Por un lado el caudal inyectado es menor que el nominal y por el otro la bomba se aparta de su punto óptimo de funcionamiento aumentando los efectos de choques internos, que se traducen en ruidos, vibraciones, etc.

Se muestran a continuación las curvas de altura y eficiencia en función del caudal bombeado, comparándose las originales (tal como salen de fábrica) con las reales (luego de funcionar por unos años).

En la parte superior se puede apreciar el corrimiento que sufre el punto real de funcionamiento como consecuencia del desgaste de los internos.

En la parte inferior se muestran las curvas de eficiencia originales y actuales. Luego se han colocado tablas que contienen los datos de diseño originales de la bomba y se realiza un análisis de los parámetros funcionales.

Curvas Originales vs Reales de Funcionamiento



Datos originales de la bomba		
Caudal nominal	(m ³ /h)	240
Altura nominal	(m)	1150
Rend. nominal	(%)	80

Análisis de las curvas anteriores:

1. En el punto de diseño (240 m³/h):
 - Se aprecia una disminución del 15% en el rendimiento (80% vs 65%)
 - La presión obtenida es de 1.060 m en lugar de 1.150 m
2. Para una condición normal de trabajo, P_{imp} = 1150 m
 - El caudal original era de 240 m³/h
 - El caudal actual es de 195 m³/h
 - La eficiencia de la inyección disminuye en un 20 %
 - Si la inyección diaria prevista es de 240x24=5760 m³/d, se dejan de inyectar 1080 m³/d de agua por bomba.

6. Impacto del desgaste en los procesos de Mantenimiento y Operación

En general, los sistemas de inyección están clasificados como críticos ya sea por su elevado costo de reposición, impacto en la producción en caso de detención, costos de mantenimientos, etc.

Una buena parte de los equipos actualmente en funcionamiento, han sido montados hace ya unos años, en general más de 8 a 10 años.

Si bien son máquinas robustas, de buen diseño y metalografía adecuada, las horas de marcha bombeando fluidos agresivos originan desgastes en sus internos, tal como se expuso en los puntos precedentes.

Los desgastes generalmente aparecen en los anillos de desgaste, buje central y pieza de balanceo, los cuales originan recirculaciones en los interiores de la bomba que se manifiestan primeramente con roturas de sellos, desgastes de cojinetes, aumento de vibraciones.

Si los desgastes progresan pueden dar origen a fenómenos impermanentes hidráulicos que ocasionan un aumento importante de los mantenimientos correctivos, generalmente no planeados. La situación extrema es una falla de tipo catastrófica en el cual también estén comprometidos los impulsores.

Se indican a continuación los precios de los repuestos antes citados:

- 1 Sello mecánico completo LA: 5.800 u\$s
- 1 Sello mecánico completo LOA: 5.800 u\$s
- 1 Camisa Cojinete LA: 2.500 u\$s
- 1 Camisa Cojinete LOA: 2.500 u\$s
- 1 Rodamiento axial: 500 u\$s
- 1 Juego Láminas acoplamiento: 1.000 u\$s

Las eventuales reparaciones de los mismos tiene un valor que oscila entre el 40% y 60% del monto del repuesto nuevo.

Los mantenimientos correctivos, además de ser costosos por el monto de los repuestos, insumen muchas horas hombre y afectan de manera directa a la producción.

Lógicamente, se ven afectados los Indicadores de Disponibilidad y de Confiabilidad y los Ingenieros de Mantenimiento deben efectuar los Análisis de Falla pertinentes, que insumen tiempos importantes de relevamientos y gestión.

En definitiva, una vez que el desgaste de los internos comienza a manifestarse la mejor solución es realizar una Inspección Mayor destapando la máquina con el objeto de evaluar con precisión las piezas a cambiarse.

La experiencia indica que una bomba correctamente reparada recupera satisfactoriamente sus curvas originales de funcionamiento.

7. Incidencia en la producción. Ahorro de Energía Eléctrica

7.1 Efectos del desgaste en la producción diaria

En los párrafos anteriores se han mostrado los precios de algunos repuestos que indican el alto costo que tienen los mantenimientos correctivos para este tipo de bombas.

Ahora bien, hay un efecto de todavía mayor impacto económico que es el de convivir con la merma de la eficiencia de la bomba.

Para poder visualizarlo, supongamos que contamos con una planta de inyección que tiene cinco (5) bombas que fueron adquiridas para funcionar en las siguientes condiciones:

Altura nominal = 1.150 m

Caudal nominal = 240 m³/h ó 5760 m³/d

Eficiencia de la Bomba = 80 %

Si las bombas han funcionado por 8 años y presentan una curva de desgaste similar al mostrado en la “Curva por pérdida de rendimiento nominal”, su rendimiento actual sería menor del 66 % y el caudal bombeado sería de 195 m³/d por unidad.

Quedando entonces:

Valores Unitarios Nominales	5 bombas con valores nominales	5 bombas con valores actuales (8a)	Diferencia diaria en m ³
1150 m	1150 m	1150 m	
240 m ³ /h	1.200 m ³ /h	975 m ³ /h	5400 m ³ /d

Como puede advertirse, luego de 64.000 horas de funcionamiento la planta se comporta como si inyectara agua con una bomba menos.

En general, la denominada producción bruta del yacimiento está compuesta por un porcentaje en volumen de petróleo (3 al 10%), siendo el resto agua.

En general no es lineal el impacto que tiene en la recuperación secundaria la variación del caudal. Por ello adoptaremos, en lugar de $5.400 \times 3/100 = 162$ m³/d, valores conservativos suponiendo que se deja de recuperar entre el 0,25% y el 0,5 % de petróleo, es decir:

$$5.400 \times 0,5/100 = 27 \text{ m}^3/\text{d} \quad \text{y} \quad 5400 \times 0,25/100 = 13,5 \text{ m}^3/\text{d}$$

Volumen de agua que se deja de inyectar		5400	5400 m ³ /d
Volumen de petróleo que no se recupera		13,5	27 m ³ /d
Barriles de petróleo		85	170 B/d
Precio del Barril	40 u\$s	3.400	6.800 u\$s/d
	50 u\$s	4.250	8.500 u\$s/d
	60 u\$s	5.100	10.200 u\$s/d

7.2 Ahorro de energía eléctrica

Si para el caso anterior no fuera necesario inyectar la totalidad del caudal, es decir que funcionando cuatro de las bombas una puede quedar en stand-by, el ahorro en energía eléctrica puede calcularse de la siguiente manera, empleando las ecuaciones de los capítulos precedentes:

$$\text{Pot.Eléc. (Kw)} = 1,05 \times 240 (\text{m}^3/\text{h}) \times 1.150 (\text{m}) \times 9,81 / 3600 \times 0,8 \times 0,96 = 1.030 \text{ Kw}$$

La energía consumida en un año es:

$$1.030 \text{ Kw} \times 8760 \text{ hrs/año} = 9.022.800 \text{ Kw-hr/año}$$

Costo energía eléctrica (u\$s/ kW-hr)	Consumo anual (Kw-hr/año)	Ahorro (en u\$s/año)
0,015	9.022.800	135.342
0,020	9.022.800	180.456
0,025	9.022.800	225.570

8. Conclusiones

Si bien los datos pueden variar de un yacimiento a otro, ya sea por la cantidad de equipos instalados, calidad del fluido bombeado, modalidades operativas, características propias del comportamiento dinámico del yacimiento, etc., queda en evidencia que si la bomba inyectora de agua sufre una merma en su rendimiento, esta merma se traslada económicamente a toda la producción.

Otro aspecto importante para rescatar es que normalmente no es conveniente trabajar “a la rotura” con este tipo de equipamiento ya sea por la ineficiencia diaria del Sistema de Inyección, baja Disponibilidad, altos costos de reparación en caso de fallas catastróficas con elevado down time y su incidencia negativa en la producción.

En consecuencia, para cada yacimiento se deberán efectuar las planificaciones adecuadas para realizar Inspecciones Mayores a estos equipos con el objeto de recuperar los valores nominales de funcionamiento que aseguren los objetivos de Disponibilidad y Confiabilidad establecidos.

9. Bibliografía

Manuales de operación y mantenimiento de bombas Byron Jackson, Sulzer Bingham y Soviéticas
Turbomáquinas Hidráulicas (Claudio Mataix)
Máquinas Hidráulicas (Camilo B. Rodríguez)