

**CONSECUENCIAS DE LA NO CALIDAD EN LOS
PROCESOS DE INSPECCIÓN Y MANTENIMIENTO
DE EQUIPOS ROTANTES**

Ing. Jorge R. Fernández Mosconi

SKANSKA s.a.

INDICE:

1. Introducción

1.1 Sistemas de Inyección de agua

2. Desarrollo

Escenarios de Calidad

Situación actual

Fallas catastróficas

Inspecciones y Mantenimientos Mayores de equipos rotantes

Giro Inverso en Bombas

Precomisionado y Comisionado. Puesta en marcha

3. Conclusiones

4. Bibliografía

1. Introducción

En los Procesos de Inspección y Mantenimiento de los equipos en general y de los rotantes en particular se ha avanzado de manera sostenida en el desarrollo de planes de Inspección y Mantenimiento confeccionados para períodos anuales con sus hojas de revisión asociadas.

Las tareas de gestión de estos procesos también registran importantes avances en los últimos tiempos, sin embargo siguen apareciendo fallas de tipo “catastróficas” en equipos rotantes de muy alta criticidad como son por ejemplo los Sistemas de Inyección de Agua compuestos básicamente por los motores de accionamiento y 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.

Una de las consecuencias de la falta de calidad en el diseño de los planes antes citado se traduce en el funcionamiento anormal de estos equipos. Además de la pérdida de eficiencia, producto del desgaste, aparecen fallas tales que comprometen su integridad, como por ejemplo giro inverso de la bomba, calentamientos excesivos durante el arranque, etc.

Se pretenden exponer los principales aspectos que deben ser tenidos en cuenta para aplicar criterios de calidad que permitan obtener resultados con índices adecuados de integridad y confiabilidad operativa.

1.1 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
- Variador
- Instrumentos
- Sistema de control
- Válvulas: reguladora, retentora, de bloqueo
- Piping

En las tres fotos que se muestran a continuación se puede apreciar la disposición de los principales equipos



Foto 01: Vista de conjunto motor eléctrico – bomba multietapa de inyección



Foto 02: Vista de cañería de agua de ingreso a bomba multietapa de inyección



Foto 03: Vista de válvulas de bloqueo en aspiración y reguladora en impulsión

2. Desarrollo

2.1 Escenarios de Calidad

Tal como están planteadas las cosas hoy en día se vislumbran dos esquemas de trabajo ó escenarios donde la diferencia está dada por la **actitud** hacia la aplicación o no de criterios de calidad.

No se advierte que puedan coexistir actitudes intermedias. Trataremos de mostrar algunos ejemplos donde se apreciarán las ventajas de aplicar criterios de calidad en el desarrollo de los procesos.

Para el desarrollo del tema, hemos considerando algunas de las tareas que se realizan dentro del concepto de lo que se denomina como “Inspección y Mantenimiento” con el objeto de identificar casos típicos y valorar sus consecuencias económicas.

La palabra “calidad” es definida en el diccionario como: *atributo ó propiedad que distingue a las personas y cosas (indica categoría, superioridad en lo suyo)*. Al extender esta definición a la industria y no caer en la búsqueda utópica de la calidad es necesario agregarle conceptos tales como:

Optimización de Costos
 Mayor certeza en el manejo de riesgos
 Aseguramiento de la seguridad del personal, etc.

Si intentamos describir mediante una tabla comparativa, de una manera simplificada y conceptual como los Procesos de Inspección y Mantenimiento son afectados según los escenarios que toman en cuenta a la Calidad ó no , nos encontraríamos con lo siguiente:

(A) Escenario de Calidad	(B) Escenario de No Calidad
Hay planificación	Se improvisa
Se cuenta con razonable idoneidad técnica	Bajo conocimiento técnico
Se llevan registros e indicadores	No hay sistema de gestión
Se realizan análisis de falla	Ni siquiera se registran las fallas
Se trabaja con procedimientos	Los procedimientos son ignorados
Los objetivos son claros	Sólo el corto plazo está presente
Adecuada complementación con la Operación	Son recintos estancos
La capacitación del personal es efectiva	No hay capacitación ó bien es solo formal
Tiempos de compra de repuestos razonables	Demoras inexplicables en las compras
Compromiso con los objetivos	Cierta hipocresía: digo que hago, pero no hago

2.2 Situación actual

Observando la evolución de los Procesos de Inspección y Mantenimiento de los últimos cinco años se advierte que en términos generales existe una fuerte tendencia a ubicarlos dentro de la columna (A), pese a que todavía nos encontramos con realidades próximas a lo indicado en la columna (B).

Actualmente se emplean muy buenos sistemas de gestión, cada vez más completos y actualizados, ya se cuentan con programaciones anuales con frecuencias de inspección / mantenimiento razonables, hay hojas de revisión ú hojas de ruta de correcta confección, se llevan indicadores, se cumple muy satisfactoriamente el ciclo básico: identificación – programación – ejecución – registración, etc. lo cual es indicativo que se están tomando acciones en la dirección correcta.

Nos preguntamos: si efectivamente estamos en la dirección correcta, ¿ porqué siguen apareciendo fallas de tipo catastróficas en los equipos de alta criticidad ?

En particular, si enfocamos el análisis hacia los equipos que componen los Sistemas de Inyección de Agua, podemos encontrar algunas respuestas:

- No hay programas consolidados de Inspecciones / Mantenimientos Mayores
- No es debidamente considerado el desgaste que sufren los equipos por su uso
- No hay adecuadas metodologías para la Puesta en Marcha de los equipos, luego de un Paro de Planta ó reparación en talleres externos.

2.3 Falla Catastrófica

Luego de algunos años de funcionamiento puede ocurrir una falla catastrófica en cualquiera de los componentes del Sistema de Inyección: falla la aislación del bobinado estatórico del motor eléctrico, falla el sistema compensador de empuje de la bomba multietapa, falla en el sistema de lubricación de la caja incrementadora, etc. y como consecuencia de ello se deja de inyectar agua a la formación.

En un escenario de la No Calidad: no se sabe lo que pasó, al no poderse reparar en el sitio se envía el equipo a talleres externos, el Reparador no tiene los repuestos, los tiempos de fabricación / reparación se cuentan en meses, no se realiza análisis de falla (la culpa es de “otro”).

Además de afrontar los costos de la reparación, es muy probable que haya una importante pérdida de producción.

¿ es posible anticiparnos a la falla ?

En un escenario de Calidad la respuesta es afirmativa. En principio, porque además de las inspecciones / mantenimientos rutinarios (diarios, semestrales) se realizan mediciones predictivas de vibraciones, termografías infrarrojas, se toman muestras de aceite, se verifica periódicamente la alineación, todo lo cual permite advertir el inicio de una futura falla.

Bajo esta filosofía se enviará a reparar al equipo “antes que falle” de una manera ordenada y programada.

2.4 Inspecciones y Mantenimientos Mayores de equipos rotantes

Hay diferentes formas de planificar las inspecciones y mantenimientos mayores. Con el objeto de analizar específicamente el tema centraremos el análisis en las bombas multietapas, como componentes de los Sistemas de Inyección de agua, debido a su criticidad, elevados costos de reposición y alto valor económico del fluido obtenido como resultado del proceso de inyección / recuperación.

Las preguntas son ¿ cuándo es el mejor momento para someter un equipo a un mantenimiento mayor ?
¿ quién toma la decisión de hacerlo ?

En términos generales, la incidencia de tener que detener un equipo activo para corregir una falla ó realizar un mantenimiento mayor tiene gran impacto económico en la producción.

Por ello, la decisión de afrontar un mantenimiento mayor debe ser tomada racionalmente considerando todos los factores intervinientes.

Uno de los factores es el análisis del comportamiento del equipo con el transcurso de las horas de funcionamiento. A priori se sabe que aún usándose el rotante dentro de sus parámetros de diseño sufrirá un desgaste, que se traducirá en una eficiencia menor.

Esta parte del trabajo trata de evaluar como incide dicha merma en la eficiencia para tomar la decisión de realizar un mantenimiento mayor.

Se muestran a continuación las curvas típicas de funcionamiento de las bombas en cuestión:

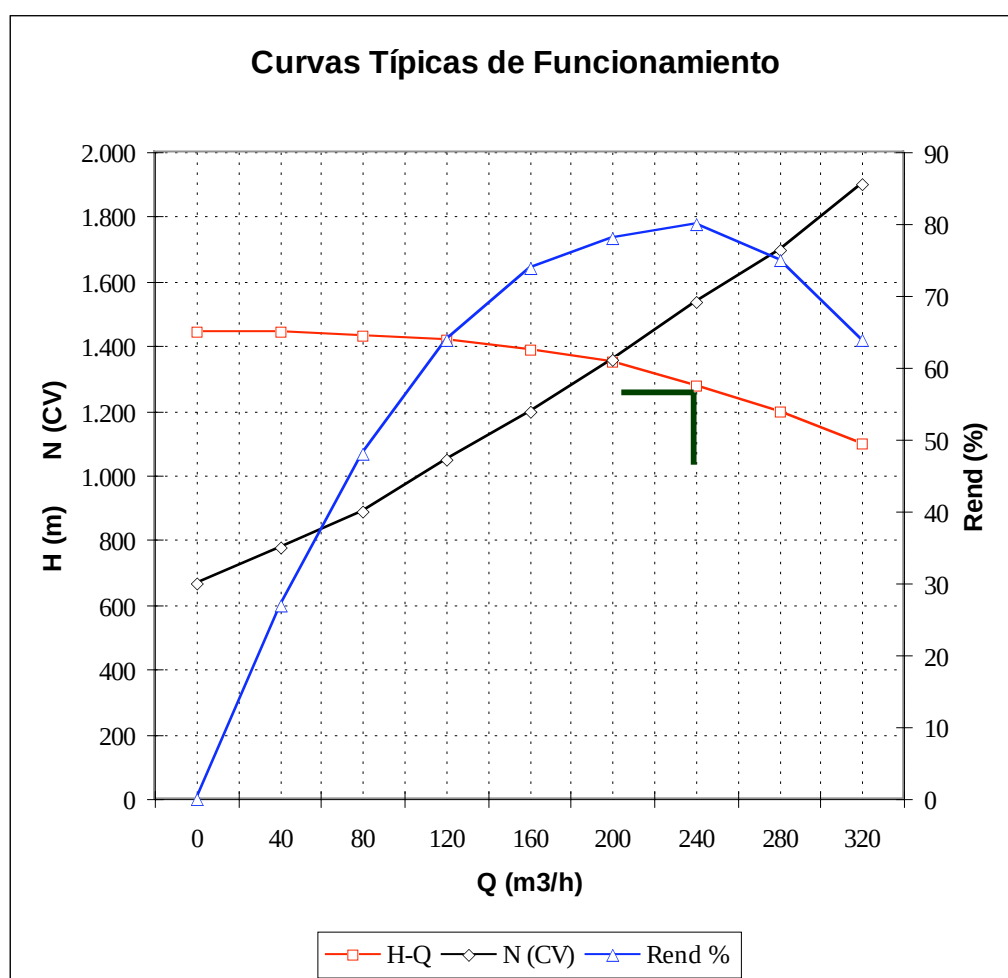


Figura 1

Parámetros de funcionam	Valor	Unidades
Caudal (Q)	240	m3/h
Altura (H)	1275	m
Potencia (N)	1540	CV
Rendimiento (Rend)	80	%
Veloc. Giro (n)	2980	rpm

Otros datos		
Peso específico agua (γ)	1,05	Kg/ dm3
Tipo de bomba	multietapa	6x8x11 M - 12 e

En la Figura 1 se muestran las curvas de funcionamiento de: altura, rendimiento y potencia en función del caudal bombeado.

La altura (m) que entrega la bomba afectada por el peso específico se convierte en la presión de inyección, en este caso considerando las unidades correspondientes: $p_{iny} = \gamma \cdot H = 133,9 \text{ Kg/cm}^2$ en el punto de diseño de la bomba, donde se alcanza su máximo rendimiento de 80 %.

En ese punto la potencia que requiere la bomba en su eje es de 1.540 CV (1.155 Kw)

Las curvas mencionadas reflejan el funcionamiento de la bomba y son obtenidas por ensayos que realizan los fabricantes en sus laboratorios, antes de ser enviadas a las plantas.

Luego de unos años de funcionamiento, las bombas sufren un proceso de desgaste que se verá reflejado en las curvas, mediante una degradación de las mismas. El proceso de desgaste afecta tanto a los cojinetes, rodamientos de empuje, sellos mecánicos, etc., como a los internos de la bomba: anillos de desgaste, piezas compensadoras de empuje axial, buje central, etc.

Las curvas se desplazan hacia abajo de la siguiente forma:

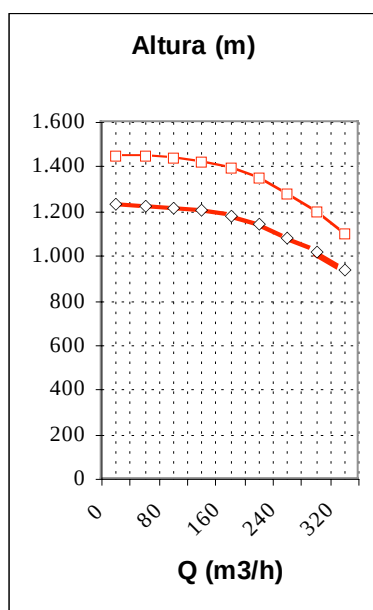


Figura 2.a

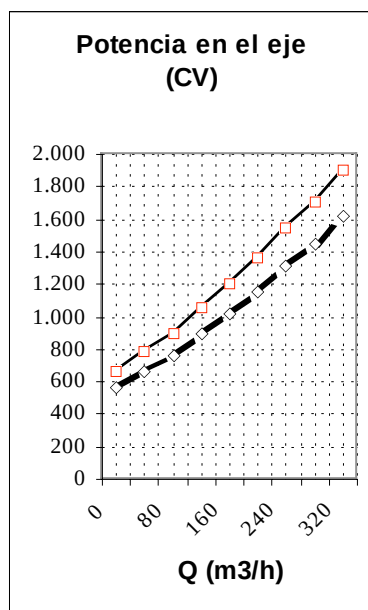


Figura 2.b

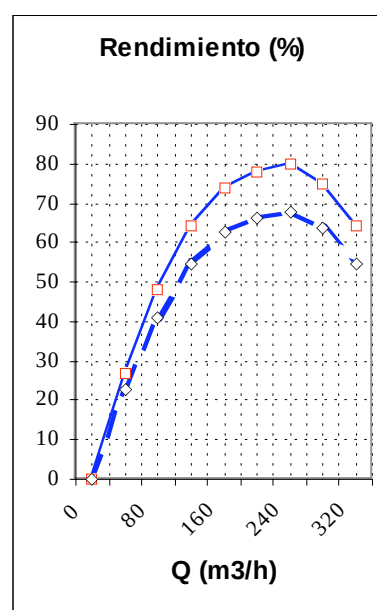


Figura 2.c

Se realizaron ensayos de performance en bombas multietapas similares, con igual metalurgia, igual cantidad de etapas, que procesan agua salada del mismo yacimiento que habían estado en funcionamiento entre 6 y 10 años sin mantenimientos mayores comparándose los resultados obtenidos con los valores originales suministrados por el fabricante.

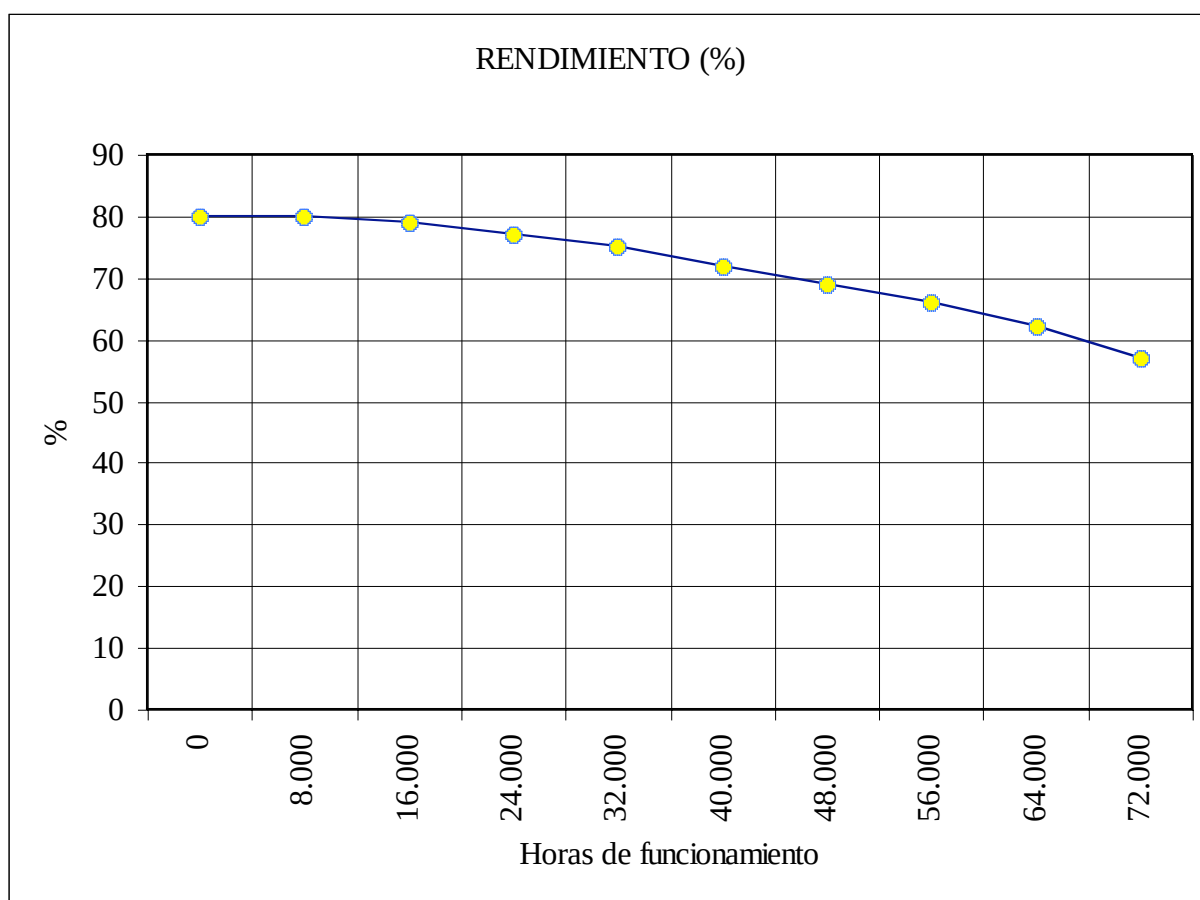


Figura 3

Tal como puede apreciarse, la evolución del rendimiento es declinante a medida que la bomba permanece en funcionamiento, cuando no se realiza ningún tipo de mantenimiento mayor (overhaul).

Se entiende por mantenimiento mayor, que la bomba será desarmada, inspeccionada y se llevarán sus huelgos internos a los valores originales ya sea reemplazando partes ó bien maquinando otras.

Asimismo, para una bomba multietapa que había funcionado 64.000 horas, mediante la realización del ensayo de performance, se obtuvieron las siguientes curvas H-Q:

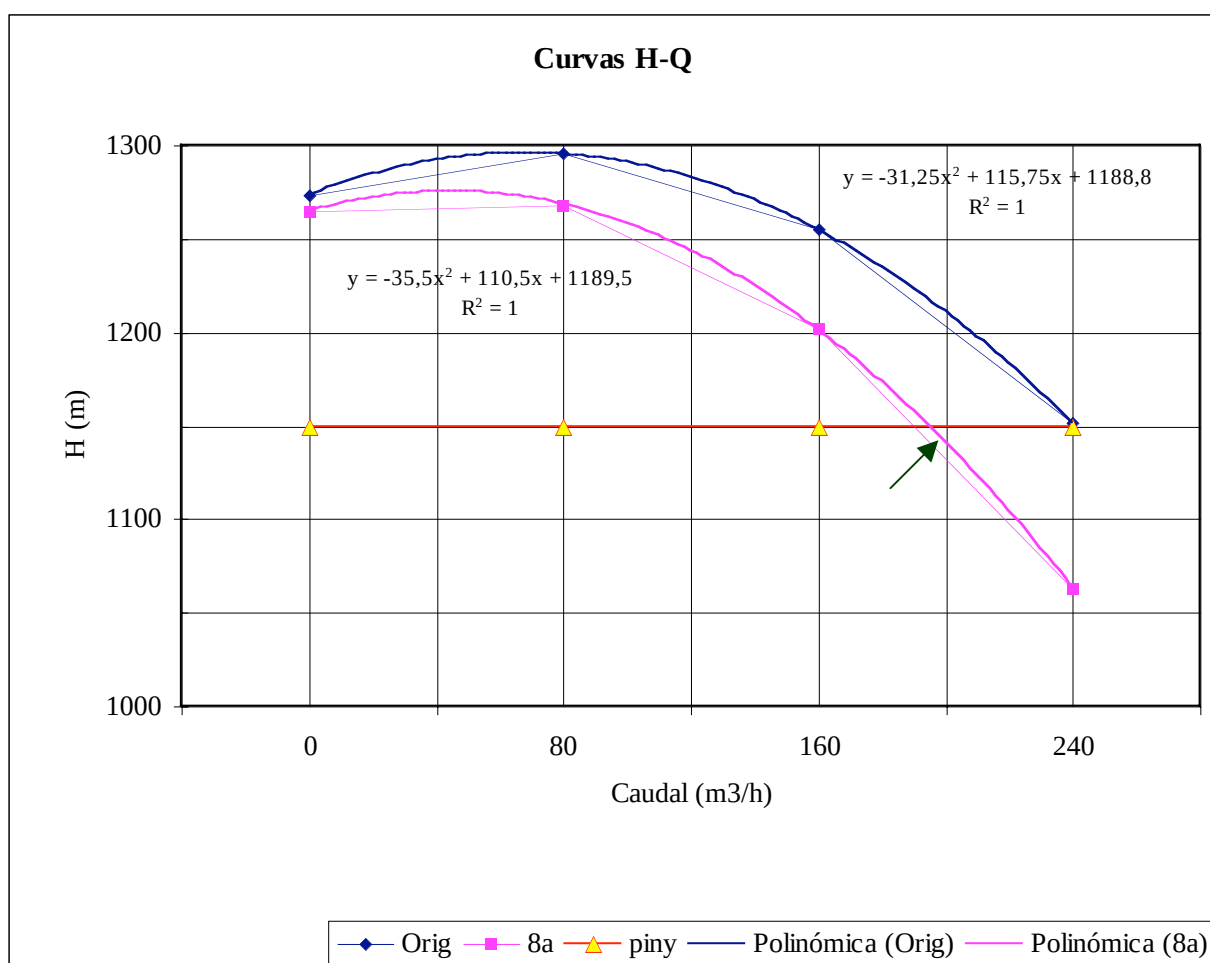


Figura 4

La curva superior está construida sobre los puntos obtenidos del ensayo en fábrica en origen y la curva inferior es el resultado del ensayo luego de haber funcionado 64.000 hrs.

Como para este caso la presión de impulsión es de 1.150 m se ha indicado a la misma en la figura.

Tal como puede apreciarse en la figura 4, el punto de funcionamiento original se corrió hacia la izquierda, pasando de 240 m³/h a 195 m³/h, para igual presión de inyección.

Entonces, la bomba está inyectando el 81,25 % del caudal de diseño.

Será esto importante ?

Antes de iniciar las ponderaciones económicas, veamos la siguiente figura que compara los rendimientos de una bomba que se la mantuvo funcionando hasta las 72.000 hrs. Versus una bomba similar pero que se le hizo un mantenimiento mayor a los 48.000 hrs.

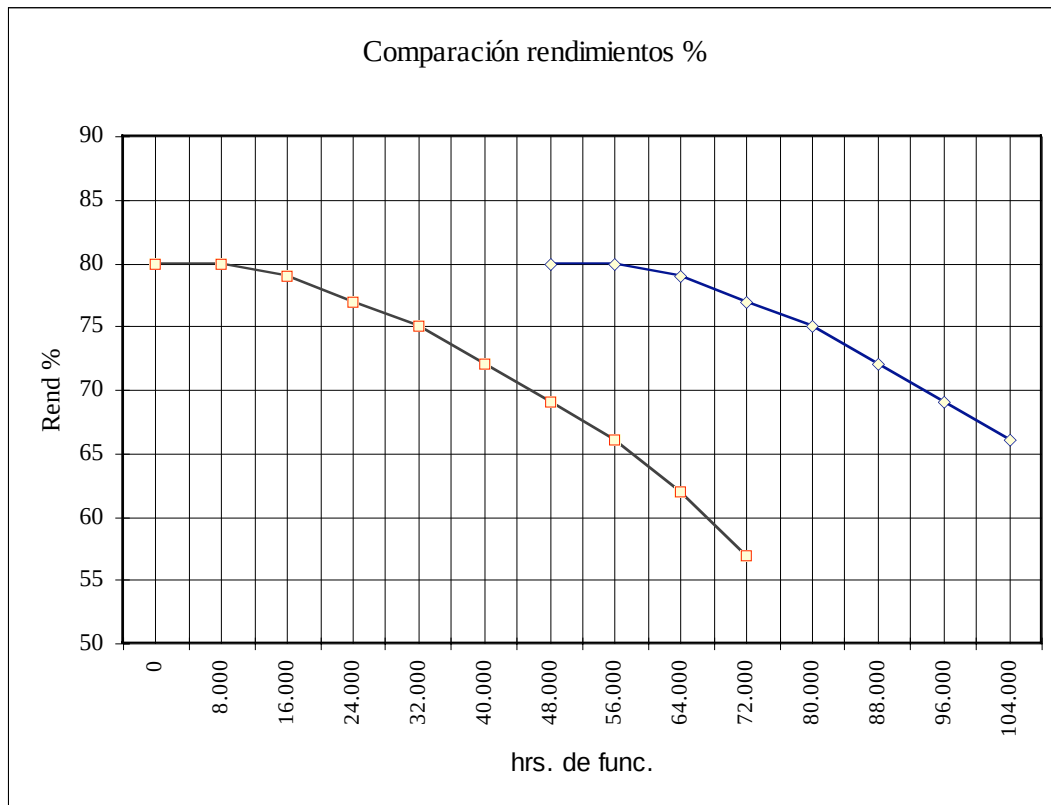


Figura 5

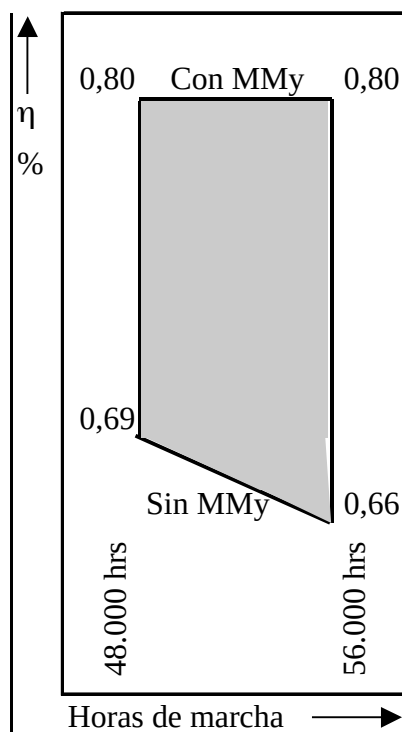
Al realizarse un mantenimiento mayor la bomba recupera sus huelgos originales, sus internos son limpiados, es balanceada, etc., con lo cual prácticamente recupera en gran parte su curva original.

Según vemos en la Figura 5 a medida que transcurren las horas de funcionamiento aumenta la diferencia entre los rendimientos de una bomba con mantenimiento mayor realizado versus la misma sin mantenimiento mayor.

Horas de marcha	Con Mant. Mayor	Sin Mant. Mayor	Diferencia
56.000	80 %	66 %	14 %
64.000	79 %	62 %	17 %
72.000	77 %	57 %	20 %

Si hacemos un “zoom” en la figura 05, podremos visualizar que luego de 48.000 hrs de marcha se plantean dos opciones:

- Realizarle a la bomba un Mantenimiento Mayor (MMY), con lo cual se recupera el rendimiento inicial (el cual se conserva prácticamente constante durante el primer año)
- No realizarle a la bomba un Mantenimiento Mayor (MMY) y entonces el rendimiento que estaba en un 69% declinará a lo largo del año al 66%



En el cuadro siguiente se comparan los rendimientos y los caudales que se podrán bombear según se realice ó no el Mantenimiento Mayor (MMY), para igual presión de inyección.

En la columna de la derecha se hace la diferencia (Dif) entre los caudales mensuales de agua salada inyectados a 48.000 y 56.000 hrs de marcha, con y sin MMY.

Finalmente se promedian los valores y se obtiene que la diferencia a favor de haber realizado el MMY es de 27.000 m³/mes de agua inyectada.

	Hrs	Rend	Caudal			Dif.
		%	m3/h	m3/d	m3/mes	m3/mes
Con MMy	48.000	0,80	240	5.760	172.800	
	56.000	0,80	240	5.760	172.800	
Sin MMy	48.000	0,69	207	4.968	149.040	
	56.000	0,66	198	4.752	142.560	
Con MMy	48.000				172.800	
Sin MMy	48.000				149.040	23.760
Con MMy	56.000				172.800	
Sin MMy	56.000				142.560	30.240
					172.800	
promedio			202,5	4.860	145.800	27.000

Ahora bien, esta diferencia de volumen de agua inyectado (27.000 m3/mes) se emplea para obtener crudo. Se plantea una tabla con distintos % de crudo en agua que se recupera, el cual ingresa a las Plantas de tratamiento:

% C/A		agua		crudo	
%		m3/mes		m3/mes	B/mes
0,5		27.000		135	851
1		27.000		270	1.701
2		27.000		540	3.402
5		27.000		1.350	8.505

Para % Crudo/Agua que van del 0,5% al 5%, se obtendrán para dicho caudal de agua inyectada, desde 851 a 8.505 Barriles/mes dentro del período considerado.

Con dichos resultados, se confecciona un cuadro que contempla distintos valores del crudo (u\$/B) y diferentes % Crudo/Agua inyectada para los barriles/mes obtenidos de la tabla precedente.

En la columna de la derecha se obtienen los montos (u\$/mes) que se dejan de percibir mensualmente, dependiendo de todos los factores antes expuestos.

%	u\$/B	B/mes	u\$/mes
0,5	40	849	33.964
	50	849	42.455
	60	849	50.947
	70	849	59.438
1,0	40	1.698	67.929
	50	1.698	84.911
	60	1.698	101.893
	70	1.698	118.875
2,0	40	3.396	135.858
	50	3.396	169.822
	60	3.396	203.786
	70	3.396	237.751
5,0	40	8.491	339.644
	50	8.491	424.555
	60	8.491	509.466
	70	8.491	594.377

El monto de un MMY, tipo intermedio, de una bomba de estas características luego de haber funcionado satisfactoriamente 48.000 hrs, es de aproximadamente 85.000 a 100.000 u\$.

Al compararse este valor con los montos que se dejan de percibir mensualmente al no realizarse el MMY, se advierte que pese a ser el costo de la reparación importante, son de mayor orden las pérdidas asociadas a la producción.

Supongamos que se toma la decisión de enviar la bomba a MMY, luego de haber funcionado las 48.000 hrs. Si no hay bomba de reemplazo, se puede plantear lo siguiente:

Bomba detenida un mes por reparación	Hrs	Rend	Caudal		
		%	m3/h	m3/d	m3/mes
	48.000	0,69	207	4.968	149.040

% C/A	agua
%	m3/mes
2	149.040

crudo	
m3/mes	B/mes
2.981	18.748

%	u\$/B
2	40

B/mes	u\$/mes
18.748	749.934

Quedaría finalmente:

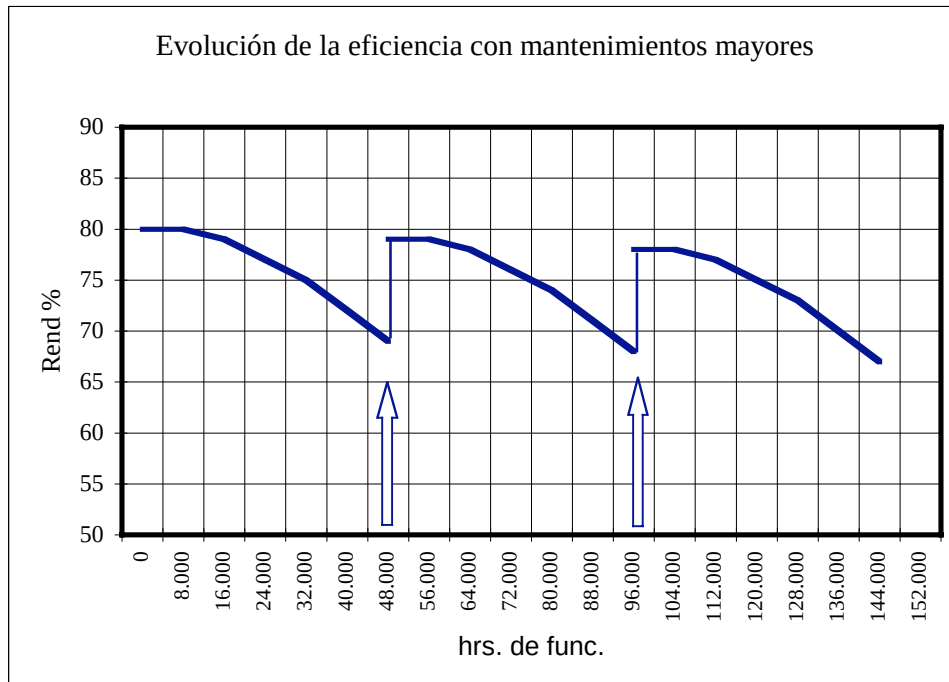
Mes de detención	749.934	87,6%
Costo reparación	100.000	11,7%
Otros gastos	6.066	0,7%
Total	856.000	100%

Perdida producción	135.858	u\$/mes
En un año	1.630.290	u\$/año

Por disminución de rend.

Por disminución de rend.

En este contexto, se advierte claramente la conveniencia de realizar los MMY de una manera programada y sistémica. Lo expuesto queda reflejado en la siguiente figura:



Una de las formas de mitigar el impacto de la pérdida de producción cuando la bomba se envía a reparación es mediante la adquisición de una bomba similar y disponerla en stand-by. Si el costo de reposición de la bomba fuera de 350.000 u\$, luego de 6 años a una tasa del 8%, se obtiene un valor de 560.000 u\$, inferior a la pérdida asociada por mes de detención.

2.5 Giro Inverso en Bombas centrífugas

Es un caso de funcionamiento anormal de las bombas centrífugas en las cuales incluiremos a las multietapas componentes del Sistema de Inyección.

La secuencia de los acontecimientos para que una bomba gire en sentido inverso al correcto, es el siguiente:

La bomba está conectada en paralelo a un colector de impulsión y funcionando a plena carga. Sea por que el operador acciona la detención del motor ó bien porque actúa alguna protección, el hecho es que se produce el paro de la bomba.

En estas circunstancias la presión en el colector de impulsión es superior a la presión de salida de la bomba. Si la única válvula activa entre la bomba y el colector de impulsión es la válvula retentora y ésta falla se produce un flujo de agua en sentido contrario, es decir desde la impulsión hacia la bomba, la cual comienza a girar en sentido contrario comportándose como una turbina hidráulica, arrastrado al motor y resto del conjunto rotante (ej. Caja incrementadora, bombas lubricadoras, etc.)

Dependiendo del tipo de falla en la válvula retentora instalada (clapeta simple, doble clapeta, a pistón, etc.) y de la presión en el colector será la magnitud del flujo que circulará en sentido contrario.

Si se tratara de una centrífuga multietapa, la presión en el colector será de por lo menos 100 Kg/cm².

En caso de suceder el funcionamiento de la bomba como turbina hidráulica, es posible que el operador no advierta lo que está sucediendo en forma inmediata por lo que este funcionamiento puede prolongarse durante algún tiempo.

En algunos casos: giro inverso a velocidad reducida, arrastre de motor eléctrico sin tensión y sin caja incrementadora, durante pocos minutos no ha ocasionado males mayores.

En otros casos, se han producido fallas catastróficas en la bomba, en la caja incrementadora y en el motor.

La falla en la válvula retentora puede ser por: rotura de alguno de sus internos, corrosión, desgastes excesivos.

El costo de reposición de esta válvula es del orden de 100 veces menor que la bomba multietapa.

Lo expuesto en este apartado es para destacar la necesidad de diagramar un Mantenimiento Integral del Sistema de Inyección de todos los componentes indicados en el apartado 1.1 y no solamente de la bomba y del motor, pues como hemos descripto una rotura en una simple válvula retentora puede llevar a una falla catastrófica.

En definitiva, cuando se plantean los mantenimientos mayores (MMY) se deben abarcar a todos los equipos involucrados.

2.6 Precomisionado y Comisionado. Puesta en marcha.

Ya sea cuando se va arrancar por vez primera a un equipo, luego de un paro de planta prolongado ó luego de la reparación del conjunto en talleres externos, es de buena práctica confeccionar una razonable planificación que asegure el éxito de la Puesta en Marcha.

Las estadísticas indican que es muy alto el porcentaje de fallas que se producen durante estos trabajos, pudiendo darse el caso de fallas catastróficas en equipos nuevos ó recién reparados.

En el apartado 2.4 se indicó la necesidad de programar y ejecutar Inspecciones y Mantenimientos Mayores a todos los equipos en general y en particular a los rotantes. Ponemos ahora el énfasis en que para poder completar el círculo es necesario contar con las metodologías adecuadas para la Puesta en Marcha del equipo enviado a reparar.

Trabajando en un marco de Calidad y de Integridad, el proceso se inicia con la detención del conjunto, en nuestro caso el Sistema de Inyección, se desmontan los equipos componentes del sistema y en los casos que corresponda se los envía a talleres externos. Una vez reparados y ensayados, son montados nuevamente, precomisionados, comisionados y puestos en marcha. Con el Sistema de Inyección funcionando a valores nominales finaliza este proceso.

Supongamos que se han enviado a inspeccionar / reparar a talleres externos: bomba multietapa, motor eléctrico, válvula reguladora, válvula retentora y válvula de bloqueo. Es lógico pensar que se aprovechará la situación para verificar y calibrar instrumentos, chequeo del PLC, lógica de control y protecciones de la celda eléctrica, etc.

En definitiva, están interviniendo en los equipos varias cuadrillas de mantenimiento de distintas especialidades: mecánicas, eléctricas, instrumentos, montadores.

La única manera de asegurarnos que todo estará en su lugar correcto es mediante la realización de una actividad denominada “precomisionado” en la cual se verifica el completamiento mecánico de las instalaciones.

Así por ejemplo se controlan que estén todos los instrumentos, que los equipos estén correctamente sujetos a su patín, que se hayan alineado, que las válvulas han sido montadas correctamente, que es correcto el sentido de giro del motor, que los cojinetes cuentan con aceite, etc.

Finalizada la etapa anterior comienza el “comisionado”, es decir se realizarán las pruebas finales con el ingreso de agua a la bomba, verificándose pérdidas, realizándose las purgas y venteos correspondientes. Si todo está en orden, se podrá dar inicio a la Puesta en Marcha.

Es de buena práctica registrar los parámetros funcionales más importantes durante las primeras dos horas de funcionamiento, medir vibraciones y estar atentos a cualquier anomalía.

Si no se producen inconvenientes luego de 24 horas de funcionamiento, el equipo ha superado la “marcha de confiabilidad” y queda liberado para su uso operacional.

3. Conclusiones

En términos generales, los equipos que están funcionando en las plantas de los yacimientos de petróleo tienen ya algunos años de marcha.

Considerando los conceptos de Calidad, Integridad y Optimización se concluye que es necesario planificar y ejecutar las tareas vinculadas a las Inspecciones y Mantenimientos Mayores para recuperar las condiciones de funcionamiento nominal de las instalaciones.

En este trabajo, hemos desarrollado los aspectos vinculados al Sistema de Inyección de Agua y en particular a las bombas centrífugas multietapas, quedando en evidencia la conveniencia económica de ejecutar un Programa de Reparaciones Mayores.

El proceso completo requiere de adecuadas metodologías para la Puesta en Marcha de los equipos que fueron enviados a reparar.

Entendemos que con la ejecución de los programas actuales de mantenimiento anual más el agregado de programas consolidados de mantenimientos mayores se obtendrán excelentes índices de disponibilidad y confiabilidad de los equipos disminuyendo los riesgos de fallas catastróficas, con el consiguiente aumento de la producción.

4. Bibliografía

4.1 Manuales de operación y mantenimiento de bombas multietapas

4.2 Bombas utilizadas como turbinas (Orlando Audisio)

4.3 Turbomáquinas Hidráulicas (Claudio Mataix)

4.4 Máquinas Hidráulicas (Camilo B. Rodríguez)