

**DISMINUCIÓN PREMATURA DE LA PERFORMANCE DE BOMBAS
CENTRÍFUGAS MULTITAPAS.
DETECCIÓN, MEDICIÓN Y DIAGNÓSTICO DE LA CAUSA.**

Autores	Empresa	e mail
Zuleima Urbina	Petrobras	zuleima.urbina@petrobras.com
Federico Alonso	Petrobras	federico.alonso@petrobras.com
Diego De Faveri	Skanska	diego.defaveri@skanska.com.ar
Jorge Fernández Mosconi	Skanska	jorge.fernandez@skanska.com.ar

Junio 2.009

ÍNDICE

1. SINOPSIS	3
2. INTRODUCCIÓN	4
3. DESARROLLO.....	4
3.1. UBICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LAS INSTALACIONES	4
3.1.1. DATOS TÉCNICOS DE LAS BOMBAS Y MOTORES	6
3.1.2. INSTRUMENTACIÓN ASOCIADA.....	7
3.2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	7
3.3. OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE LAS BOMBAS Y MOTORES.....	7
3.4. PRUEBAS OPERATIVAS	8
3.4.1. ESTIMACIÓN DEL CAUDAL POR DIFERENCIAS.....	8
3.4.2. MEDICIÓN DE LA PRESIÓN DE IMPULSIÓN A VÁLVULA CERRADA.....	8
3.4.3. MEDICIONES DE CAUDAL IN SITU	8
3.5. ESTUDIO DE SIMULACIÓN.....	11
3.5.1. METODOLOGÍA:	11
3.6. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS Y LA SIMULACIÓN.	14
3.7. ENSAYOS EN FÁBRICA	14
3.7.1. ENSAYO DE PERFORMANCE	14
3.7.2. DESARME DE LA BOMBA.....	15
3.7.3. ENSAYOS DE LABORATORIO.....	18
4. CONCLUSIONES.....	18
5. BIBLIOGRAFÍA.....	19

1. SINOPSIS

Como consecuencia de haberse detectado una persistente pérdida en el caudal total bombeado en una planta de inyección de agua salada en un Yacimiento ubicado en la Cuenca Neuquina, fue necesario iniciar un análisis técnico para detectar y corregir las posibles causas del problema.

Los equipos afectados eran siete bombas centrífugas multietapas con características de funcionamiento parecidas, pero no iguales, las cuales se indican a continuación:

- Caudal nominal: 240 m³/h
- Altura nominal: 1.100 a 1300 m
- Potencia nominal: 1300 a 1550 CV,
- Cantidad de etapas. 12
- Accionamiento: Motor eléctrico de Media Tensión

Las bombas se habían ido incorporando a la planta con el transcurrir del tiempo, según los requerimientos del sistema de inyección, teniendo algunas de ellas más de 80.000 hrs. de funcionamiento y otras pocas horas de uso.

Estos equipos son críticos dentro del proceso, debiendo estar todas estas bombas operando las 24 hrs. del día para evitar paro o reducción de la producción.

Las bombas no poseen caudalímetros individuales, siendo medido el caudal mediante totalizadores en cada ramal de inyección a la salida de la planta.

La presentación tratará sobre los pasos que se siguieron para la detección, medición, diagnóstico y solución del problema, que devolvieron a las bombas a su condición básica.

Estos pasos incluyeron la medición mediante métodos no invasivos de los parámetros de operación de las bombas y el desarrollo de una simulación hidráulica del sistema de bombeo.

Los síntomas eran una evidente disminución del caudal total para igual presión a la salida, con ausencia de vibraciones, sin ruidos anormales ni aumentos de temperaturas.

Se compararon las curvas obtenidas a partir de la simulación hidráulica y de las mediciones realizadas, con las curvas de funcionamiento originales de las bombas, encontrándose así bombas más afectadas que otras. No se correspondía el tiempo de funcionamiento de los equipos con la disminución de la performance observada en los mismos.

2. INTRODUCCIÓN

Tal lo descrito en el punto precedente, a continuación desarrollarán conceptualmente los pasos seguidos para detectar la raíz del problema.

3. DESARROLLO

3.1. UBICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LAS INSTALACIONES

La Planta de Inyección de Agua Salada objeto de este estudio, forma parte de una Planta de Tratamiento de Agua Producida ubicada en un yacimiento de recuperación secundaria de la Cuenca Neuquina.

La función de la planta es la adecuación de los parámetros de calidad del agua de formación para que la misma cumpla con los requerimientos estipulados por el yacimiento y el bombeo del caudal ingresante hacia la red de distribución de agua con la presión suficiente para alcanzar los diferentes puntos de inyección.

La planta de inyección de agua salada, cuenta con los siguientes equipos y tuberías principales:

- **Tanque pulmón de agua tratada:** Tiene una capacidad de 2500 m³, y desde el mismo se alimenta a dos colectores de aspiración de 16 pulgadas serie #150, de siete unidades de bombeo dispuestas en paralelo.
- **Unidades de bombeo.** Cada unidad de bombeo está compuesta básicamente: por tubería de aspiración de 8 pulgadas serie #150, filtro de succión tipo canasto, bomba centrífuga multietapa, motor eléctrico de accionamiento de media tensión, tubería de impulsión de 6 pulgadas serie #900 y válvula de regulación de presión de impulsión.
- **Colector de Impulsión:** las tuberías de impulsión de las bombas se unen a dos colectores de 16 pulgadas serie #900, desde donde se distribuyen hacia los distintos ramales de inyección.

En la Imagen N°1, que se muestra a continuación, se puede apreciar una vista de la ubicación de las bombas y motores eléctricos dentro de la casa de bombas.

En la Imagen Nro 2, se pueden observar la disposición de los colectores de aspiración e impulsión.

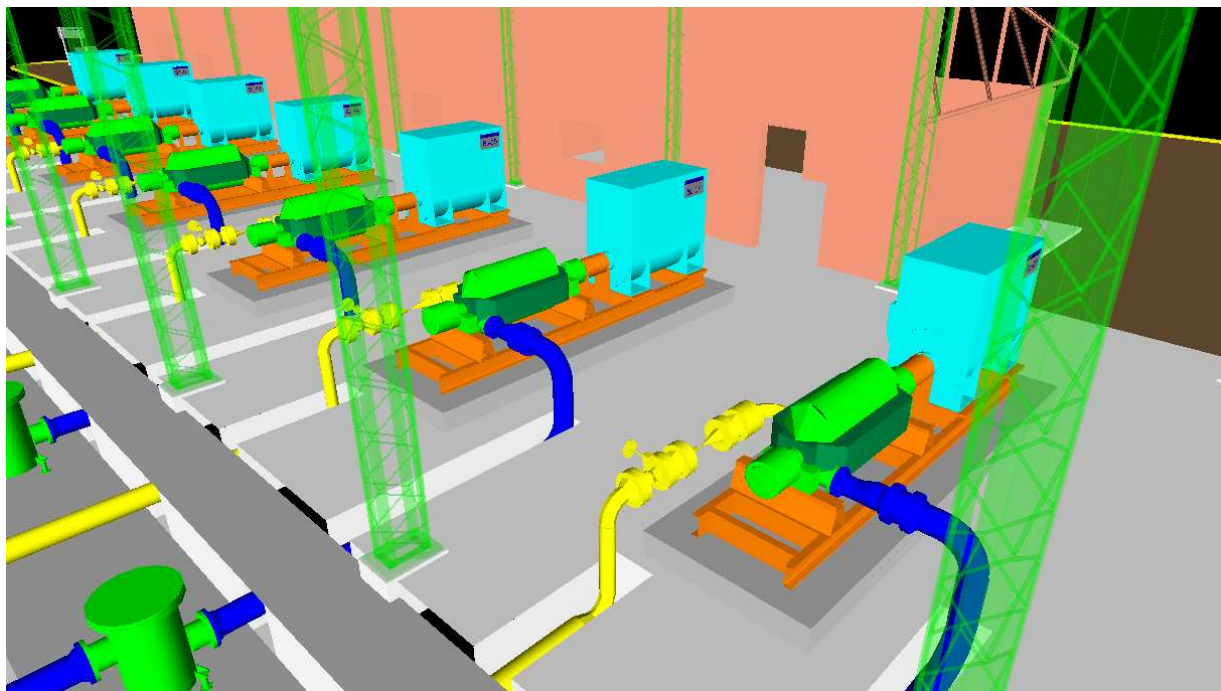


IMAGEN 1: Unidades de Bombeo.

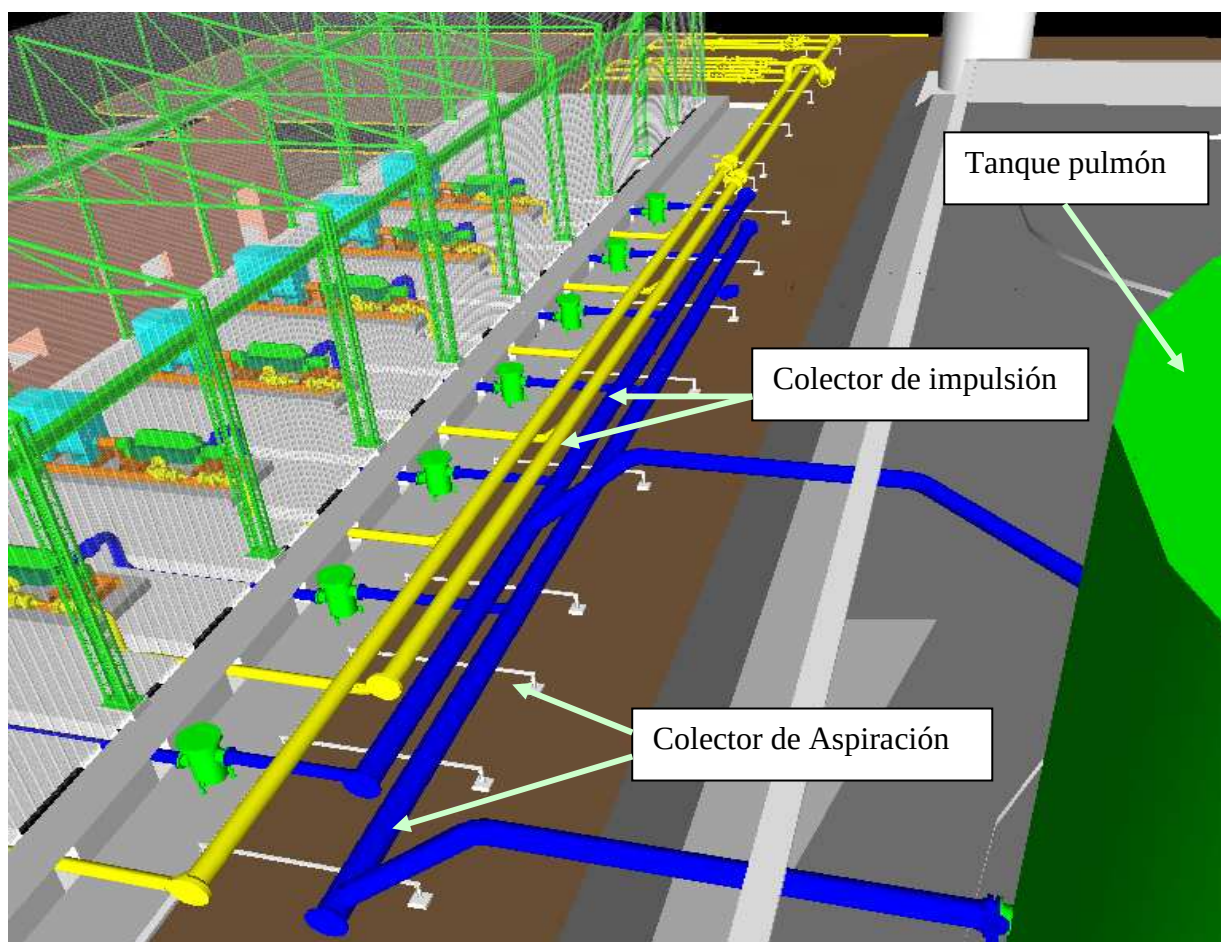


IMAGEN 2: Vista General de las Instalaciones.

3.1.1. DATOS TÉCNICOS DE LAS BOMBAS Y MOTORES

Se detallan a continuación las características principales de las bombas y motores como equipos mas importantes del sistema.

Bomba 1 Marca Byron Jackson Modelo 6x8x11M 12 Etapas Año de fabricación 1995 H de descarga 1043 m Caudal 227 m3/h Motor Marca GEVISA Tipo Inducción Potencia 1550 HP.	Bomba 2 Marca Byron Jackson Modelo 6x8x11M 12 Etapas Año de fabricación 1998 H de descarga 1138 m Caudal 227 m3/h Motor Marca GEVISA Tipo Inducción Potencia 1550 HP.
Bomba 3 Marca Byron Jackson Modelo 6x8x11M 12 Etapas Año de fabricación 2003 H de descarga 1270 m Caudal 240 m3/h Motor Marca GEVISA Tipo Inducción Potencia 1550 HP.	Bomba 4 Marca Byron Jackson Modelo 6x8x11M 12 Etapas Año de fabricación 2000 H de descarga 1158 m Caudal 240 m3/h Motor Marca GEVISA Tipo Inducción Potencia 1550 HP.
Bomba 5 Marca Byron Jackson Modelo 6x8x11M 12 Etapas Año de fabricación 2003 H de descarga 1270 m Caudal 240 m3/h Motor Marca WEG Tipo Inducción Trifásico Potencia 1650 HP.	Bomba 6 Marca Byron Jackson Modelo 6x8x11M 12 Etapas Año de fabricación 2004 H de descarga 1270 m Caudal 240 m3/h Motor Marca WEG Tipo Inducción Trifásico Potencia 1650 HP.
Bomba 7 Marca Byron Jackson Modelo 6x8x11M 12 Etapas Año de fabricación 2004 H de descarga 1270 m Caudal 240 m3/h Motor Marca WEG Tipo Inducción Trifásico Potencia 1650 HP.	

TABLA 1: Resumen de Datos Técnicos de Bombas y Motores.

Estos equipos son críticos dentro del proceso, debiendo estar todas estas bombas operando las 24 hrs. del día para evitar paro o reducción de la producción.

3.1.2. INSTRUMENTACIÓN ASOCIADA

Como principales instrumentos de medición con envío de señal al sistema de tele supervisión y de los cuales pueden obtenerse valores históricos, se encuentran los siguientes:

- **Medición de Caudal:** la instalación cuenta con caudalímetros magnéticos en cada ramal de inyección de salida de la planta que miden el caudal total evacuado por el sistema. No se cuenta con la medición del caudal individual de cada unidad de bombeo.
- **Medición de presión:** cada unidad de bombeo cuenta con un transmisor de presión de impulsión de la bomba. Además se cuenta con la medición de la presión del colector de salida de planta.
- **Medición de parámetros eléctricos:** el motor de las unidades de bombeo, cuenta con medición de intensidad de corriente consumida.
- **Medición de posición de válvula reguladora:** se cuenta con indicación en el sistema de tele supervisión del porcentaje de apertura de las válvulas de regulación de presión de impulsión de cada unidad de bombeo.

3.2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

De acuerdo a los partes diarios de la planta y a los valores históricos, el caudal evacuado por las unidades de bombeo estaba disminuyendo en comparación con los valores de referencia.

Un análisis preliminar de la capacidad de bombeo del sistema indicó que existía una diferencia importante entre los valores totales esperables y el valor de caudal total medido por los caudalímetros de salida de planta.

El orden del faltante era del 25% aproximadamente, comparable con el caudal nominal de dos de las siete bombas allí instaladas.

Esta anomalía no se había registrado con anterioridad. Además, no había evidencias de vibraciones, ruidos extraños, las temperaturas del proceso se mantenían estables, en definitiva, no se percibían indicios de donde podía estar el desvío.

La evaluación macro de la situación hizo dividir el estudio en dos grandes zonas:

- el sistema de inyección propio de la planta
- la red externa de distribución de inyección fuera de los límites de la planta.

Se decidió focalizar el análisis en el primero de los puntos. Las causas probables iniciales se asociaban a pérdidas de carga localizadas en algunos puntos de la instalación, desgaste excesivo de los internos de las bombas y disminución de la eficiencia eléctrica de los motores.

3.3. OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE LAS BOMBAS Y MOTORES.

La planta se venía operando desde hacía ya unos diez años y no se habían cambiado las pautas operativas últimamente.

La planta fue incrementando su capacidad de inyección con la incorporación de nuevas bombas a medida que los requerimientos del yacimiento así lo indicaban.

Dichas bombas estaban funcionando normalmente durante los 365 días del año, excepto durante los mantenimientos programados o causas externas de fuerza mayor.

Las últimas dos bombas se montaron y pusieron en marcha en año 2005.

El Plan de Mantenimiento se venía realizando de manera rutinaria, tanto los preventivos como los mantenimientos mayores.

Previo a la aparición del problema, un par de bombas habían sido enviadas a los talleres de fabricante para realizar un mantenimiento integral, que incluyó el desarme, la inspección de sus internos y eventual reemplazo de las partes desgastadas. No se había encontrado nada anormal, más allá del desgaste propio del uso.

Los mantenimientos mayores de este tipo de bombas son realizadas en los talleres del fabricante.

3.4. PRUEBAS OPERATIVAS

Una vez identificada la merma en el caudal total bombeado e inyectado se planificaron y realizaron una serie de pruebas operativas, mencionándose a continuación las mas significativas.

3.4.1. ESTIMACIÓN DEL CAUDAL POR DIFERENCIAS

Al contarse únicamente con caudalímetros totalizadores en los ramales de inyección a la salida se realizaron una serie de pruebas que consistían en detener alguna de las bombas, manteniendo las mismas condiciones operativas de las restantes (presión de impulsión) tratando de encontrar algún indicio de anomalía y de estimar el caudal evacuado por la bomba por diferencia en la medición de los caudalímetros de salida de planta.

Se realizó el ensayo en tres bombas, las dos bombas más recientemente montadas y la bomba que mas horas de funcionamiento registraba. Los resultados obtenidos no fueron los esperados ya que los caudales evacuados medidos por diferencia eran muy similares entre si, y alejados de los valores de las curvas de las bombas, no habiendo relación lógica aparente entre el tiempo de funcionamiento y la disminución de caudal.

Eran necesarios otros ensayos de confirmación.

3.4.2. MEDICIÓN DE LA PRESIÓN DE IMPULSIÓN A VÁLVULA CERRADA

El objeto de este ensayo fue verificar el punto de funcionamiento de las bombas y de los motores de las mismas a caudal nulo (válvula cerrada), de manera de compararlo con los valores de la curva características de las mismas en busca de diferencias.

Nuevamente se realizó el ensayo sobre las mismas bombas anteriores.

Los resultados indicaron que la dispersión final entre las mediciones realizadas y los valores de curva en este punto de funcionamiento oscilaba entre el 3 y 6%, según el caso para las tres bombas consideradas.

Estas diferencias no eran determinantes para asegurar que las bombas estaban fuera de su punto de funcionamiento a caudal nulo, si bien se percibía una ligera tendencia decreciente. Nuevamente en este caso esto parecía ser independiente de las horas de marcha de los equipos analizados.

3.4.3. MEDICIONES DE CAUDAL IN SITU

A los efectos de conocer los caudales unitarios fue necesario utilizar un caudalímetro externo ultrasónico que se colocó en las zonas mas apropiadas de la tubería de impulsión de cada bomba.

Para verificar el eventual desvío que pudiera tener la medición, en primer lugar se compararon los valores obtenidos entre los caudalímetros magnéticos a la salida de la planta con el caudalímetro ultrasónico.

En la Imagen N°3 se puede apreciar la configuración de las tuberías a la salida: las impulsiones de las bombas se dividen en dos colectores, los cuales a su vez distribuyen el agua en cinco ramales de inyección (uno de los cuales no estaba siendo utilizado)

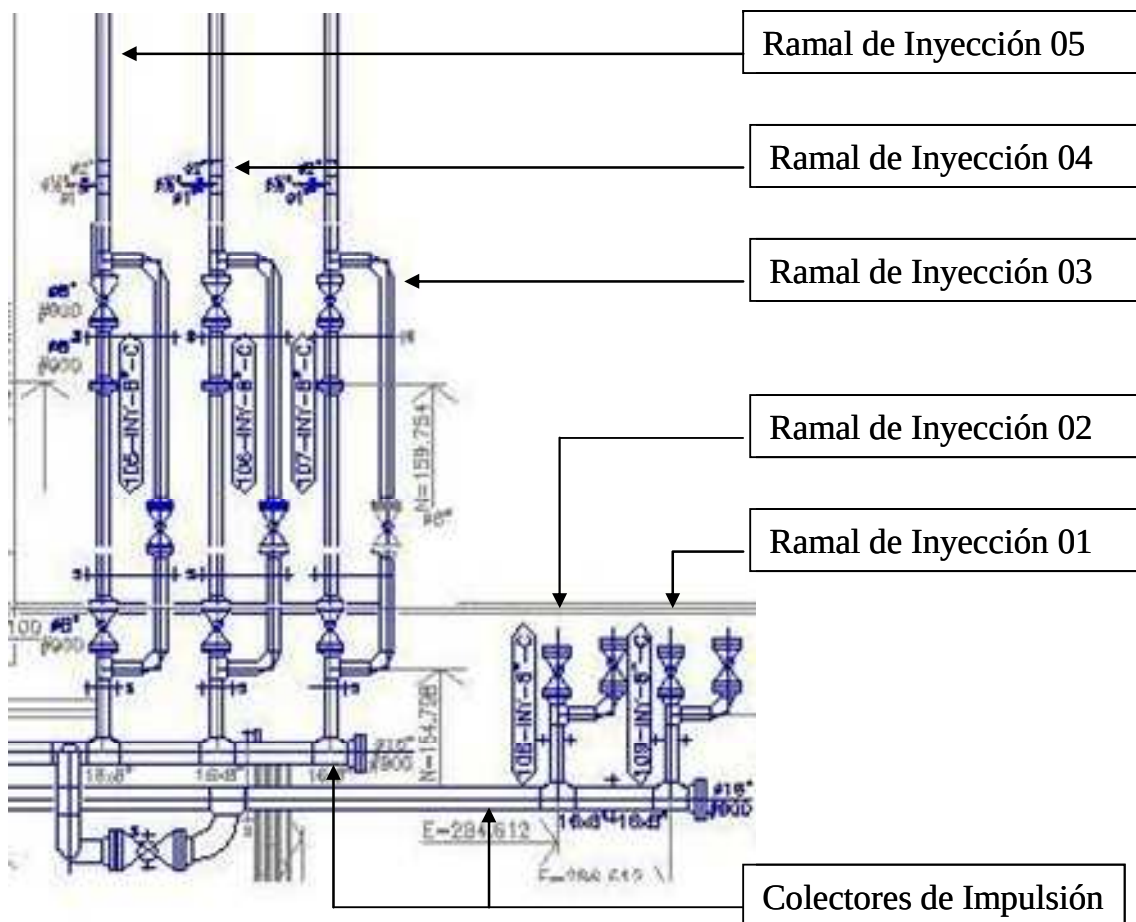


IMAGEN 3: Esquema de Ramales de Inyección. Salida de Planta.

Se determinaron así las diferencias entre las mediciones, arrojando valores comparables (entre un 5 y 13 % de diferencia). En la siguiente tabla se muestran estos valores obtenidos.

Ramales	Caudalímetros		Diferencias	
	Magnético	Ultrasónico		
Nros	(m3/h)	(m3/h)	(m3/h)	%
01	317	366	49	13,4
02	266	300	34	11,3
03	530	560	30	5,4
04	135	153	18	11,8
Total	1248	1379	131	9,5

TABLA 2: Caudales Medidos. Caudalímetro Magnético vs Ultrasónicos

Una vez conocidas y acotadas las diferencias entre los caudalímetros, se procedió a la medición individual de caudal en cada bomba. Se tomaron adicionalmente y en el mismo momento, algunos valores operativos tales como presión de impulsión y de aspiración de las bombas e intensidad de corriente de los motores.

Se repitió la secuencia en cada una de las siete bombas y al finalizar se sumaron los caudales medidos en cada una y se compararon con el valor de caudal total inicialmente medido en los ramales de salida de planta con el mismo instrumento. Se obtuvo prácticamente el mismo valor (0.7% de diferencia), concluyendo que las mediciones, si bien podían poseer un error (que fue estimado contrastando con los caudalímetros de planta), podrían igualmente utilizarse para la estimación de los puntos de funcionamiento reales de las bombas. Existía repetibilidad en los errores.

De esta forma se obtuvo con cierto grado de precisión un punto de la curva de funcionamiento real de cada una de las bombas.

Pudo advertirse, al compararse con las curvas originales, que en casi todos los casos el punto de funcionamiento medido estaba por debajo de la curva original siendo en algunos casos mucho mas significativo su desvío.

En el siguiente gráfico se muestran a modo de ejemplo, algunas de las diferencias encontradas para una bomba en particular tomando los valores medidos en este punto y en el ensayo anterior a válvula cerrada.

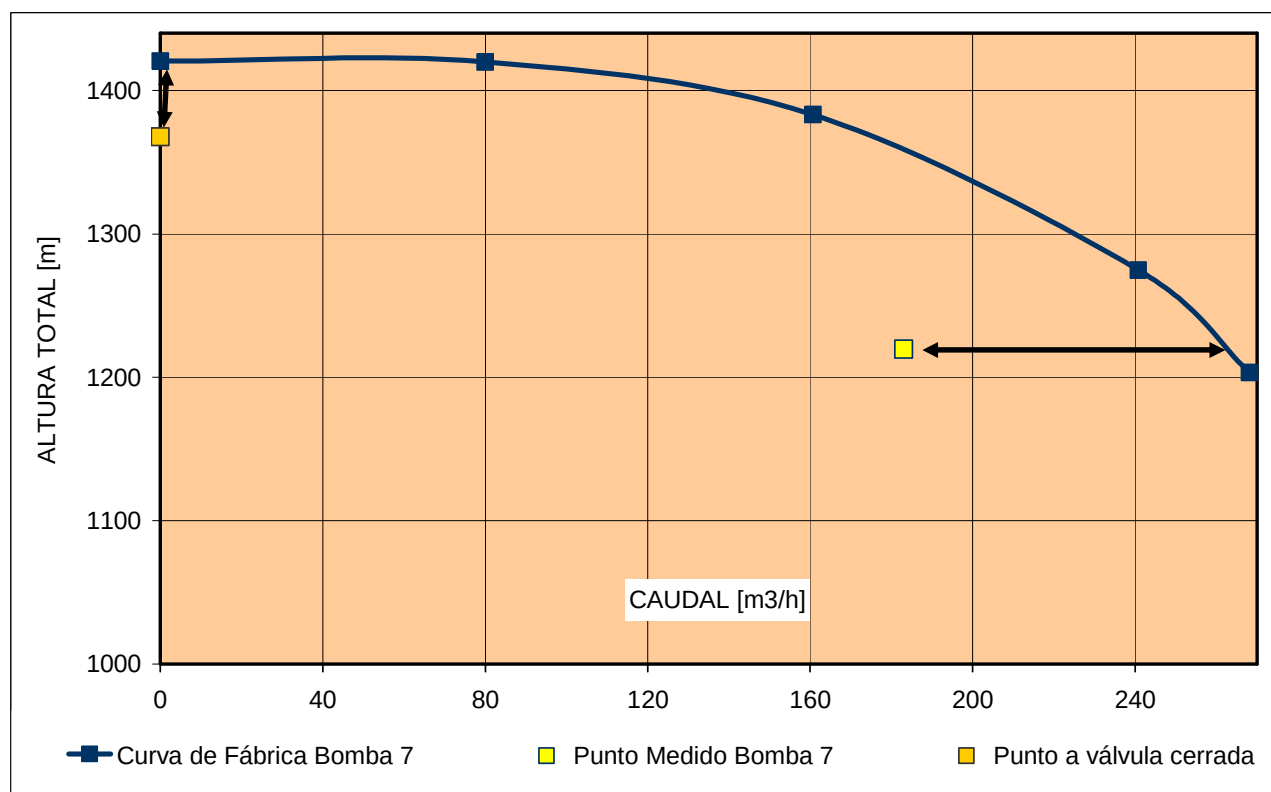


GRÁFICO 1

3.5. ESTUDIO DE SIMULACIÓN

Habiéndose realizado además de las pruebas mencionadas anteriormente, otras tareas de comprobación tales como: verificación de la correcta apertura y cierre de las válvulas, inspección y limpieza de los filtros de aspiración, chequeo del instrumental, medición de vibraciones, control de los registros eléctricos, etc, y dado que no se encontró allí la causa del problema, se decidió realizar un estudio de simulación hidráulica.

El objeto fue desarrollar un estudio de simulación que reprodujera el comportamiento de las variables hidráulicas de las siete bombas de la Planta de Inyección de Agua Salada.

Esto incluía el análisis de las siete unidades de bombeo y de los dos colectores de impulsión.

Se fijó como límites físicos del estudio desde la brida de aspiración de cada una de las bombas multietapas hasta la sección de salida del colector de impulsión hacia los ramales de inyección.

3.5.1. METODOLOGÍA:

Se realizó el relevamiento de las instalaciones dentro de los límites definidos (longitudes, diámetros y espesores de tuberías, cantidad y tipo de accesorios, etc.). Se realizaron los cálculos de pérdida de carga en función del caudal en cada tramo de tubería y la pérdida de carga total desde la salida del sistema hasta la impulsión de cada bomba ($H_f = f(Q)$)

Se obtuvieron del fabricante las características técnicas de las válvulas de control específicamente, el C_v en función de porcentaje de apertura de válvula. Se realizó parametrización de los valores recibidos encontrando una función polinómica $C_v = f(\% \text{ de apertura})$, que reprodujera dicha relación. Se determinó luego la relación compuesta de la caída de presión en la válvula en función del caudal y del porcentaje de apertura de la misma ($\Delta P = f(Q, \% \text{ de apertura})$).

Con las mediciones de caudal y presión realizadas en las bombas se estimaron las curvas reales de performance (caudal vs. altura). Se realizó como en el punto anterior la parametrización de las mismas obteniéndose la función polinómica de $H=f(Q)$, para ser introducidas en la simulación.

Eran conocidas las propiedades físicas del fluido bombeado (peso específico, viscosidad, temperatura).

Los datos de entrada requeridos para el cálculo eran la presión de salida del sistema y el porcentaje de apertura de válvula de cada bomba. Ingresados estos valores, todas las funciones utilizadas en el cálculo quedan en función del caudal.

Mediante procesos iterativos el cálculo encuentra el valor de caudal que satisface simultáneamente todas las funciones anteriores, obteniendo el punto de funcionamiento en cada una de las bombas.

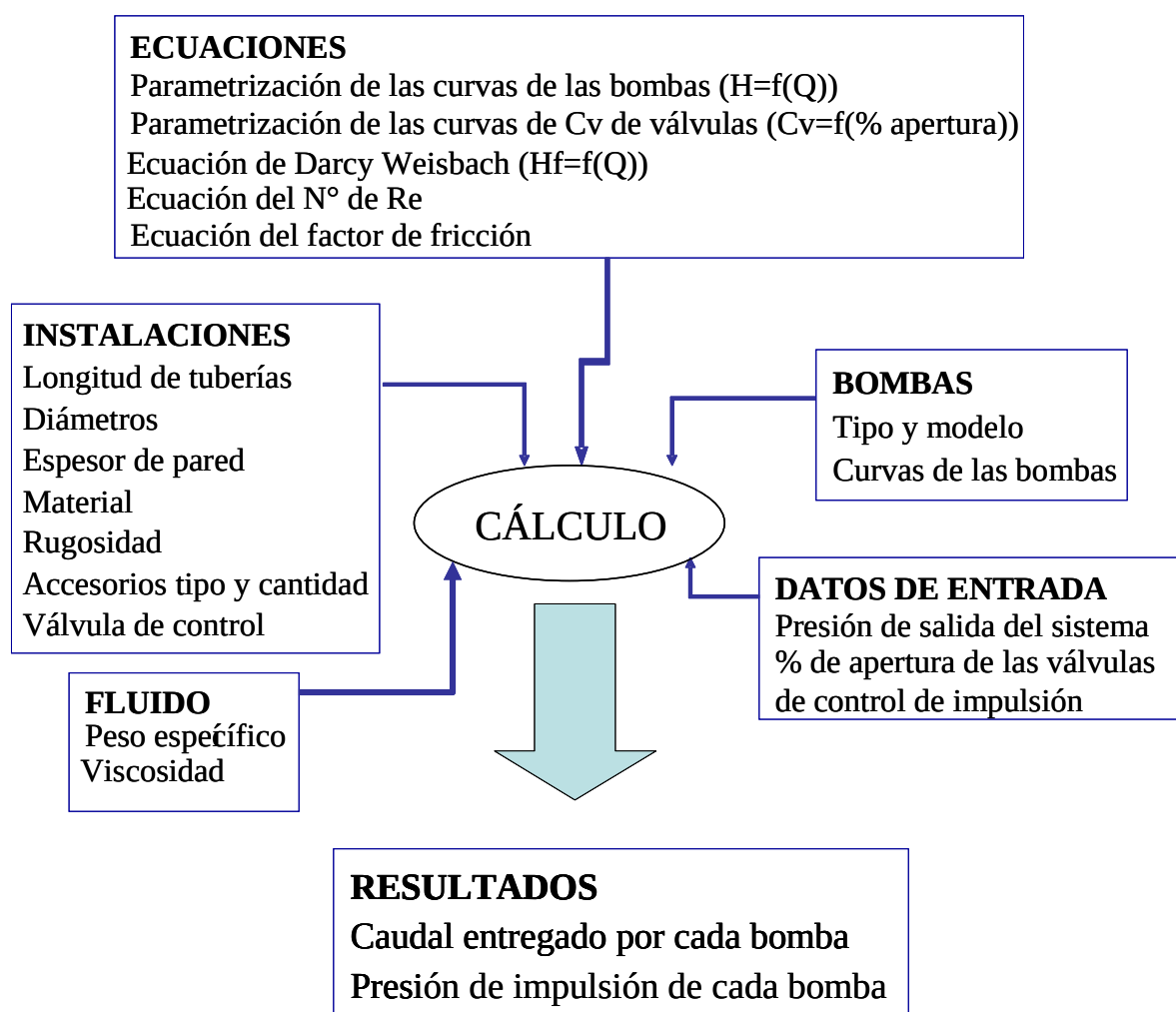


IMAGEN 4: Esquema Conceptual de la Simulación.

Para comprobar la exactitud de los cálculos y de la estimación de las curvas realizada, se compararon los valores disponibles de presión de impulsión de cada bomba y del caudal total medidos, con los valores calculados.

Los cálculos se repitieron para diferentes escenarios con diferentes presiones de salida del sistema y porcentajes de apertura de válvulas dando en cada caso valores de caudal total y de presión de impulsión calculados para cada bomba muy cercanos a los medidos en planta, la diferencia estaba acotada en el orden del 5 %. De esta manera se comprobó que las curvas de las bombas obtenidas por el proceso de simulación, se acercaban en gran medida a las reales.

Una vez realizadas las comprobaciones anteriores, se tiene una herramienta que permite la estimación de las variables hidráulicas del sistema a diferentes condiciones de presión de salida de planta y porcentaje de apertura de válvulas de control, pudiendo determinar el caudal individual evacuado por cada bomba (y con estos el caudal total) y las presiones de impulsión de las mismas en función de los datos anteriores.

Como ejemplo de lo anterior se muestra en el siguiente gráfico, el caudal total calculado que evacuaría el sistema a diferentes presiones de salida de planta, considerando que las válvulas de control se encuentran abiertas 100%.

En el mismo gráfico se muestran dos curvas, una de ellas representa el caudal total calculado a partir de la simulación teniendo en cuenta las curvas originales de fábrica de las bombas y la otra se calculó según las curvas reales estimadas de las mismas.

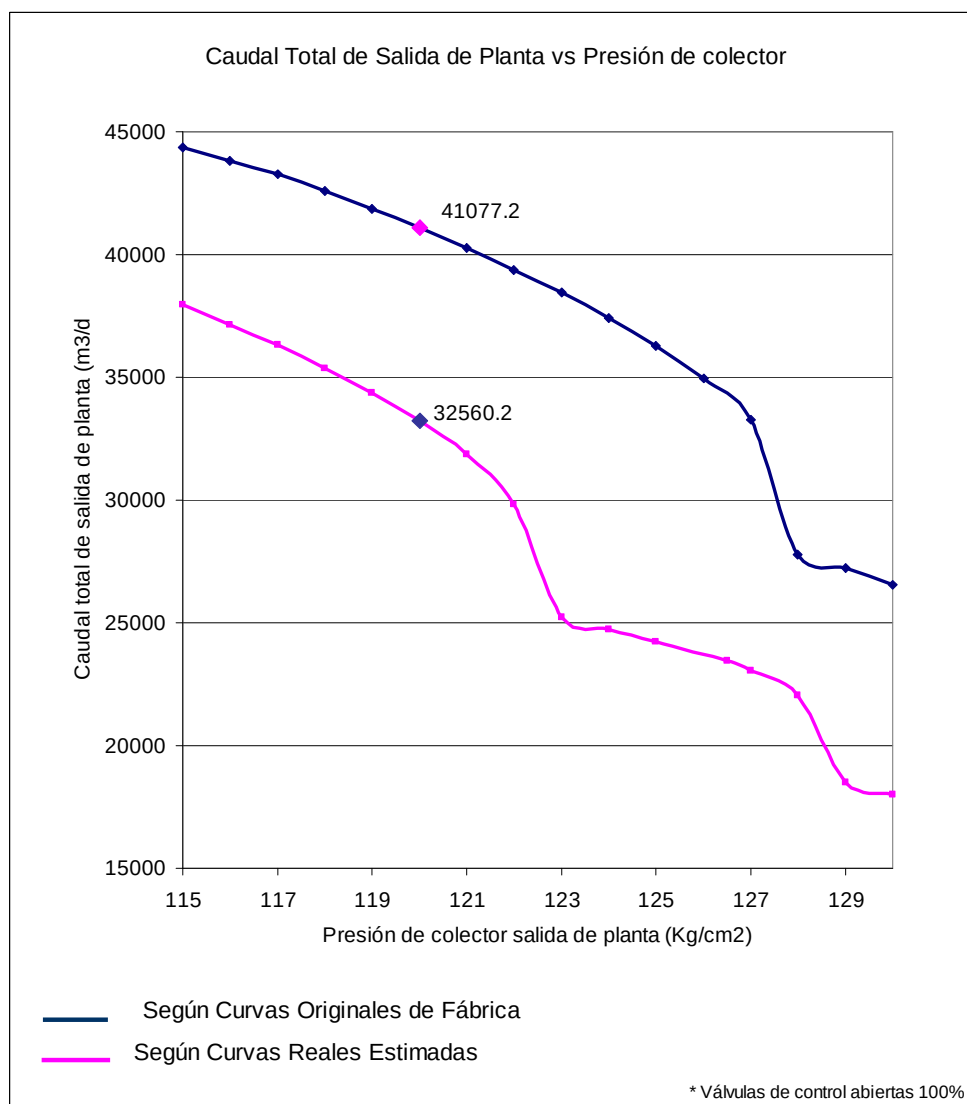


GRÁFICO 2

3.6. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS Y LA SIMULACIÓN.

Como resultado de los ensayos realizados y de la simulación hidráulica, se determinaron pérdidas de performance en prácticamente todas las bombas de la planta de inyección en mayor o menor medida.

Paradójicamente se determinó que las bombas más afectadas eran las de más reciente montaje. Hasta ese momento se desconocía la causa física de esa disminución y se confirmaba que la misma no guardaba relación con el tiempo de funcionamiento de los equipos.

Habiéndose verificado el correcto funcionamiento de la simulación dado que reflejaba con buena aproximación los caudales y presiones reales, y teniendo en cuenta los ensayos y mediciones anteriores, se decidió el envío de la bomba que el estudio de simulación indicaba como la mas afectada a los talleres del fabricante para realizar un ensayo de performance según norma.

3.7. ENSAYOS EN FÁBRICA

3.7.1. ENSAYO DE PERFORMANCE

Una vez llegada la bomba al laboratorio de ensayo del fabricante y tal como la misma había sido retirada de su ubicación en la planta, se procedió a obtener la curva completa de funcionamiento real.

Se confirmó la disminución de performance y el acercamiento con la curva estimada en la simulación hidráulica.

Debido a la magnitud de la diferencia observada entre ambas curvas (original y real) se procedió a la apertura de la bomba para verificar el estado de sus internos.

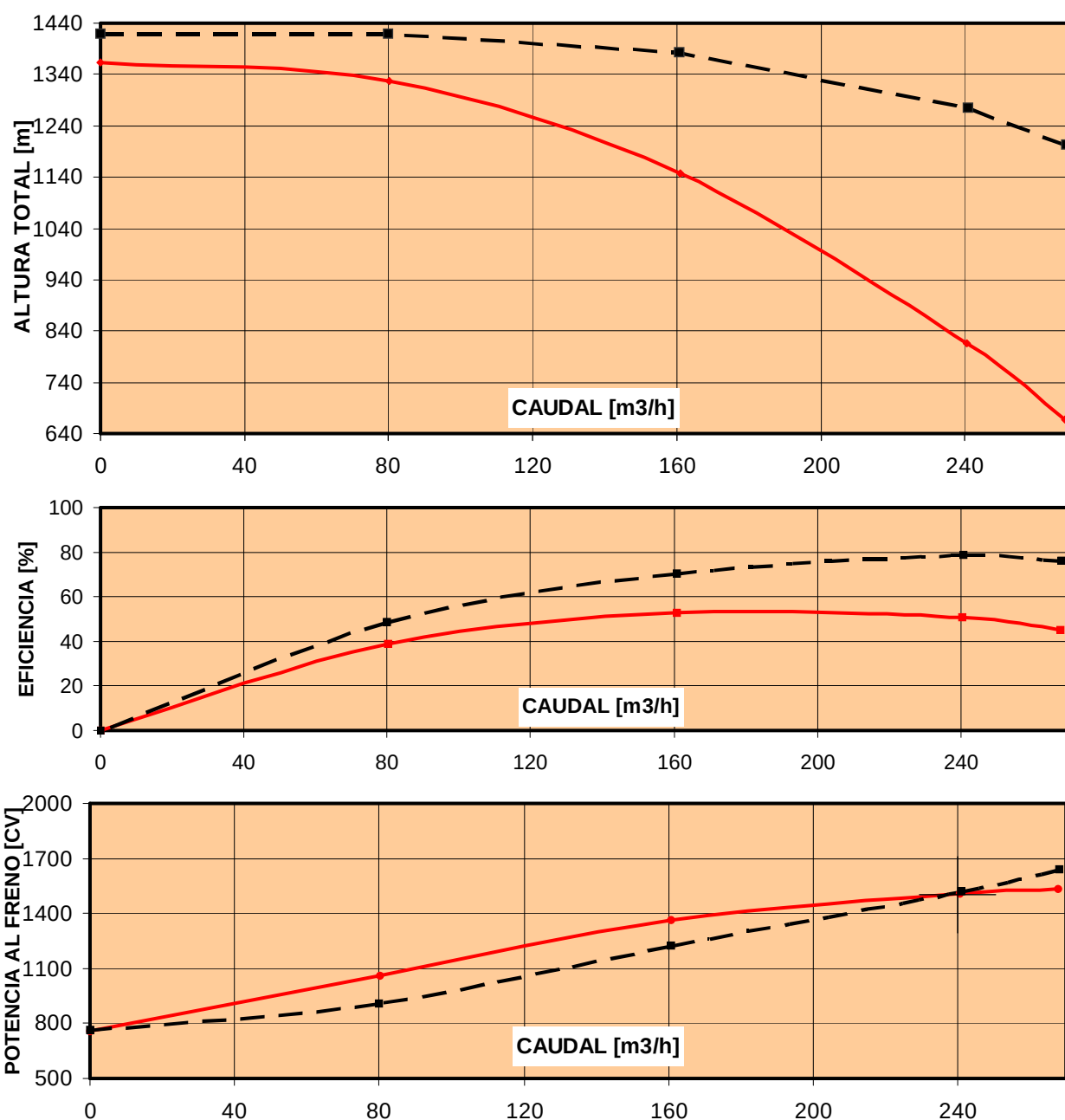


GRÁFICO 3

3.7.2. DESARME DE LA BOMBA

Una vez retirados los espárragos de fijación fue extraída la tapa superior de la bomba multietapa sin mayores inconvenientes, iniciándose el proceso de Inspección de los internos.

La bomba presentaba un estado general de ensuciamiento.

Los depósitos estaban en todos los impulsores, tanto en sus partes activas como pasivas, en todas las volutas, en la pieza de balanceo, en la tapa superior, etc.

El color externo de las deposiciones era amarillento – rojizo en su exterior y negro en su interior, se tomaron muestras que luego serían enviadas a analizar a laboratorio.

El mayor espesor del ensuciamiento se apreciaba en la zona de la voluta de primera etapa donde el espesor del depósito era de unos 10 a 12 mm. En la zona de alta presión los depósitos eran de menor espesor 2 a 3 mm aprox.

El espesor de los depósitos en los impulsores era de aprox. 1 a 2 mm.

Los depósitos eran de fácil extracción en todas las superficies expuestas.

Luego de efectuada la limpieza general del elemento rotórico y tapas, se pudo verificar que el grado de desgaste de la bomba, mediante el control dimensional de la misma, tenía un grado de desgaste mínimo asociado al tiempo de funcionamiento de la misma.

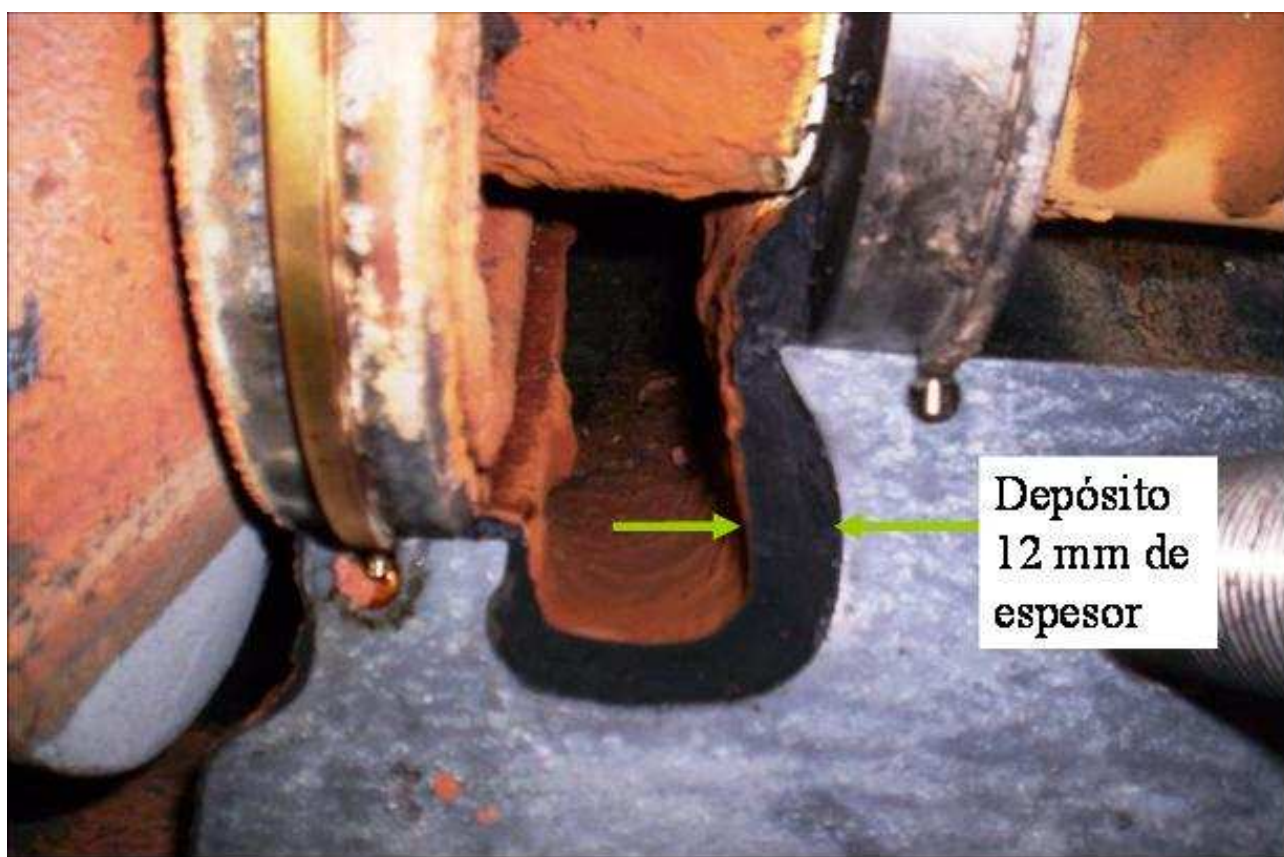


FOTO 1: Voluta de la primera etapa



FOTO 2: Conjunto rotórico



FOTO 3: Pieza de balanceo

3.7.3. ENSAYOS DE LABORATORIO.

Los análisis de laboratorio realizados sobre las muestras extraídas de las deposiciones de la bomba determinaron que se trataba principalmente de sulfuros de hierro.

Materia Orgánica	0.0%
Solubles en Solventes	1.8%
Parafinas: 0.0 %	
Asfaltenos : 0.0 %	
Hidrocarburos :	1.8%
Solubles en Agua	0.0%
Solubles en Clorhídrico	97.4%
Carbonato de Calcio - mg/gr	0.0
Carbonato de Magnesio - mg/gr	0.0
Otros Carbonatos- mg/gr (Hierro)	0.0
Sulfatos - mg/gr	no detectado
Hierro - mg/gr	682.3
Cobre - mg/gr	0.0
Manganeso - mg/gr	0.0
Sulfuros - mg/gr	290.0
Sílice - silicatos-mg/gr	7.6

TABLA 3: Composición de los Depósitos Encontrados.

4. CONCLUSIONES

La disminución prematura de la performance de las bombas centrífugas multietapas se debió a un problema de ensuciamiento progresivo.

Debido a la calidad del fluido, se originaba una deposición en las paredes activas y pasivas de la bomba impidiendo el paso del caudal de diseño.

El uso de la simulación hidráulica, las mediciones y ensayos realizados, permitieron identificar los equipos mas afectados, estimar las curvas reales de funcionamiento de las bombas y descartar otras posibles hipótesis que podían afectar el funcionamiento de la planta.

Esta metodología combinada resultó de bajo costo comparado con los resultados obtenidos, siendo una herramienta de decisión para determinar la intervención de una bomba que se encuentra fuera de su curva de funcionamiento.

Además, una vez desarrollada permite predecir con buena precisión el comportamiento del sistema frente a diferentes condiciones operativas, cambio de presión de inyección, cambio de equipos, pudiendo ser utilizado para la optimización del mismo.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Manual del fabricante de las bombas: Flowserve
- Bombas Selección Uso y Mantenimiento: Kennet McNaughton
- Pump Handbook: Igor J Karassik.