

**DIAGNÓSTICO DE DESEMPEÑO, DETECCIÓN DE OPORTUNIDADES
DE AHORRO DE ENERGÍA Y ANÁLISIS DE COSTO DE CICLO DE
VIDA PARA EL SISTEMA DE BOMBEO LA CUMBRE, PERTENECIENTE
AL ACUEDUCTO METROPOLITANO DE BUCARAMANGA S.A. E.S.P.**

GILBERTO ALEJANDRO CHACÍN SILVA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO - MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2008

**DIAGNÓSTICO DE DESEMPEÑO, DETECCIÓN DE OPORTUNIDADES
DE AHORRO DE ENERGÍA Y ANÁLISIS DE COSTO DE CICLO DE
VIDA PARA EL SISTEMA DE BOMBEO LA CUMBRE, PERTENECIENTE
AL ACUEDUCTO METROPOLITANO DE BUCARAMANGA S.A. E.S.P.**

GILBERTO ALEJANDRO CHACÍN SILVA

**Trabajo de Grado para optar al título de
Ingeniero Mecánico**

Director

NESTOR RAÚL D´CROZ TORRES

Ingeniero Mecánico

Codirector

JOLMAN LOZANO PICO

Ingeniero Mecánico

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO - MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2008

DEDICATORIA

*A la princesa de las catorce
estrellas.*

*De no haber sido por ella, jamás
hubiera tenido la oportunidad de
realizar este trabajo.*

Gilberto

AGRADECIMIENTOS

Mis más profundos agradecimientos van dirigidos al Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A. E.S.P, a toda esa gran familia de la que pude hacer parte. Les agradezco permitirme dedicar mi trabajo y esfuerzo en una vocación que ha sido producto de varios años de investigación. Sólo espero que mi trabajo no les defraude, que haya podido colocar por lo menos un diminuto grano de arena en su empresa de mantenerse entre las instituciones bandera de la región que me ofreció su educación.

Agradezco al ingeniero Jolman Lozano Pico, codirector de proyecto, por su confianza y buena disposición siempre. Agradezco la suerte de haberme topado con un gran ingeniero.

Agradezco al ingeniero Néstor Raúl D´croz, director de proyecto, por su consejo, y por enseñarme a ver la necesidad que tiene este país de aprovechar adecuadamente el recurso natural más valioso y la energía, por mostrarme el compromiso que tiene el ingeniero mecánico en esta tarea.

A mis padres y familia, por su constante apoyo, por su paciencia, para ellos mis agradecimientos no terminan aquí, ellos estarán conmigo siempre en cada proyecto que realice.

A mis amigos, gracias.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
1. EVALUACIÓN DE DESEMPEÑO	5
1.1 EFICIENCIA ELECTROMECAÁNICA	5
1.1.1 Determinación de la eficiencia electromecánica.	9
1.1.2 Análisis resultados evaluación eficiencia electromecánica.	13
1.2 CURVAS DE DESEMPEÑO	17
1.2.1 Generalidades.	17
1.2.2 Relación entre las curvas de desempeño y las tareas de diagnóstico.	19
1.2.3 Desarrollo experimental de las curvas de desempeño.	21
1.2.4 Análisis de resultados obtenidos por el trazo de las curvas de desempeño.	36
1.3 ÍNDICE ENERGÉTICO O ENERGÍA ESPECÍFICA	40
1.3.1 Resultado desarrollo energía específica.	41
1.3.2 Análisis de resultados energía específica, estimación de costos.	42
2. DIAGNÓSTICO CBM	44
2.1 INTRODUCCIÓN	44

2.2 DIAGNÓSTICO TÉCNICA ULTRASONIDO	46
2.2.1 Objetivo del monitoreo con técnica ultrasonido	48
2.2.2 Procedimiento.	48
2.2.3 Método de inspección.	49
2.2.4 Resultado monitoreo con técnica ultrasonido.	50
2.3 DIAGNÓSTICO ANÁLISIS DE VIBRACIONES.	55
2.3.1 Objetivo monitoreo con análisis de vibraciones	56
2.3.2 Procedimiento	56
2.3.3 Especificaciones del equipo utilizado	58
2.3.4 Resultados monitoreo de vibraciones	59
2.4 CONCLUSIONES	66
3. EVALUACIÓN DE LAS POLÍTICAS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DEL SISTEMA DE BOMBEO LA CUMBRE	67
3.1 OPERACIÓN	67
3.1.1 Condiciones de succión	67
3.1.2 Configuración en paralelo y consumo de energía	69
3.2 MANTENIMIENTO	72
3.2.1 Costos actuales de mantenimiento	73
3.2.2 Reconstrucción	74
3.2.3 Monitoreo de desempeño	76
3.2.4 CBM, mantenimiento predictivo	77
4. ANÁLISIS DE COSTO DE CICLO DE VIDA	79

4.1 INTRODUCCIÓN	79
4.2 REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA DE BOMBEO LA CUMBRE	81
4.3 CONDICIONES	81
4.4 ALTERNATIVAS ESCOGIDAS PARA EL ANÁLISIS DE COSTO DE CICLO DE VIDA	82
4.4.1 Bomba 60 LPS + Bomba 85 LPS	81
4.4.2 Bomba 85 LPS + Variador de frecuencia	87
4.5 ANÁLISIS DE COSTO DE CICLO DE VIDA	89
4.5.1 Metodología de cálculo	91
4.5.2 Primer escenario	92
4.5.3 Segundo escenario	93
4.5.4 Tercer escenario	94
4.5.5 Conclusiones	100
5. OBSERVACIONES	101
CONCLUSIONES	104
BIBLIOGRAFÍA	108
ANEXOS	109

LISTA DE CUADRO

	Pág.
Cuadro 1. Resultados eficiencia electromecánica operación individual	12
Cuadro 2. Resultados eficiencia electromecánica operación en paralelo.	13
Cuadro 3. Información preliminar bomba 1	25
Cuadro 4. Datos obtenidos del proceso de medición bomba 1	25
Cuadro 5. Información preliminar bomba 2	26
Cuadro 6. Datos obtenidos del proceso de medición bomba 2	26
Cuadro 7. Información preliminar bomba 3	26
Cuadro 8. Datos obtenidos del proceso de medición bomba 3	27
Cuadro 9. Información preliminar bomba 4	27
Cuadro 10. Datos obtenidos proceso de medición bomba 4	27
Cuadro 11. Cuadro de resultados curvas de desempeño configuración bomba-motor 1	31
Cuadro 12. Cuadro de resultados curvas de desempeño configuración bomba-motor 2.	32
Cuadro 13. Cuadro de resultados curvas de desempeño configuración bomba-motor 3.	34
Cuadro 14. Cuadro de resultados curvas de desempeño configuración bomba-motor 4.	35

Cuadro 15. Grado de escurrimiento bombas 1&2	38
Cuadro 16. Resultados de energía específica sistema de bombeo LA CUMBRE	41
Cuadro 17. Expectativa ahorro de energía anual bombeo con una sola bomba	42
Cuadro 18. Presentación equipo utilizado	47
Cuadro 19. Ficha reporte monitoreo ultrasonidos	48
Cuadro 20. Resultados según el método de inspección análisis ultrasonido	50
Cuadro 21. Especificaciones equipo COMMTEST Vb3000	58
Cuadro 22. Ficha de reporte monitoreo vibraciones bomba 1	54
Cuadro 23. Ficha reporte monitoreo configuración bomba-motor 2.	61
Cuadro 24. Ficha reporte monitoreo configuración bomba-motor 3.	63
Cuadro 25. Ficha reporte monitoreo configuración bomba-motor 4	65
Cuadro 26. Velocidad máxima aceptable en la tubería de succión, según el diámetro	68
Cuadro 27. Lista costo de reconstrucción bombas Patterson	75
Cuadro 28. Costo inicial equipos propuesta uno	85
Cuadro 29. Resultados energía específica alternativa 1	86
Cuadro 30. Costos energía configuraciones alternativa 1	86
Cuadro 31. Costo inicial equipos propuesta 2	88

Cuadro 32. Resultados energía específica alternativa 2	88
Cuadro 33. Resultados costo de energía alternativa 2	89
Cuadro 34. Resultados primer escenario	92
Cuadro 35. Resultados propuestas alternativa 1	93
Cuadro 36. Resultados segundo escenario	94
Cuadro 37. Energía específica correspondiente al bombear a 60 y 85 litros por segundo	95
Cuadro 38. Resultados LCC, escenario tres.	99
Cuadro 39. Error de las simulaciones configuración bombeo con una sola bomba (bomba 1)	101
Cuadro 40. Error de las simulaciones configuración bombeo en paralelo (bombas 1 & 3).	101

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Esquema determinación cabeza total	7
Figura 2. Diagrama de flujo, cálculo de la eficiencia electromecánica.	11
Figura 3. Variación condiciones de operación de una bomba bajo operación en paralelo	16
Figura 4. Curva sencilla desempeño de una bomba centrífuga	18
Figura 5. Curvas de desempeño para una gama de distintos tamaños de impulsor	18
Figura 6. Curva de desempeño Bomba Sulzer HSB-1800	19
Figura 7. Desgaste de una bomba centrífuga representado en su desempeño	20
Figura 8. Cambio de la curva del sistema al manipular la válvula de descarga	21
Figura 9. Presentación PSIM software	30
Figura 10. PSIM brochure, presentación de sus bondades	30
Figura 11. Curvas de desempeño grupo bomba-motor 1	31
Figura 12. Curvas de desempeño grupo bomba-motor 2	33
Figura 13. Curvas de desempeño grupo bomba-motor 3	34
Figura 14. Curvas de desempeño grupo bomba-motor 4	35
Figura 15. Comparación curvas de desempeño bombas 1 & 2	36

Figura 16. Comparación curvas de desempeño bombas 3 & 4	39
Figura 17. Análisis ultrasonido estación de bombeo LA CUMBRE.	46
Figura 18. Esquema arreglo válvulas estación de bombeo LA CUMBRE	47
Figura 19. Puntos de medición análisis ultrasonido	49
Figura 20. Presentación espectro cheque bomba 1	50
Figura 21. Presentación espectro cheque bomba 2	53
Figura 22. Presentación espectro cheque bomba 3	53
Figura 23. Presentación espectro bomba 4	54
Figura 24. Monitoreo del panel y sistema de control con ultrasonidos	55
Figura 25. Monitoreo Vibraciones estación de bombeo LA CUMBRE	56
Figura 26. Esquema puntos de medición de vibraciones	57
Figura 27. Espectro capturado, motor configuración bomba 1	60
Figura 28. Espectro capturado, bomba, configuración bomba 1	61
Figura 29. Espectro capturado, motor, configuración bomba 2	62
Figura 30. Espectro capturado, bomba, configuración bomba 3	64
Figura 31. Espectro capturado, bomba, configuración bomba 4	65
Figura 32. Promedio caudal bombeado diciembre 06-abril 07	69
Figura 33. Consumo horario energía activa abril 2007	70
Figura 34. Liquidación tarifas abril 2007	71

Figura 35. Evolución de la eficiencia con respecto al mantenimiento y vida útil de las bombas	72
Figura 36. Hoja de datos bomba 60 LPS	83
Figura 37. Hoja de datos bomba 85 LPS	84
Figura 38. Curvas de energía específica para las alternativas propuestas	96
Figura 39. Curva de desempeño bomba 46 LPS	98

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Fundamentos Teóricos	110
Anexo B. Introducción al Sistema de Bombeo la Cumbre	118

RESUMEN

TÍTULO:

DIAGNÓSTICO DE DESEMPEÑO, DETECCIÓN DE OPORTUNIDADES DE AHORRO DE ENERGÍA Y ANÁLISIS DE COSTO DE CICLO DE VIDA PARA EL SISTEMA DE BOMBEO LA CUMBRE, PERTENECIENTE AL ACUEDUCTO METROPOLITANO DE BUCARAMANGA S.A. E.S.P.*

AUTORES:

GILBERTO ALEJANDRO CHACÍN SILVA**

PALABRAS CLAVES:

Sistemas de bombeo, Energía, Acueducto, Diagnóstico, Análisis de costo de ciclo de vida, Eficiencia.

DESCRIPCIÓN:

El objetivo de este trabajo consiste en presentar al Acueducto Metropolitano de Bucaramanga el diagnóstico de desempeño y condición actual del sistema de bombeo LA CUMBRE, y de acuerdo con los resultados de esta evaluación sugerir una propuesta de mejora sustentadas en el ahorro de energía y en la óptima relación de costo beneficio.

El diagnóstico de desempeño fue ejecutado mediante el desarrollo de indicadores claves como la eficiencia electromecánica y la energía específica, también mediante el recurso del desarrollo experimental de las curvas de desempeño hidráulico de cada equipo de bombeo. Los resultados muestran que el desempeño del sistema es bajo, y que la expectativa de ahorro de energía es cercana al 35%, indicando que la mayor oportunidad de ahorro de energía radica en el reemplazo de los equipos en operación por otros de mayor eficiencia.

El diagnóstico de condición fue desarrollado con ayuda de técnicas utilizadas generalmente en aplicaciones de mantenimiento predictivo, el análisis de vibraciones y ultrasonidos. Los resultados reflejan cierto deterioro en las válvulas de la estación de bombeo, junto con problemas de alineación y balanceo, desgaste, recirculación y leves problemas eléctricos para los equipos de bombeo.

Se evaluaron las políticas de operación y mantenimiento, donde las recomendaciones más significativas expresan la necesidad de que exista información procesada relacionada con el caudal consumido por el sistema de bombeo, y de que sea evaluado con carácter periódico o permanente el desempeño de los equipos para ejecutar las reparaciones de manera oportuna.

El análisis económico se fundamentó en los costos de energía estimados para cada alternativa en concurso, cuyo marco se estructuró en tres escenarios cada uno determinados según las posibilidades de requerimiento exigidas por la empresa propietaria del sistema de bombeo en cuestión.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica, Ing. Néstor Raul D' Croz Torres

SUMMARY

TITLE:

PERFORMANCE DIAGNOSIS, DETECTION OF OPPORTUNITIES OF ENERGY SAVING AND LIFE CYCLE COST ANALYSIS FOR THE "LA CUMBRE" PUMPING SYSTEM, BELONGING TO THE BUCARAMANGA'S METROPOLITAN AQUEDUCT S.A. E.S.P.*

AUTHORS:

GILBERTO ALEJANDRO CHACÍN SILVA**

KEY WORDS:

Pumping system, energy, aqueduct, diagnosis, Life cycle cost analysis, efficiency.

DESCRIPTION:

The objective of this work consists on presenting to Bucaramanga's Metropolitan Aqueduct the performance diagnosis and current condition of LA CUMBRE pumping system, and according on the results of this evaluation suggesting an offer of improvement sustained in the cost - benefit.

The performance diagnosis was executed by the development of key indicators like the electromechanical efficiency and the specific energy, also by the resource of the experimental development of the hydraulic performance curves of each pumping equipment. The results show that the system performance is low, and that the expectation of energy saving is near to 35 %, indicating in that the major opportunity of energy saving takes root in the replacement of the equipments in operation for others of bigger efficiency.

The condition diagnosis was developed by help of technologies used generally in applications of predictive maintenance, the analysis of vibrations and ultrasounds. The results reflect certain deterioration in the pumping station's valves, together with problems of alignment and balancing, wear, recirculation and slight electrical problems for the pumping equipments.

There were evaluated operation and maintenance policies, where the most significant recommendations express the need of that should exists processed information related to the flow consumed by the pumping system, and the evaluation of the equipment performance periodically or permanent to execute the repairs in an oportune way.

The economic analysis was based on the costs of energy estimated for every alternative on contest, which frame was constructed in three stages each one determined according to the possibilities of requirement demanded by the own company of the pumping system in question.

* Degree work.

** Physical-Mechanical Engineering Faculty, Mechanical Engineering School, Eng. Nestor D'croz

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de bombeo consumen alrededor del 20% de la energía eléctrica demandada por el planeta y el 25% de la energía consumida en la industria. Esta es una cantidad importante de energía, que en suma a la escasez de los combustibles fósiles y la profunda necesidad y conciencia de conservar el medio ambiente, hacen que en la actualidad se haga obligatorio utilizar responsablemente los recursos naturales cuando se trata de transportar fluidos.

En los días de hoy se es cuidadoso a la hora de diseñar un sistema de bombeo, pero las buenas prácticas no eran aplicadas adecuadamente años atrás. Si consideramos el hecho de que el número de sistemas de bombeo en operación es 20 veces mayor que la cantidad de sistemas de bombeo que se construyen cada año, y que estudios presentados por el Instituto Hidráulico muestran que se puede ahorrar desde 30 hasta un 50% de la energía consumida por los sistemas de bombeo existentes a través de cambio de equipos por otros más eficientes o a través de algunas modificaciones en los sistemas de control, pueden visualizarse grandes oportunidades de ahorro de energía en sistemas de bombeo donde aparentemente todo se encuentra bien.

Y este es el caso de la estación de bombeo LA CUMBRE, un sistema altamente tecnificado, equipado con tecnología de vanguardia y control por SCADA (supervisory control and data acquisition), donde a pesar de todo, se continuaba consumiendo una importante cantidad de energía eléctrica requerida para la operación de bombeo de agua potable.

La sospecha de que la estación no funcionaba de manera eficiente fue el primer paso en el desarrollo de este trabajo, tras haber realizado mediciones informales de eficiencia electromecánica en uno de los equipos en operación, y descubrirse que la eficiencia total del sistema se hallaba deteriorada, se alcanzaron los argumentos suficientes para iniciar una tarea que no sólo presentaría el nivel de desempeño y condición del sistema de bombeo de manera formal, también indicaría cual sería la elección mas beneficiosa para la empresa propietaria del sistema de bombeo en estudio. ¿Invertir o no hacerlo? ¿Y de que forma? Son un par de cuestiones a las que este trabajo pretende ofrecer solución para el acueducto metropolitano de Bucaramanga, empresa prestadora del servicio de suministro de agua potable, propietaria de la estación de bombeo en cuestión.

El texto presente contiene las memorias del trabajo realizado para el acueducto metropolitano de Bucaramanga, su estructura básica se compone de cuatro capítulos:

El primer capítulo expone los resultados obtenidos a raíz del desarrollo del diagnóstico de desempeño del sistema de bombeo LA CUMBRE, los resultados de juicio se muestran en función de indicadores como la eficiencia electromecánica y la energía específica, además, el trazo experimental de las curvas de desempeño de cada bomba permitirán conocer la evolución de estos equipos a lo largo de su vida de servicio. Como consecuencia de estos resultados podrá presentarse una expectativa de ahorro de energía, y además, el desarrollo de una estimación de costos de energía consumida por el sistema de bombeo.

El segundo capítulo recopila la información referida al diagnóstico de condición realizado (CBM). Utilizando las técnicas de monitoreo de vibraciones y ultrasonido sobre los equipos de la estación de bombeo se adquiere conocimiento complementario útil para detectar ciertas anomalías que un diagnóstico de desempeño no puede reconocer ni especificar con claridad, como problemas de alineación, desbalanceo y patrones hidráulicos inaceptables.

La evaluación de las políticas de operación y mantenimiento se exponen en el capítulo tres. En esta fracción del texto se menciona cual es la metodología de operación del sistema de bombeo LA CUMBRE, junto con las recomendaciones trazadas con el fin de hacer más eficiente la operación y afín con los requerimientos de consumo del usuario. Con respecto al mantenimiento, se propone la política de seguimiento del desempeño del sistema de bombeo, partiendo del indicio de que el degeneramiento de la bomba se refleja en su desempeño, también se discute la posibilidad de realizar una reconstrucción sobre los equipos de la estación de bombeo.

El último capítulo expone un sencillo análisis económico donde se confrontan cada alternativa seleccionada con el estado actual de operación del sistema de bombeo estudiado. En este estudio, no sólo se contempla el costo inicial de los equipos, también se tienen en cuenta los costos de energía asumidos durante toda la vida útil del proyecto. Bajo este capítulo se resuelven inquietudes como si es rentable o no lo es reemplazar equipos, si es preferible el uso de un variador de frecuencia frente al uso de múltiples bombas, bajo qué condiciones es rentable la inversión de un motor de alta eficiencia frente a otro similar de eficiencia estándar, entre otros aspectos.

Adjunto en este trabajo dos anexos, el Anexo A, presenta una fundamentación teórica sobre los sistemas de bombeo, si el lector no está familiarizado con algunos conceptos básicos de la ingeniería de bombeo; el Anexo B es una introducción al sistema de bombeo LA CUMBRE, donde se hará una breve descripción, se presentarán los equipos, su estructura, metodología de operación, etc.

El texto está escrito de tal forma que a cada tema del informe citado, le presida una introducción conceptual con respecto al tema referido. Se escogió esta metodología por dos motivos, permitir al lector una lectura fluida del texto, sin molestas interrupciones y saltos de páginas cuando el lector requiera fundamentarse, y también para permitir que el know-how de este trabajo se transfiera con facilidad y profundidad hacia quienes requieran implementar una estrategia similar de diagnóstico y estudio en un sistema de bombeo.

1. EVALUACIÓN DE DESEMPEÑO

Evaluación de desempeño del sistema de bombeo LA CUMBRE con base en indicadores como la Eficiencia Electromecánica e Índice Energético, y otros recursos como las curvas de desempeño desarrolladas experimentalmente para las configuraciones bomba-motor en estudio.

1.1 EFICIENCIA ELECTROMECAÁNICA

La eficiencia electromecánica es el indicador clave de la evaluación de desempeño de un sistema de bombeo, me permite conocer de manera general, sencilla y contundente si la configuración bomba-motor funciona adecuadamente o no para un sistema de bombeo específico. Es un indicador fácil de medir, en comparación con la determinación de la eficiencia de una bomba (aislada del motor) en un punto de operación determinado. Los resultados que arroja la eficiencia electromecánica son la introducción a las tareas de diagnóstico, determinaran cuán necesario es desarrollar un estudio más profundo del desempeño del sistema de bombeo en cuestión.

Este indicador corresponde a la siguiente relación:

$$\eta_{em} = \frac{P_{hidraulica}}{P_{electrica}} \times 100 \quad (\text{ecuación 1.1})$$

Donde:

η_{em} : eficiencia electromecánica de la configuración bomba-motor.

P_{hid} : Potencia hidráulica demandada por el sistema de bombeo.

P_{elc} : Potencia eléctrica consumida por el motor.

La potencia hidráulica es la energía por unidad de tiempo efectiva recibida por el sistema a través de la bomba. La potencia eléctrica es la energía por unidad de tiempo que demanda el motor para cumplir con un requerimiento de servicio específico del sistema de bombeo en estudio.

La ecuación para potencia hidráulica sigue a continuación:

$$P_{hid} = \frac{Q \times H}{76} \text{ (ecuación 1.2) asumiendo gravedad específica del agua igual a 1}$$

bajo condiciones de estudio.

Donde:

P_{hid} : Potencia hidráulica, en HP.

Q: Gasto o caudal bombeado, en litros por segundo.

H: Carga total de bombeo, en metros.

La carga total, H, de una bomba centrífuga es la energía suministrada al líquido por la bomba, es la diferencia entre la carga de descarga y la carga de succión.

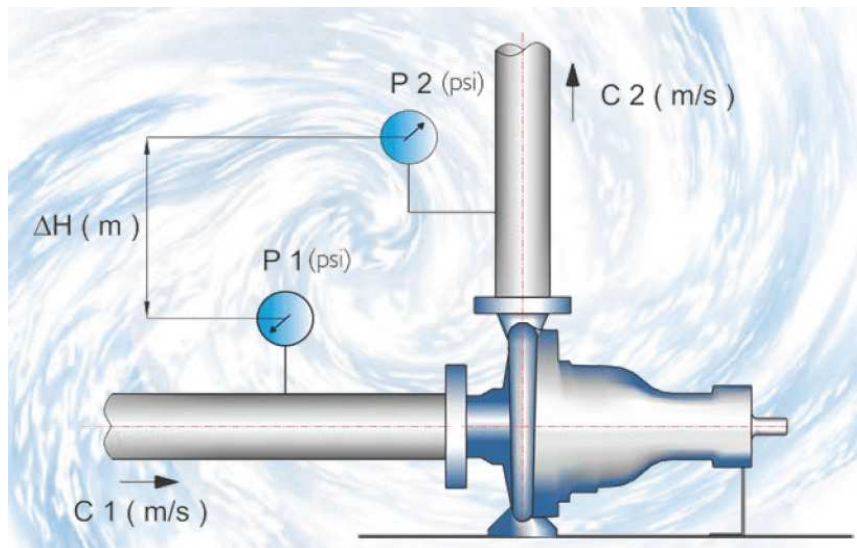
Entonces:

$H = \text{Carga de descarga} - \text{Carga de succión}$.

Según medidas en manómetros colocados en las aberturas de succión y descarga de la bomba, se especifica cada carga:

- Carga de descarga: La suma de la lectura del manómetro de descarga corregida a la línea de centro de la bomba y la elevación correspondiente a la velocidad en el punto de colocación del manómetro de descarga.
- Carga de succión: La suma de la lectura del manómetro de succión corregida a la línea de centro de la bomba y la elevación correspondiente a la velocidad en el punto de colocación del manómetro de succión.

Figura 1. Esquema determinación cabeza total.



Fuente: Apuntes curso bombas centrífugas por Ing. Francisco Guerrero

Apoyados en la figura presentamos la ecuación de cabeza total como:

$$\text{Carga total}_{(\text{metros})} = \Delta H + \left(703 \times \frac{P2 - P1}{\rho g} \right) + \frac{C2^2 - C1^2}{2g} \quad (\text{ecuación 1.3})$$

Donde:

ΔH : Distancia entre manómetros, en metros.

P: Presión indicada en el manómetro, en PSI.

g: Aceleración gravitacional, en m/s².

ρ : Densidad, en kg/m³.

C: Velocidad de flujo, en m/s.

Debe tenerse en cuenta para la ecuación 1.3, los valores de densidad (ρ) y de aceleración gravitatoria (g), que para nuestro estudio fueron asumidos como ρ : 1000kg/m³, y g: 9.81m/s².

La potencia eléctrica consumida por el motor relaciona los parámetros eléctricos de la siguiente forma:

$$\text{Potencia eléctrica}_{(HP)} = \frac{I \times V \times \sqrt{3} \times FP}{746} \text{ (ecuación 1.4)}$$

Donde:

I: Corriente eléctrica medida en amperios.

V: Voltaje entre fases en voltios.

FP: Factor de Potencia, o, $\cos\phi$.

Como puede notarse, la eficiencia electromecánica (ecuación 1.1) es el resultado de la relación entre la potencia hidráulica demandada por el sistema (ecuación 1.2) y la potencia eléctrica consumida (ecuación 1.4).

1.1.1 Determinación de la eficiencia electromecánica.

Condiciones de la medición de la eficiencia electromecánica. Los valores de la eficiencia electromecánica fueron determinados para las 4 bombas del sistema en estudio en su punto de operación y bajo cada curva de desempeño de manera individual, también fue determinado dicho indicador para las configuraciones en paralelo en su punto de operación.

Metodología de medición de parámetros y cálculo de la eficiencia electromecánica. Para calcular la eficiencia electromecánica deben tomarse mediciones de parámetros hidráulicos y parámetros eléctricos.

Parámetros Hidráulicos:

- Presiones de succión y descarga (psi), parámetro medido.
- Caudal (litros/segundo), parámetro medido.
- Diámetros internos tuberías de succión y descarga (metros), parámetro consultado.
- Área sección transversal tuberías de succión y descarga (metros cuadrados), determinados por la siguiente relación:

$$\text{Área (metros cuadrados)} = \frac{\pi \times \phi_{\text{int}}^2}{4} \text{ (ecuación 1.5), donde } \phi_{\text{int.}} \text{ corresponde al}$$

diámetro interno de las tuberías de succión y descarga.

- Velocidad de flujo a la succión y a la descarga (metros/segundo), parámetro calculado haciendo uso de la siguiente expresión:

$$\text{Velocidad de flujo (metros/segundo)} = \frac{\text{Área}_{(\text{metros}^2)} \times 1000}{\text{Caudal}_{(\text{litros/segundo})}} \text{ (ecuación 1.6)}$$

Parámetros eléctricos.

- Corriente eléctrica (I), medida en amperios.
- Voltaje entre fases (V), medida en voltios.
- Factor de Potencia (FP), medido (adimensional).

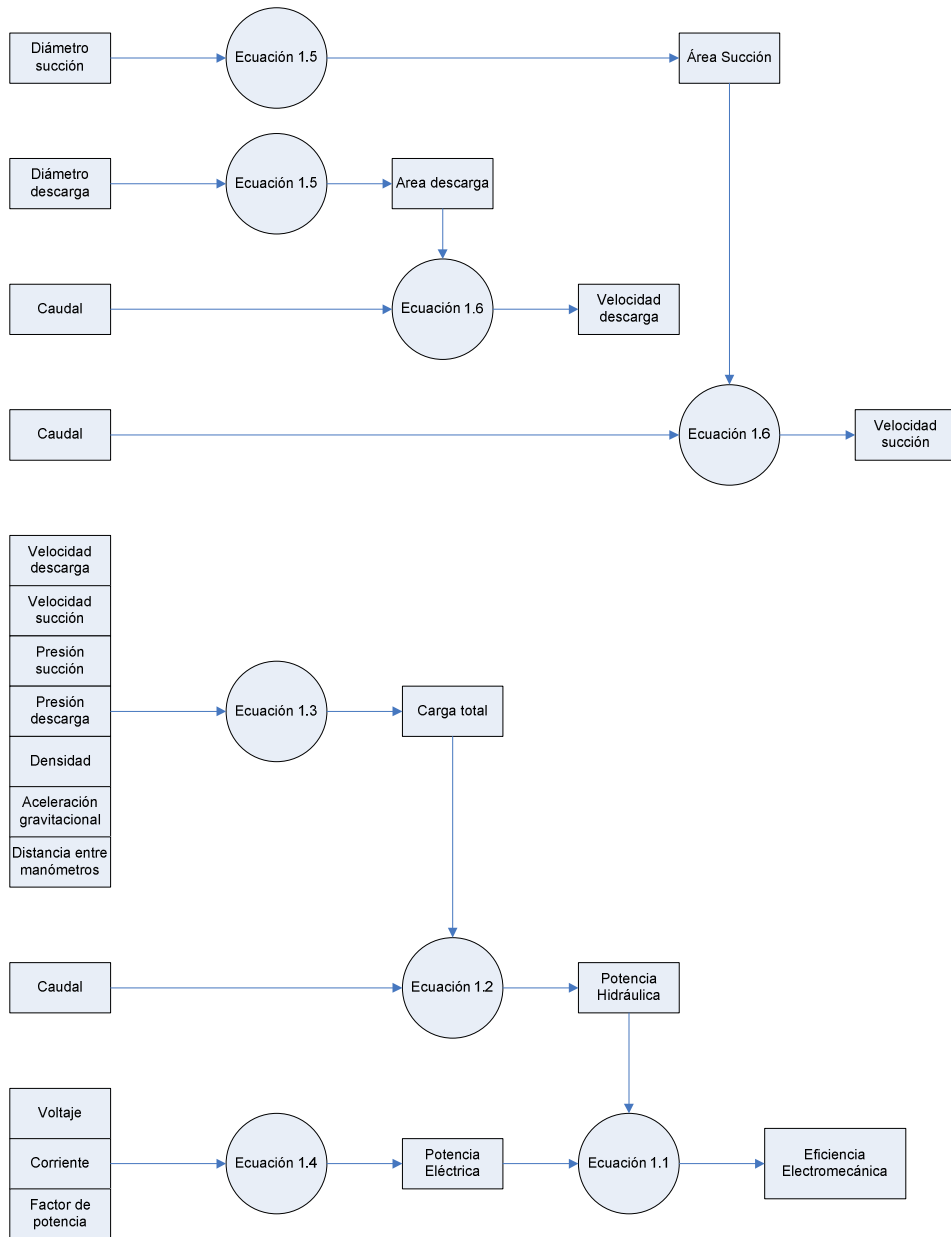
Teniendo todas estas variables determinadas, podemos hacer el cálculo de la eficiencia electromecánica de las configuraciones bomba motor en estudio haciendo uso de las ecuaciones presentadas anteriormente.

Toma de datos y desarrollo de cálculo de la eficiencia electromecánica. El Acueducto Metropolitano de Bucaramanga cuenta con los equipos requeridos para cumplir con lo solicitado. Para la medición de los parámetros hidráulicos se tienen instalados manómetros tanto a la succión como a la descarga de cada bomba, con el fin de medir presiones, para medir caudal, el sistema de bombeo de LA CUMBRE tiene instalada una configuración de sensores ultrasónicos aptos para este objeto.

Lo que respecta a parámetros eléctricos, las mediciones fueron efectuadas con dispositivos que miden la potencia eléctrica de manera directa, no fue necesario tomar los datos individuales de corriente, voltaje y factor de potencia de manera aislada para realizar el cálculo de la potencia eléctrica. Sin embargo, el dispositivo presenta en su display los valores de cada parámetro que conforma el cálculo de la potencia eléctrica (corriente, voltaje, factor de potencia), en casos que se requiera conocer el comportamiento individual de cada elemento. Las tuberías de succión y descarga cercanas a las bombas son de acero y tipo cédula 40. Los datos de entrada fueron

procesados por una hoja de cálculo, siguiendo el algoritmo antes desarrollado y presentado como diagrama de flujo en la siguiente figura.

Figura 2. Diagrama de flujo, cálculo de la eficiencia electromecánica.



A continuación se presentan los resultados obtenidos por los parámetros medidos y el procesamiento de la hoja de cálculo.

Evaluación de las configuraciones bomba-motor en operación individual.

Cuadro 1. Resultados eficiencia electromecánica operación individual

Bomba en estudio	1	2	3	4
Diámetro Tubería Succión (Pulg)	5,047	5,047	5,047	5,047
Diámetro Tubería Descarga (Pulg)	4,026	4,026	6,065	6,065
Distancia entre manómetros (metros)	0	0	0,85	0,59
Caudal Operación (LPS)	54	56	32	25
Carga Total (metros)	51	52	46	44
Potencia Eléctrica (kW)	56	60	39	34
Potencia Hidráulica (kW)	26,4	28	14,5	11
Eficiencia electromecánica (%)	47	47	37	32

Cuando existen configuraciones bomba motor disponibles en el mercado para esta aplicación similar capaces de operar con eficiencias del 75%, puede deducirse que existe una falla en el sistema de bombeo de LA CUMBRE. Estos valores de eficiencia electromecánica sugieren un estudio más profundo del sistema de bombeo en cuestión.

A continuación se presentan los resultados obtenidos de eficiencia, para las bombas bajo operación en paralelo.

Evaluación de las configuraciones bomba-motor bajo operación en paralelo (Ver cuadro siguiente)

Cuadro 2. Resultados eficiencia electromecánica operación en paralelo.

Bombas	Potencia E (kW)	Potencia H (kW)	Caudal (LPS)	Cabeza Promedio (m)	Eficiencia Electromecánica (%)
1 & 3	94	43	79,4	56,56	46
1 & 4	87,5	36,8	68,3	55	42,07
2 & 3	111,37	43,65	75,82	58,74	39,2
2 & 4	89,07	38,073	70	55,5	42,74

Como era de esperarse, el bombeo bajo operación en paralelo es menos eficiente comparándola con la eficiencia obtenida por las bombas 1 y 2, configuradas para operar de manera individual cuando la demanda es media.

1.1.2 Análisis resultados evaluación eficiencia electromecánica. El dictamen extraído de este pequeño y sencillo diagnóstico expresa que el sistema de bombeo LA CUMBRE presenta una **baja eficiencia de operación**. El juicio se sustenta en lo siguiente:

- En el mercado actual pueden conseguirse equipos que operen con eficiencias mucho mayores, por lo menos del 75%.
- El **Alto Costo de operar con estos equipos**. No se justifica, en función de costos, continuar operando con estos equipos bajo esas condiciones de servicio.

Para demostrar lo anterior, puede hacerse una sencilla estimación del potencial ahorro de energía y costo comparando las eficiencias del sistema actual contra una eficiencia óptima posible bajo las mismas condiciones de servicio.

El siguiente modelo fue desarrollado por el departamento de energía de los Estados Unidos (DOE) en un artículo denominado *Energy tips, pumping systems tip sheet # 4. Test for pumping system efficiency*¹.

$$\text{Ahorro de energía (kWh/año)} = kW_{\text{entrada}} \times t_{\text{horas/año}} \times \left(1 - \frac{\eta_{\text{actual}}}{\eta_{\text{optima}}} \right) \text{ (ecuación 1.7)}$$

Para nuestro caso particular, nuestro sistema de bombeo en estudio opera alrededor de 6000 horas al año y demanda un consumo aproximado de 60 kilowatts (configuración individual) con una eficiencia del 47%, se asume una eficiencia óptima del 75%.

$$\text{Ahorro de energía (kWh/año)} = 60 \times 6000 \times \left(1 - \frac{47}{75} \right) = \mathbf{134.400 \text{ kWh/año.}}$$

Asumiendo que se consumen alrededor de 360000 kWh/año (60 kW × 6000 horas/año) podría estimarse un ahorro de energía del **37%**, entonces el gran potencial de ahorro de energía se convierte en un argumento contundente de la baja eficiencia de operación del sistema de bombeo LA CUMBRE.

Teniendo en cuenta, que el costo del kilowatt-hora para la estación de bombeo LA CUMBRE tiene un valor aproximado de \$210, podemos determinar un ahorro potencial.

$$\text{Ahorro potencial/año} = \mathbf{\$28'224.000.}$$

¹ www.eere.energy.gov/industry/bestpractices

Esta suma no se hace despreciable cuando se considera que un equipo similar se adquiere por un costo inicial aproximado de 35 millones de pesos. Esto quiere decir que en poco más de un año, el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga podría recuperar la inversión realizada. Debe considerarse además, que con buenas políticas de mantenimiento, estos equipos podrían alcanzar una vida útil estimada de 20 años.

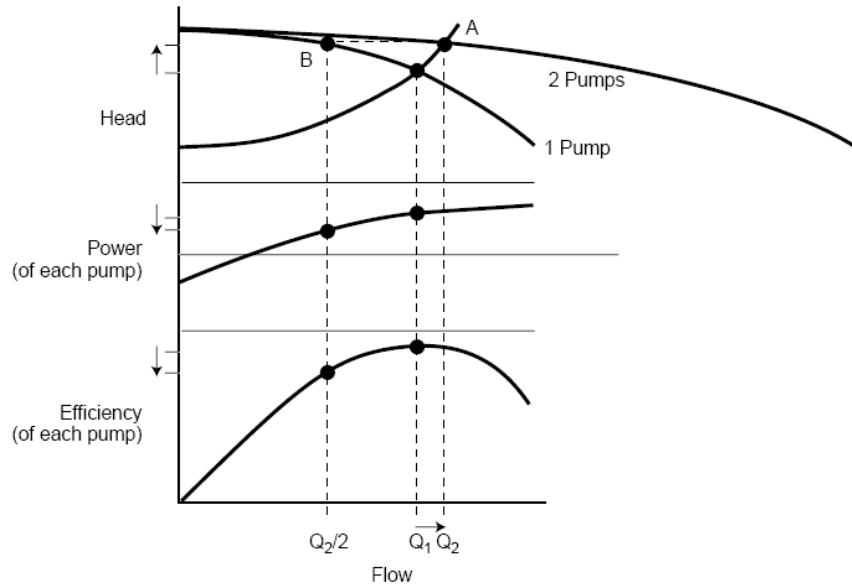
Aunque el modelo anteriormente presentado no es exacto, nos ofrece un horizonte y criterio referentes a las posibilidades de ahorro de energía que se encuentran latentes en un sistema de bombeo.

En este modelo no se consideró la operación en paralelo, lo cual hace la operación de bombeo un poco más costosa, porque cuando los requerimientos de caudal son mayores que el caudal bombeado por una sola bomba, se requiere del uso de una segunda bomba que funcionará como refuerzo de la bomba principal. Esto implica que haya un cambio en las condiciones de operación de cada bomba en servicio (carga, y por lo tanto caudal y demás parámetros), lo que conlleva a un distanciamiento del Punto de Máxima Eficiencia².

El siguiente recurso presenta de manera gráfica, cómo cambian las condiciones de servicio de una bomba cuando pasa a operar bajo un arreglo en paralelo con otra bomba.

² El punto de máxima eficiencia o *Best Efficiency Point* (BEP, como lo referencia gran parte de la literatura técnica) corresponde a las condiciones de servicio bajo las cuales una bomba centrífuga opera de la forma mas eficiente.

Figura 3. Variación condiciones de operación de una bomba bajo operación en paralelo.



Fuente: Energy Efficiency Enquiries Bureau (England)

En la gráfica mostrada anteriormente se observa, cómo cambian las condiciones de operación del sistema cuando el arreglo obedece a una configuración en paralelo. Debe considerarse el hecho de que el arreglo en paralelo presentado antes está constituido por dos bombas con idénticas características de desempeño, en el sistema de bombeo LA CUMBRE, las bombas que funcionan bajo este tipo de arreglo tienen características de desempeño distintas.

Puede concluirse con certeza que el sistema de bombeo LA CUMBRE opera con niveles bajos de eficiencia, y que es necesario realizar tareas complementarias de diagnóstico, con el fin de recopilar la mayor cantidad de información acerca este sistema para que los proyectos de optimización tengan mayor afinidad con la aplicación.

1.2 CURVAS DE DESEMPEÑO

1.2.1 Generalidades. El objeto de una curva de desempeño consiste en presentar de manera gráfica el rendimiento de una bomba centrífuga, haciendo más fácil la selección y conocimiento de las condiciones de operación de este tipo de equipos por parte del usuario.

El desempeño hidráulico de una bomba centrífuga se desarrolla en base a cuatro elementos fundamentales:

- 1) Capacidad o Caudal, expresada en volumen por unidad de tiempo.
- 2) La Carga Total, expresada en unidades de longitud del líquido que se bombea.
- 3) La velocidad a la cual funciona la bomba, en rpm.
- 4) El tamaño (diámetro) del impulsor de la bomba.

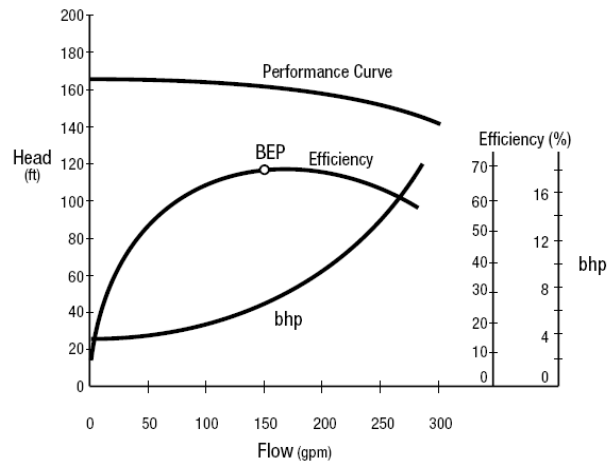
El desempeño o “comportamiento” de la bomba se presenta en forma de curvas (Fig. 4) dicha curva tiene como ejes la Carga (eje Y) y la Capacidad (eje X), y es trazada a una velocidad y tamaño del impulsor determinados. La curva también indica el caballaje al freno requerido (potencia requerida) para diversos flujos, la eficiencia correspondiente de la bomba, y otros parámetros adicionales como la NPSH³.

La figura 4 es de carácter didáctico, la mayoría de los fabricantes presentan en sus curvas el desempeño de una bomba bajo distintas velocidades o bajo distintos tamaños de impulsor, como lo muestra la figura 5, en varios casos

³ NPSH, *Net Pressure Suction Head* (carga neta positiva de succión), es la energía en unidades de longitud de carga de líquido que se necesita en la succión de la bomba por encima de la presión de vapor de líquido, a fin de que la bomba entregue una capacidad dada a una velocidad dada.

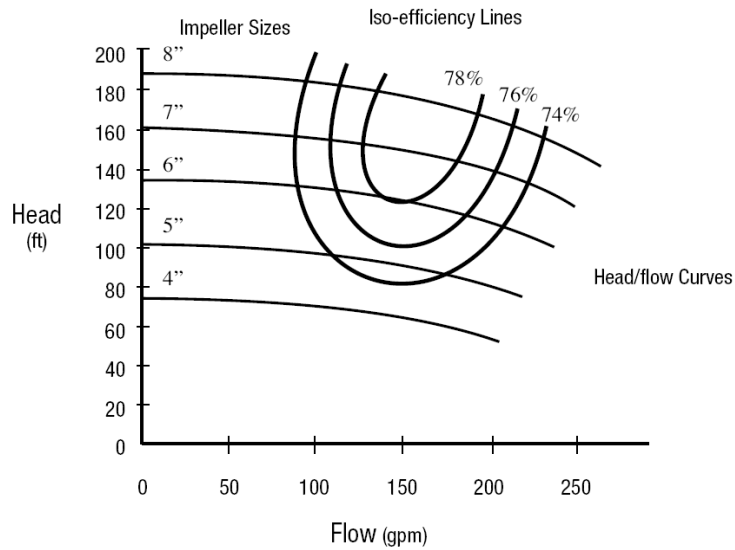
no se presenta la eficiencia de la bomba en función de una sola curva sino bajo un arreglo similar en forma a curvas de nivel, plasmadas sobre los trazos de Carga contra Capacidad.

Figura 4. Curva sencilla desempeño de una bomba centrífuga.



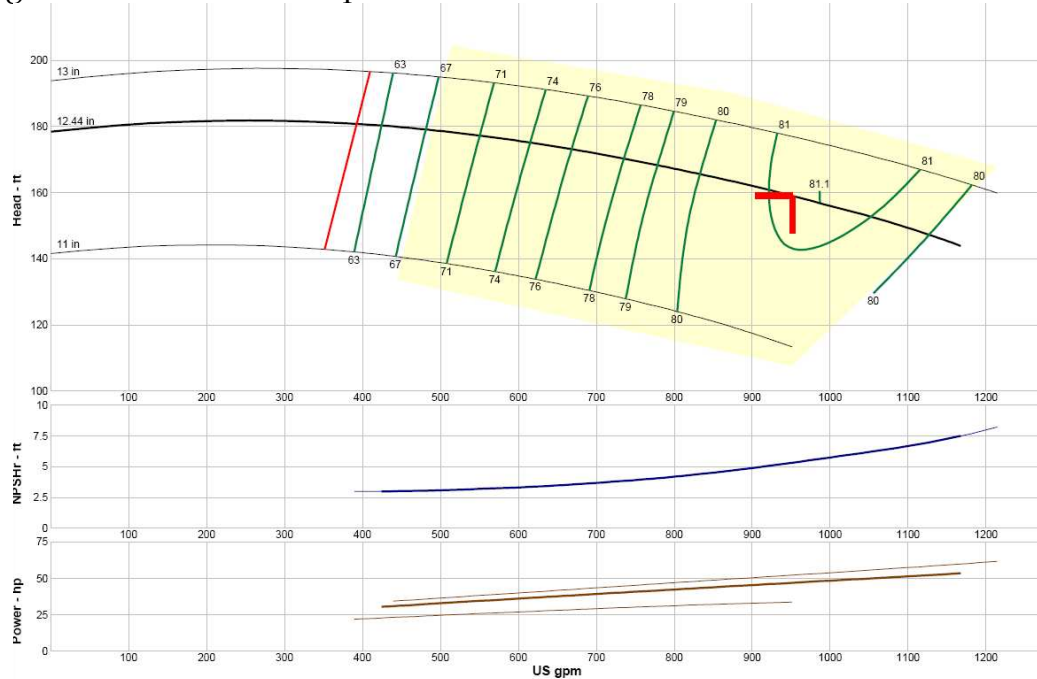
Fuente: U.S Department of Energy

Figura 5. Curvas de desempeño para una gama de distintos tamaños de impulsor.



Fuente: U.S Department of Energy.

Figura 6. Curva de desempeño Bomba Sulzer HSB-1800



Fuente: PUMP-FLO software.

La figura mostrada anteriormente (Fig. 6) corresponde a un formato de curva presentado por la empresa fabricante de bombas centrífugas SULZER, publicada en formato digital por el software PUMP-FLO.

1.2.2 Relación entre las curvas de desempeño y las tareas de diagnóstico.

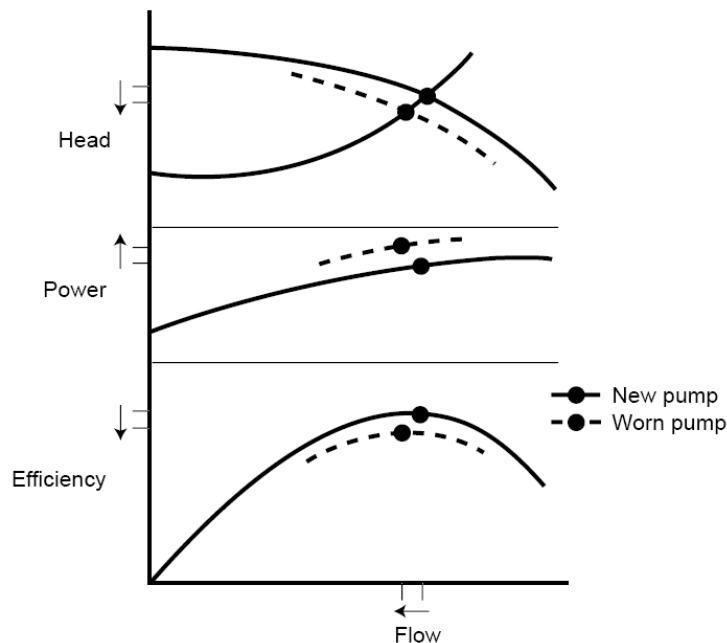
Debe recordarse, que las bombas en estudio llevan en operación un espacio de tiempo cercano a 15 años, durante el cual, la bomba ha estado sometida a desgaste y degeneración. Las curvas entregadas por el fabricante no podrían revelar el desempeño actual de estos equipos, por lo que se haría necesario desarrollar una nueva curva de rendimiento de manera experimental, no sólo con el objeto de conocer las condiciones actuales de desempeño de las bombas, también puede conocerse el grado de degeneración que ha tenido el equipo a lo largo de los años al contrastar la curva actualizada contra aquella

suministrada por el fabricante cuando el sistema de bombeo LA CUMBRE fue proyectado.

También entrega información selectiva de diagnóstico, en otras palabras, debido a que la eficiencia electromecánica es un indicador que no discrimina entre los rendimientos de la bomba y el motor de forma individual, se hace necesario realizar otro tipo de estudios con el fin de determinar en que medida cada equipo coadyuva con el deterioro de la eficiencia del sistema.

Cuando una bomba centrífuga presenta desgaste, se observa un “escurrimiento” en su curva de desempeño, que, como lo muestra la siguiente figura, se traduce en una disminución de su eficiencia y por lo tanto, un mayor consumo de energía.

Figura 7. Desgaste de una bomba centrífuga representado en su desempeño.



Fuente: Energy Efficiency Enquiries Bureau (England)

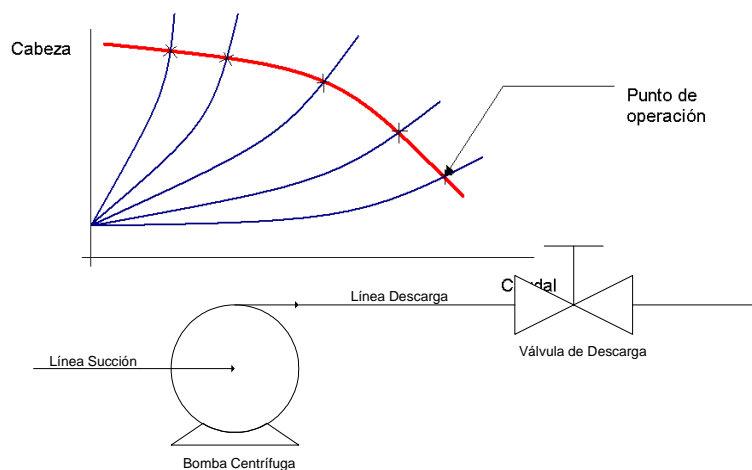
Las curvas punteadas corresponden con el desempeño de una bomba desgastada con respecto a su curva original (líneas continuas), como puede notarse, al presentarse desgaste en la bomba, ocurre una disminución de su cabeza disponible frente a un caudal requerido, asimismo como la eficiencia se ve afectada en su disminución, y por consiguiente, una demanda mayor de energía al requerir mas potencia por parte del motor.

El desarrollo experimental de una curva de desempeño es una herramienta de provecho, porque nos presenta el estado actual de la bomba sin tener que parar la estación de bombeo y abrir la bomba para inspeccionarla.

1.2.3 Desarrollo experimental curvas de desempeño. La curva característica de una bomba centrífuga puede determinarse de la siguiente forma:

Al variar las condiciones del sistema empleando la válvula de descarga, podemos conocer distintos puntos de operación sobre los cuales funciona la bomba en estudio, y haciendo una aproximación cuadrática, trazamos la curva de desempeño correspondiente.

Figura 8. Cambio de la curva del sistema al manipular la válvula de descarga



Obsérvese bien la figura anterior, la línea roja es la curva característica de la bomba, las líneas azules son las diferentes curvas que adopta el sistema de tuberías y accesorios, que varían según la posición de la válvula de descarga. Cuando la válvula está completamente abierta, la curva del sistema adquiere la posición mas cercana a una línea horizontal, a medida que estrangulamos el flujo cerrando la válvula, las condiciones de fricción del sistema crecen, haciendo que su curva se incline cada vez mas acercándose hacia el eje Y (Cabeza) hasta quedar completamente vertical cuando la válvula de descarga no permite el paso de flujo. Entonces, para cada grado de abertura de la válvula existe un punto de operación correspondiente, de acuerdo con esto, manipulando la válvula de descarga con el fin de cambiar las condiciones de servicio de la bomba, podemos obtener los suficientes puntos de operación para desarrollar su curva de desempeño.

Condiciones desarrollo curvas de desempeño. Las curvas de desempeño serán determinadas para cada configuración bomba-motor de manera individual, es decir, en el momento de la toma de datos, la bomba en estudio será la única en operación. Los parámetros definidos en la curva serán los siguientes:

- Caudal
- Cabeza o Carga
- Potencia eléctrica consumida
- Eficiencia electromecánica

Debe tenerse claridad, las curvas de desempeño desarrolladas obedecen a la configuración bomba-motor, por lo tanto los valores de potencia y eficiencia corresponden a parámetros globales, como la potencia eléctrica demandada

por el sistema, medida directamente con un vatímetro, y la eficiencia electromecánica, que es la relación entre la potencia eléctrica medida y la potencia hidráulica calculada.

La metodología de cálculo de cabeza o carga y potencia hidráulica es similar a la requerida para determinar la eficiencia electromecánica (inciso 1.1).

Metodología toma de datos.

Condiciones iniciales:

- Tanque EL CARMEN a la mayor altura posible, con el fin de asegurar buenas condiciones de succión en la bomba (mas de 2 metros).
- Mínimo tres personas en sitio, una que accione la válvula, tome datos de presión y sincronice el proceso de medición, otra que tome los datos de caudal y avise cuando estos se estabilicen, y otro que tome los datos eléctricos.
- El orden de ubicación de las bombas se hará de la siguiente manera: las bombas serán numeradas de 1 a 4, de izquierda a derecha, tomando como referencia al observador de frente hacia ellas.

Metodología proceso de medición:

1. Verificar las condiciones iniciales, nivel del tanque EL CARMEN, debe verificarse también que el flujo de agua a través de los prensaestopas sea el correcto (en operación normal, esto podría realizarse un día antes de la jornada).

2. Solicitar apagado de todos los equipos de bombeo. La bomba hasta ese entonces encendida será la última en ser evaluada.
3. Tomar medida del consumo de potencia con bombas apagadas, medir diámetros de succión, descarga y altura entre manómetros.
4. Cerrar todas las válvulas de descarga.
5. Solicitar encendido de la primera bomba.
6. Tomar valor presiones de succión y descarga a caudal cero en el menor tiempo posible.
7. Se abrirá la válvula de descarga la amplitud correspondiente a tres vueltas, se esperarán treinta segundos para conseguir estabilidad de flujo, y en cuanto esto sea verificado por el operador encargado, quien mide la presión y maniobra la válvula dará orden sincronizada para la toma y registro de datos. Si en un minuto el caudal no se estabiliza, debe abrirse la válvula una vuelta más. Realizar la rutina hasta conseguir que la válvula esté completamente abierta.
8. Realizar el mismo procedimiento para las bombas restantes.

Toma de datos:

Antes de iniciar el proceso de medición se observó un consumo de potencia con las instalaciones apagadas igual a 0.95 kW, ese es el consumo de energía básico de la estación de bombeo, por lo tanto, debe restarse esta cantidad a la potencia medida con el equipo en servicio para obtener la potencia eléctrica neta demandada.

El nivel del tanque EL CARMEN tenía un nivel correspondiente a tres metros, reuniéndose entonces todas las condiciones para realizar el procedimiento de medición.

Se contaba con un sensor de vacío para medir las presiones de succión, cuyas lecturas estaban en unidades de milímetros de mercurio, en los resultados entregados se hizo la conversión a psi.

También entre los datos se incluyó el factor de potencia, para conocer las condiciones en las que funciona el motor eléctrico bajo los distintos puntos de operación de la bomba.

Bomba 1.

Cuadro 3. Información preliminar bomba 1

Nivel del tanque (m)	Diámetro interno succión (pulg.)	Diámetro interno descarga (pulg.)	Altura entre manómetros (m)
3	5,047	4,026	0

Cuadro 4. Datos obtenidos del proceso de medición bomba 1

Caudal (LPS)	Presión Succión (PSI)	Presión Descarga (PSI)	Potencia eléctrica (kW)	Factor de potencia
0	2	121,5	33,34	0,875
38,5	-0,0386	95	52,56	0,912
51	-0,096	76,5	57,2	0,914
52,5	-0,154	72,8	57,6	0,915

Bomba 2.

Cuadro 5. Información preliminar bomba 2

Nivel del tanque (m)	Diámetro interno succión (pulg.)	Diámetro interno descarga (pulg.)	Altura entre manómetros (m)
3,1	5,047	4,026	0

Cuadro 6. Datos obtenidos del proceso de medición bomba 2

Caudal (LPS)	Presión Succión (PSI)	Presión Descarga (PSI)	Potencia eléctrica (kW)	Factor de potencia
0	2	127	31,85	0,895
10,3	2	120,5	37,15	0,905
28	0	108	48,05	0,914
40	-0,0386	92,5	53,75	0,914
46,5	-0,058	83,3	55,85	0,914
48,5	-0,072	79,1	56,6	0,914
49,5	-0,072	78,3	56,63	0,914

Bomba 3.

Cuadro 7. Información preliminar bomba 3

Nivel del tanque (m)	Diámetro interno succión (pulg.)	Diámetro interno descarga (pulg.)	Altura entre manómetros (m)
3,3	5,047	6,065	0,85

Cuadro 8. Datos obtenidos del proceso de medición bomba 3

Caudal (LPS)	Presión Succión (PSI)	Presión Descarga (PSI)	Potencia eléctrica (Kw)	Factor de potencia
0	2	118,5	21,3	0,905
28,6	2	79,5	39,45	0,925
30,5	2	67,5	40,665	0,925
31,6	2	66,2	39,95	0,921
32	2	65,7	40	0,922

Bomba 4.

Cuadro 9. Información preliminar bomba 4

Nivel del tanque (m)	Diámetro succión (pulg)	Diámetro descarga (pulg)	Altura entre manómetros (m)
3,3	5,047	6,065	0,59

Cuadro 10. Datos obtenidos proceso de medición bomba 4

Caudal (LPS)	Presión Succión (PSI)	Presión Descarga (PSI)	Potencia eléctrica (kW)	Factor de potencia
0	2	100	21,4	0,795
19	2	76,8	33	0,857
24,9	2	65,5	34,8	0,862
24,5	2	64,2	35,04	0,863
25	2	63,7	35,08	0,865

Procesamiento y resultados del proceso de medición. Para saber de que forma fueron procesados los datos de entrada se hace cita a la figura 2, que muestra a manera de diagrama de flujo, una metodología de cálculo para determinar todas las variables requeridas, no sólo para el cálculo de la eficiencia electromecánica de un punto de operación específico, también a través de esta figura puede conocerse el método y requerimientos para calcular los demás elementos que permiten el trazo de una curva de desempeño.

Se definen a continuación los parámetros de entrada, de proceso o intermedios y salida para el desarrollo de las curvas de desempeño.

Datos de entrada:

- Caudal (medido)
- Presión succión (medido)
- Presión descarga (medido)
- Diámetro tuberías de succión y descarga (medido)
- Distancia entre manómetros de succión y descarga (medido)
- Potencia eléctrica consumida por la estación con equipos de bombeo apagados (medido)
- Potencia eléctrica consumida por la estación con equipos de bombeo encendidos (medido)
- Velocidad de giro impulsor (medido)
- Diámetro del impulsor (consultado por catálogo)

Datos de proceso o intermedios:

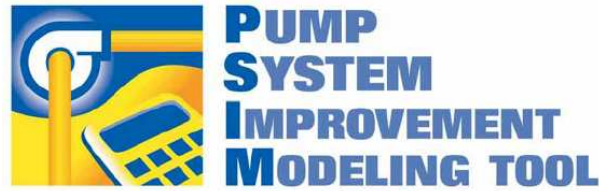
- Velocidades de flujo en las tuberías de succión y descarga (calculado, ecuación 1.6)
- Carga total (calculado, ecuación 1.3)
- Potencia hidráulica (calculado, ecuación 1.2)
- Potencia eléctrica neta consumida (calculado, es la resta entre la potencia eléctrica medida en la estación de bombeo con equipos apagados y la potencia eléctrica medida con los equipos (bomba y motor) en servicio)

Datos de salida:

- Carga total (calculado, ecuación 1.3)
- Potencia eléctrica neta consumida (calculado)
- Eficiencia electromecánica (calculado, ecuación 1.1)
- Caudal (medido)

Una vez recopilada y procesada la información necesaria para el desarrollo de las curvas de desempeño de cada configuración bomba motor, el trazo de las curvas será hecho con ayuda de un software llamado PSIM (pump system improvement modeling tool), es una herramienta de modelado de sistemas de bombeo, que entre sus bondades, nos permite conocer la curva de desempeño de una bomba al colocar los parámetros de entrada requeridos para cada punto de operación de la bomba conseguido en la jornada de medición.

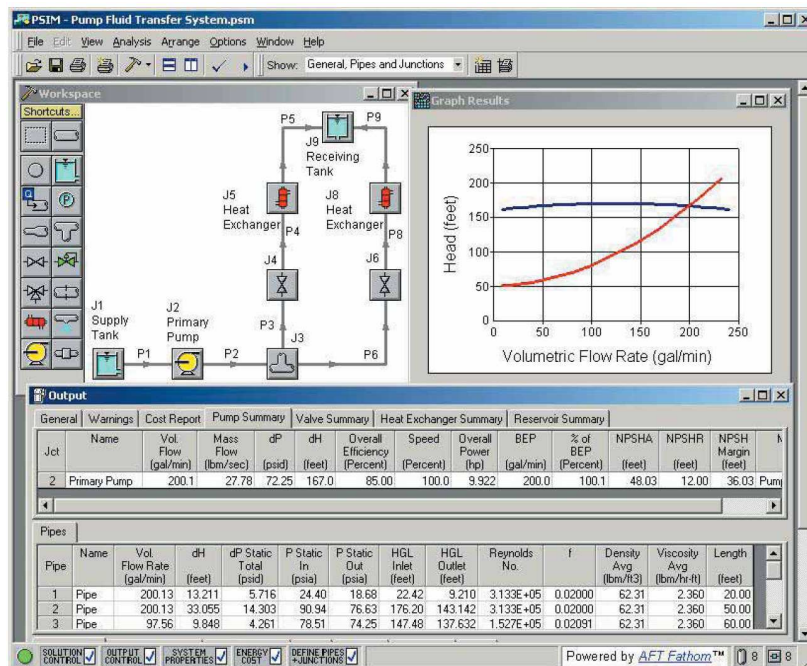
Figura 9. Presentación PSIM software



Fuente: www.pumpsystemsmatter.org

La herramienta software presentada es un recurso educacional y gratuito avalado por el instituto hidráulico, aspecto que da confiabilidad en los resultados que arroja en su empleo para generar las curvas de desempeño de los equipos en estudio, y en las futuras simulaciones que serán realizadas con el fin de detectar las mejores oportunidades de optimización del sistema de bombeo LA CUMBRE.

Figura 10. PSIM brochure, presentación de sus bondades



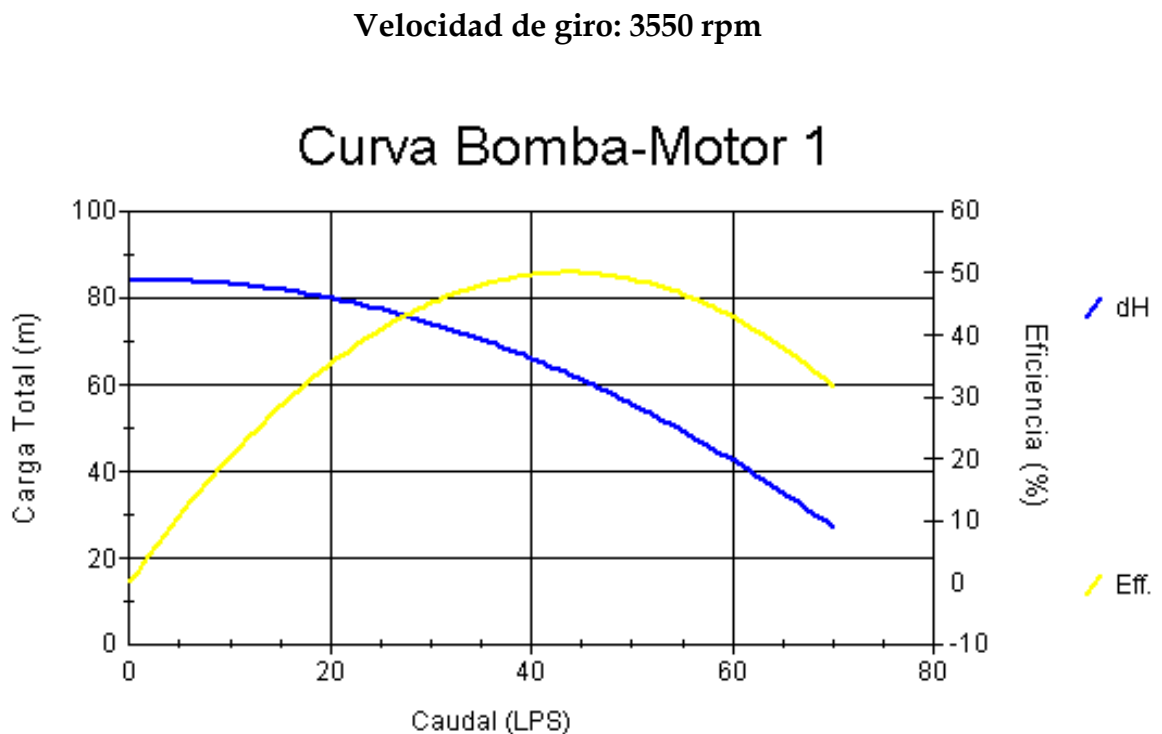
Fuente: www.pumpsystemsmatter.org

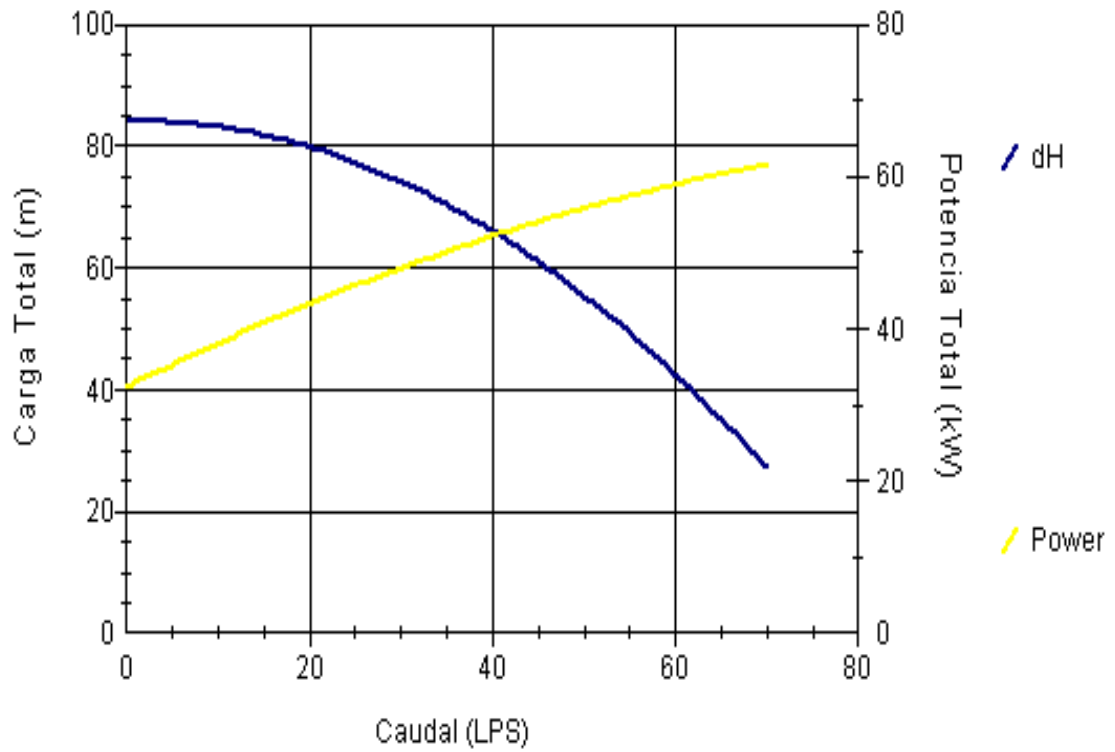
A continuación se presentarán en los cuadros de resultados obtenidos por el procesamiento de datos, y seguido, para cada configuración bomba-motor, sus respectivas curvas de desempeño arrojadas por el software PSIM.

Cuadro 11. Cuadro de resultados curvas de desempeño configuración bomba-motor 1

Carga Total (m)	Caudal (LPS)	Eficiencia Electromecánica (%)	Potencia Eléctrica neta (Kw)
84	0	0	32,45
67,4	38,5	49,3	51,61
55	51	48,9	56,25
52,5	52,5	47,72	56,65

Figura 11. Curvas de desempeño grupo bomba-motor 1.





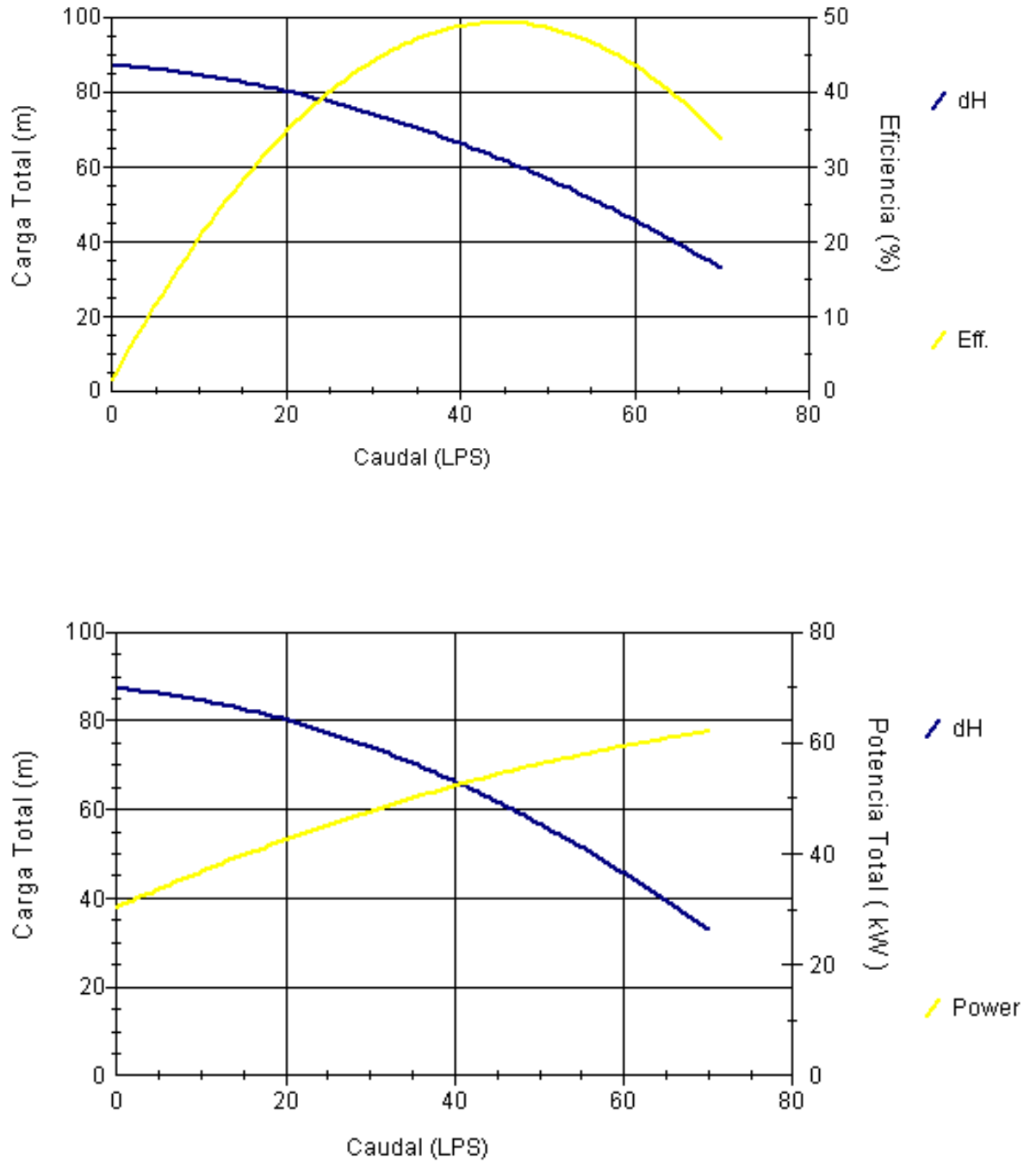
Cuadro 12. Cuadro de resultados curvas de desempeño configuración bomba-motor 2.

Carga Total (m)	Caudal (LPS)	Eficiencia Electromecánica (%)	Potencia Eléctrica neta (kW)
87,85	0	0	30,9
83,33	10,3	23,25	36,2
76,26	28	44,46	47,1
66,42	40	49,34	52,8
60,55	46,5	50,29	54,9
58,03	48,5	49,6	55,65
57,51	49,5	50,13	55,68

Figura 12. Curvas de desempeño grupo bomba-motor 2.

Velocidad de giro: 3550 RPM

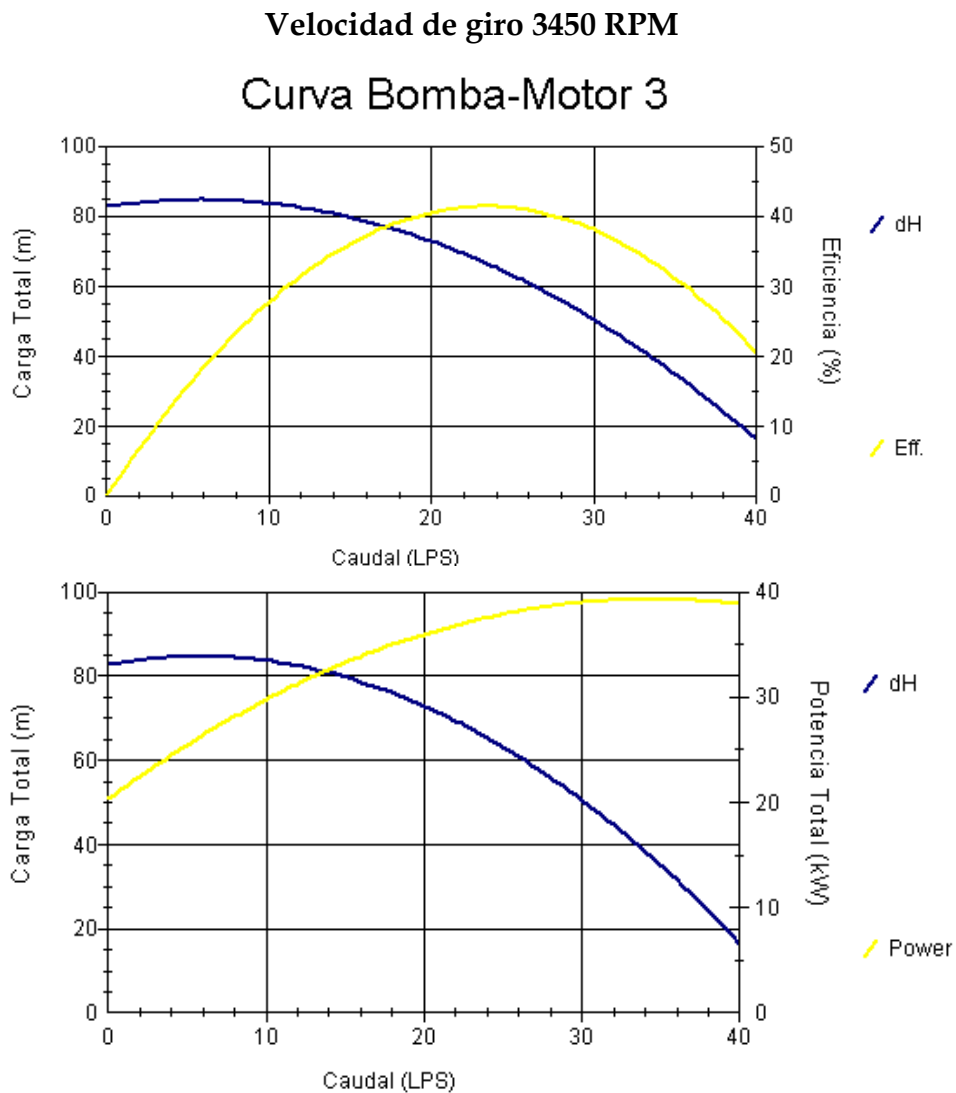
Curva Bomba-Motor 2



Cuadro 13. Cuadro de resultados curvas de desempeño configuración bomba-motor 3.

Carga Total (m)	Caudal (LPS)	Eficiencia Electromecánica (%)	Potencia Eléctrica neta (kW)
82,73	0	0	20,35
55,4	28,6	40,36	38,5
46,98	30,5	35,38	39,72
46,07	31,6	36,6	39
45,72	32	36,74	39,05

Figura 13. Curvas de desempeño grupo bomba-motor 3.



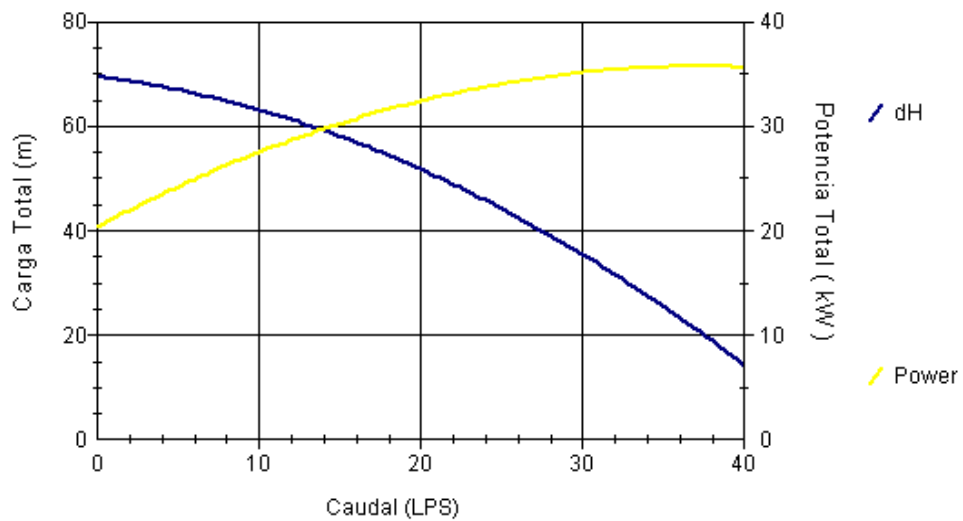
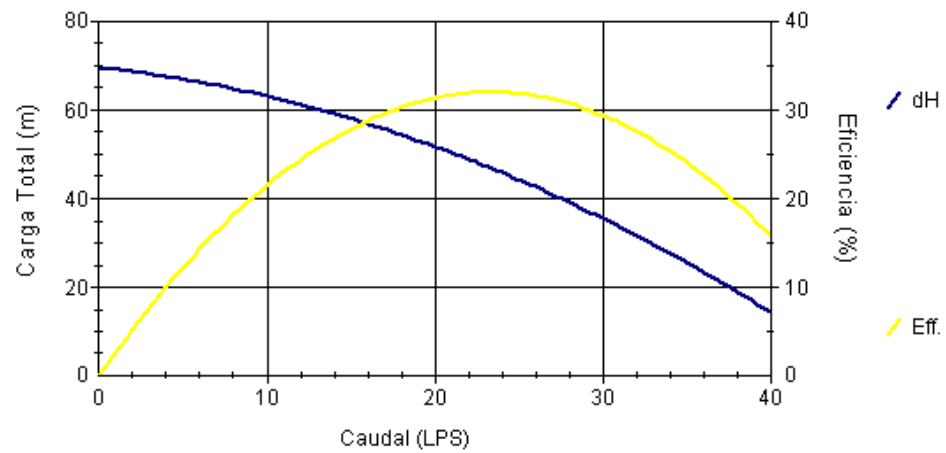
Cuadro 14. Cuadro de resultados curvas de desempeño configuración bomba-motor 4.

Carga Total (m)	Caudal (LPS)	Eficiencia Electromecánica (%)	Potencia Eléctrica neta (Kw)
69,47	0	0	20,45
53,2	19	30,93	32,05
45,28	24,9	32,66	33,85
44,37	24,5	31,27	34,09
44,02	25	31,62	34,13

Figura 14. Curvas de desempeño grupo bomba-motor 4.

Velocidad de giro 3450 RPM

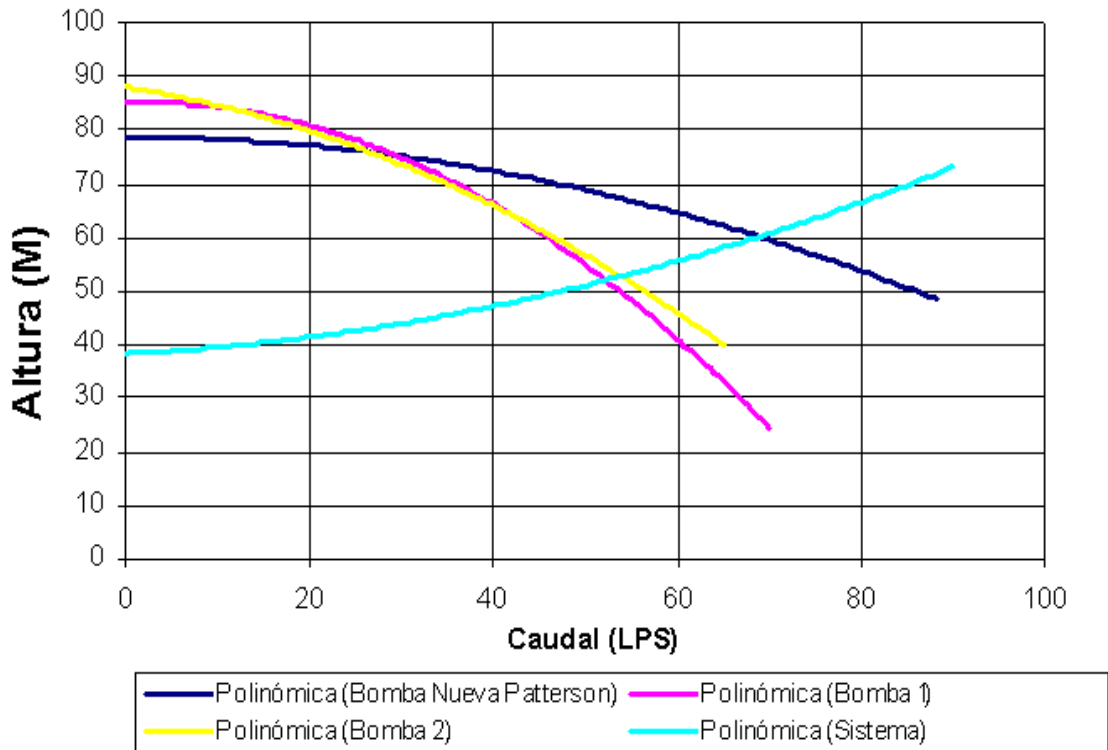
Curva Bomba-Motor 4



1.2.4 Análisis de resultados curvas de desempeño. La metodología de análisis consiste en contrastar las curvas de desempeño obtenidas de manera experimental con las curvas presentadas por el fabricante, de esa forma se hace evidente el desgaste que han sufrido las bombas en cuestión, debido a su continua operación a lo largo de 15 años de servicio.

El nivel de desgaste o de “escurrimiento” de las bombas será evaluado con respecto al propio sistema de tuberías y accesorios, es decir, se hará una comparación entre el punto de operación actual de cada bomba en estudio y el punto de operación correspondiente a la misma bomba bajo las condiciones de fábrica (bomba igual nueva).

Figura 15. Comparación curvas de desempeño bombas 1 & 2



La curva del sistema fue desarrollada con ayuda del software de modelamiento de sistemas de bombeo PSIM.

Antes de dar inicio al análisis de resultados, se reconoce que el trazo de las curvas tiene cierta irregularidad cuando éstas son comparadas con la curva original entregada por el fabricante.

En la figura anterior se observa que, las curvas de las bombas 1 & 2, a bajos caudales (0 a 30 LPS) la altura o carga correspondiente es mayor que la presentada por el fabricante, lo cual es bastante inusual cuando esta acostumbrado verse en la literatura técnica referente, que bajo condiciones de desgaste, la curva de la bomba desgastada está por debajo de la curva de la misma bomba bajo condiciones de fábrica en todos sus puntos de operación (ver figura 7) lo cual refleja no sólo un desgaste en la bomba sino también una anomalía en su desempeño bajo el rango de caudales antes mencionado.

Por lo visto en las gráficas también se deduce que ambas bombas han tenido una evolución pareja, y que operan cercanas a su punto de máxima eficiencia (aunque sea baja) lo cual dice que fueron equipos adecuadamente seleccionados para la aplicación. *Se deduce entonces que una de las razones de la baja eficiencia del sistema de bombeo LA CUMBRE consiste en la degeneración de las bombas a lo largo de su vida útil, y se desecha la hipótesis de una mala selección de los equipos.*

El grado de escurrimiento que presentan las bombas 1 & 2 es el siguiente:

Cuadro 15. Grado de escurrimiento bombas 1&2

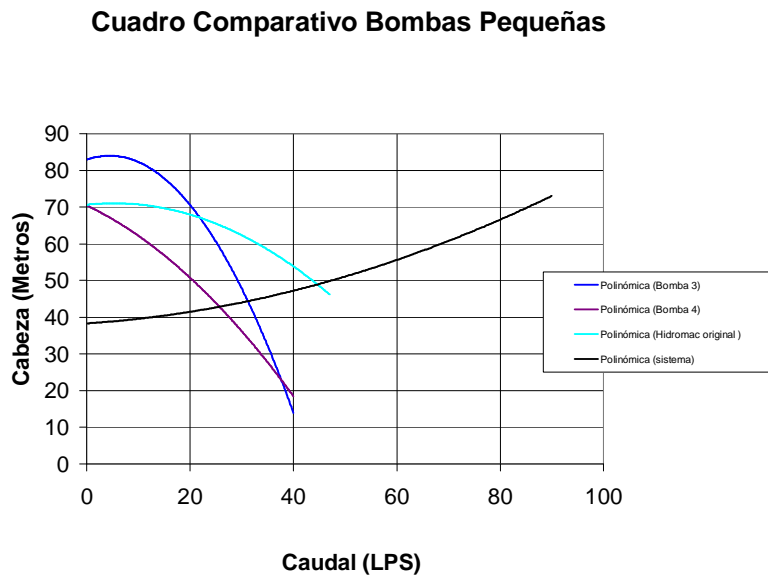
	Caudal (LPS)	Carga (m)	Eficiencia Electromecánica (%)	Escurrimiento Carga (%)	Escurrimiento Caudal (%)	Puntos de eficiencia
Bomba 1	52	53	47	11,7	23,5	26
Bomba 2	54	54	48	10	20,6	25
Bomba Óptima	68	60	73			

Puede verse a través de este cuadro, cómo han cambiado las condiciones del equipo debido a un desgaste provocado quizá por un mantenimiento insuficiente, esto se observa notablemente en el escurrimiento de la capacidad (caudal) de las bombas en estudio, y sobre todo, en los puntos de eficiencia perdidos a lo largo de sus años de servicio.

La eficiencia electromecánica de la configuración original (nueva) se determinó consultando la eficiencia de la bomba en el catálogo del fabricante (80%) en el punto de operación señalado, y multiplicando dicha eficiencia con una eficiencia de 91% supuesta para el motor eléctrico en óptimas condiciones.

El fabricante de las bombas estudiadas (PATTERSON), en su manual de mantenimiento, sugiere cambio de anillos de desgaste cuando las bombas presentan una disminución en su capacidad (caudal) de 5 a 10% con respecto a las condiciones iniciales de operación, en la actualidad, la disminución de la capacidad ha duplicado el límite recomendado por el fabricante.

Figura 16. Comparación curvas de desempeño bombas 3 & 4



Nótese que se observa la misma anomalía presentada con los equipos de mayor tamaño, a excepción de la bomba 4, pero ésta tiene una modificación en su impulsor, al cual su tamaño ha sido reducido años atrás debido a un mal funcionamiento por sus altos requerimientos de potencia.

La información recopilada de estos equipos es muy limitada, son equipos de mayor edad que los anteriormente presentados (equipos grandes PATTERSON), no se tiene certeza de que las curvas mostradas en el proyecto de diseño del sistema de bombeo LA CUMBRE sean consistentes con las curvas de los equipos instalados, lo que hace, además de las modificaciones realizadas en la bomba 4, que la figura presentada anteriormente, sea de baja consideración, no obstante, la demasiado baja eficiencia electromecánica (37 y 32%, bombas 3 y 4 respectivamente) y evidente desgaste son suficiente argumento para considerarlas poco convenientes en el sistema de bombeo LA CUMBRE, en lo que hace referencia a una operación eficiente energéticamente.

Hay que agregar además, que las bombas 3 y 4 no funcionan aisladamente en el sistema de bombeo estudiado, ellas son equipos de refuerzo que operan en conjunto con una bomba grande (PATTERSON) cuando la demanda del sistema es alta, eso quiere decir que sus puntos reales de operación no corresponden con los mostrados en la figura anterior, en realidad, estos equipos bombean en un punto de operación donde los caudales son mas bajos y las cargas mayores que las presentadas en la figura anterior, lo que las hace mas propensas a desgastarse a causa del empuje radial⁴ originado por las altas cargas y su distanciamiento de sus respectivos puntos de máxima eficiencia (ver figura 3).

El desarrollo experimental de las curvas de desempeño diagnostica una disminución en la capacidad y eficiencia de las bombas causada (en parte considerable) por el desgaste de sus elementos internos, también que dichos trazos presentan un comportamiento anómalo a condiciones de baja capacidad y alta carga; las razones de este comportamiento no se conocen.

1.3 ÍNDICE ENERGÉTICO O ENERGÍA ESPECÍFICA

Un sistema de bombeo es construido para desplazar cierta cantidad de fluido desde un lugar a otro. Un indicador ampliamente utilizado para calcular el costo de bombear es la energía específica o índice energético (E_s). E_s es la cantidad de energía (expresada en kilowatt-hora) requerida para desplazar una unidad de volumen de fluido (expresada usualmente en metros cúbicos) hacia el lugar solicitado.

⁴ A capacidades diferentes del punto de máxima eficiencia, las presiones alrededor del impulsor no son uniformes y hay una reacción radial resultante conocida como empuje radial.

$$E_s = \frac{kWh_{consumidos}}{m^3_{bombeados}} \text{ (ecuación 1.8)}$$

Aunque existe una forma más práctica de calcularla:

$$E_s = \frac{P_{Entrada}}{Q} \text{ (ecuación 1.9), donde:}$$

$P_{Entrada}$: Es la potencia eléctrica suministrada, en kW.

Q: Caudal entregado por la bomba, en m³/h.

1.3.1 Resultados desarrollo energía específica.

Cuadro 16. Resultados de energía específica sistema de bombeo LA CUMBRE

Bomba	Caudal (LPS)	Potencia E.(kW)	E_s (kWh/m ³)
1	53	56,65	0,297
2	56	60	0,298
3	32	36,74	0,32
4	25	34,13	0,38
1 & 3	81,4	94	0,34
1 & 4	68,3	87,5	0,36
2 & 3	75,82	111,37	0,41
2 & 4	70	89,07	0,35
Patterson Óptima	69,7	51,5	0,21

Los resultados entregados de energía específica corresponden a cada posibilidad de operación de las bombas del sistema de bombeo LA CUMBRE, están determinadas para su punto de operación típico, y como puede verse en el anterior cuadro, el bombeo configurado en paralelo es más costoso (por

cada metro cúbico desplazado) que la operación individual de las bombas 1 y 2.

1.3.2 Análisis de resultados energía específica, estimación de costos. En el cuadro anterior se hace evidente una diferencia de casi diez puntos entre la energía específica de las bombas 1 y 2, y su similar en óptimas condiciones. Veremos a continuación, cómo influye esta diferencia en los costos de energía y los potenciales de ahorro en costos. En este inciso, se hará una aproximación más cercana a las condiciones reales del sistema de bombeo LA CUMBRE, comparada con la sencilla estimación realizada en el inciso 1.1.2 con ayuda de la ecuación 1.7.

Las bombas 1 y 2, funcionando intermitentemente, entregan alrededor de 1'140.480 metros cúbicos de agua al distrito LA CUMBRE cada año. Veremos cual es la expectativa de ahorro de energía si estos equipos contaran con las mismas características de desempeño que tenían hace casi 15 años, transportando la misma cantidad de agua, bajo las condiciones actuales del sistema de tuberías y accesorios.

Cuadro 17. Expectativa ahorro de energía anual bombeo con una sola bomba

Bomba	E_s (kWh/m ³)	Energía Consumida (kWh)	Ahorro de energía (%)
1 & 2	0,297	338.722	30,97
original	0,205	233.798	

Entonces, bombear con esta bomba en óptimas condiciones significa consumir un 31 % menos energía de la que se consume por mantener este

equipo en malas condiciones o no reponerlo por otro nuevo con mejor desempeño.

Ahora, considerando la operación en paralelo, en la cual se consumen aproximadamente 34.400 kWh anuales, y tomando un costo de energía promedio de 210 \$/kWh, se tiene un costo anual de bombeo estimado de:

\$ 78'355.000 anuales

Cada mes, entonces, el costo se aproxima a \$ 6'530.000. Debe considerarse que esta es una estimación, ya que los costos de energía son distintos según la facturación, además, cada mes no se bombea la misma cantidad de agua, por lo tanto, cada mes habrá un consumo de energía diferente. Sin embargo, comparada esta cifra con la facturación mensual diligenciada por la empresa proveedora de energía, no se encuentra diferencia considerable.

Si la expectativa de ahorro es del 31% renovando los equipos con otro idéntico, se dejarán de gastar \$24'290.000 en energía. Esta suma es cercana la mitad del costo inicial de una bomba similar, lo que quiere decir que un proyecto de optimización ó de renovación es completamente viable, ya que estos equipos, según la literatura, garantizando una política de mantenimiento adecuada, alcanzan una vida útil de 20 años en buenas condiciones.

2. DIAGNÓSTICO CBM

2.1 INTRODUCCIÓN.

Condition Based Monitoring (CBM) es un proceso de mantenimiento donde la condición o la “salud” del equipo es monitoreada con el fin de conocer los signos tempranos de una posible falla. Dichos equipos pueden ser monitoreados usando instrumentación sofisticada como los analizadores de vibraciones e infrarrojos, o la tecnología de ultrasonido.

La técnica CBM mas comúnmente utilizada, especialmente para bombas y otras máquinas rotativas, es el análisis de vibraciones. Las medidas son tomadas en los apoyos del equipo y en las cajas de los rodamientos. Los niveles de vibración pueden ser comparados con estándares establecidos para determinar severidad. Utilizando los algoritmos de Fourier, las frecuencias y armónicos ayudan a determinar la causa de la vibración y dan indicios de cómo eliminarla. Por ejemplo, una alta vibración que se incrementa con la velocidad de rotación indicaría un desbalance, el cual puede ser solucionado haciendo ciertas modificaciones de diseño en la máquina analizada.

Otra técnica CBM es la de infrarrojo o termografía, ésta involucra la detección y medida de emisiones infrarrojas relativas al calor. Un calor excesivo es indicador de la falla de un componente, o de la degradación de un contacto eléctrico o terminales, o de una próxima falla en rodamientos.

Los análisis de vibraciones e infrarrojos son complementados con otra técnica de inspección conocida como análisis de ultrasonido.

Los ultrasonidos son producidos por fricción, ionización o turbulencia, lo cual hace esta técnica efectiva para el testeado de equipos mecánicos, eléctricos y sistemas de flujo. Estos instrumentos identifican tempranas advertencias de fallas mecánicas, localizan arcos eléctricos, descargas en efecto corona en mecanismos eléctricos, y también detectan todo tipo de fugas y malos patrones de flujo.

En el sistema de bombeo LA CUMBRE se utilizaron las técnicas de vibraciones y ultrasonido, con el fin de conocer la condición actual de los equipos de este sistema de bombeo. Este diagnóstico entregaría información complementaria al estudio de desempeño presentado en el primer informe, información sobre el estado de los motores eléctricos y su sistema de potencia y control, el estado de las bombas, sus condiciones de succión, su patrón hidráulico, condición de las válvulas y otros accesorios de la estación de bombeo. De esta forma el diagnóstico se especializa un poco más en lo que se refiere a equipos, no en función de parámetros globales, sino en aspectos puntuales y específicos de cada elemento de esta estación en estudio.

El diagnóstico CBM fue desarrollado por personal idóneo para el empleo de este tipo de técnicas, la empresa contratada SUPPLY CHAIN SERVICES NET Ltda., suministró equipos e ingenieros especializados para esta labor. Dicha jornada fue coordinada por el autor de este informe.

2.2 DIAGNÓSTICO TÉCNICA ULTRASONIDO

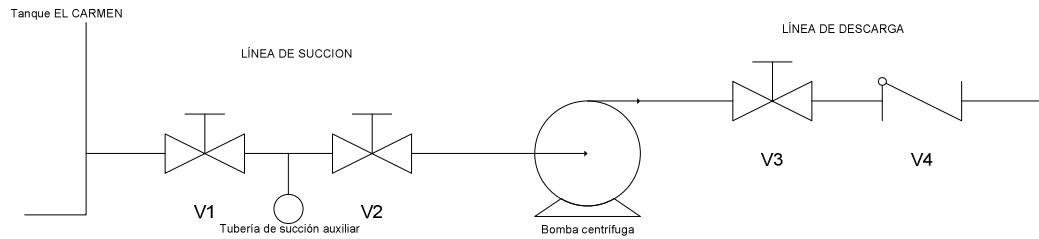
Este diagnóstico fue desarrollado con el fin de conocer el estado de las válvulas en la estación de bombeo LA CUMBRE y detectar patrones hidráulicos sospechosos que influyan en las condiciones de succión de las bombas.

Antes de mostrar los resultados de este diagnóstico se presenta el esquema de sistema de válvulas; de succión, descarga y cheques, que obedece a la configuración actual de esta estación de bombeo. El equipo utilizado, las condiciones y metodología serán presentadas seguidamente.

Figura 17. Análisis ultrasonido estación de bombeo LA CUMBRE.



Figura 18. Esquema arreglo válvulas estación de bombeo LA CUMBRE



Lista de válvulas		
Texto mostrado	Descripción	Clase de válvula
V1	Válvula de Succión	Válvula de Compuerta
V2	Válvula de Succión	Válvula de Compuerta
V3	Válvula de Descarga	Válvula de Compuerta
V4	Válvula de Descarga	Válvula Cheque

Cuadro 18. Presentación equipo utilizado

Especificaciones del ULTRAPROBE® 10,000	
Construcción:	Tipo pistola portátil hecho con aluminio revestido y plástico ABS
Circuito:	Analógicos de estado sólido y circuitos digitales SMD con compensación de temperatura conversión real RMS.
Rango Frecuencia:	20 Khz. a 100 Khz. (Sintonizable en incrementos de 1KHz)
Tiempo de Respuesta:	< 10 ms
Pantalla:	64 x 128 LCD con luz posterior LED
Memoria:	400 ubicaciones de almacenamiento
Batería:	NIMH Recargable
Temperatura de Funcionamiento:	32°F a 122°F (10°C a 50°C)
Salidas:	Salida heterodina calibrada, decibeles (dB), frecuencia, salida de datos RS-232.
Módulos:	Modulo escáner trisónico, modulo estetoscopio, módulo de largo alcance
Audifonos:	Audifonos de lujo atenuadores de ruido para usar con casco.
Indicadores:	dB, Frecuencia, estado de la batería y gráfico de barras de 16 segmentos
Sensibilidad:	Detecta 0.005" (.127mm) de diámetro de fuga a 5 psi (0.34 bar) a una distancia de 50 ft (15.24 m).
Umbral * :	1 x 10 ⁻² std. Cc/seg a 1 x 10 ⁻³ std. Cc/seg
Dimensiones:	Kit completo en estuche de aluminio Zero Halliburton 21.5" x 18.5" x 8" (55 x 47 x 20 cm.)
Peso:	Pistola: 2.35 lb. (1.1 Kg.) Estuche completo: 19 lb. (8.6 Kg.)

Fuente: Informe CBM, SUPPLY CHAIN SERVICES Ltda.

Cuadro 19. Ficha reporte monitoreo ultrasonidos.

Tipo Reporte	Evaluación	Consecutivo N°	Bmanga-Acued Ult-001
Sitio	Bucaramanga	Lugar	Estaciones Cumbre y Bosconia AMB
Tag Maquina	N/A		
Equipo	Sistema de válvulas de las bombas de inyección de agua y clorado		
Condición	En funcionamiento al 100%	Equipo de Medición.	Pistola de Ultrasonido ULTRAPROBE 10000
Fecha monitoreo	Julio 06, 2007	Fecha de Reporte	Julio 19, 2007
Horómetro	N/A	Orden de Trabajo	N/A

Fuente: Informe CBM, SUPPLY CHAIN SERVICES Ltda.

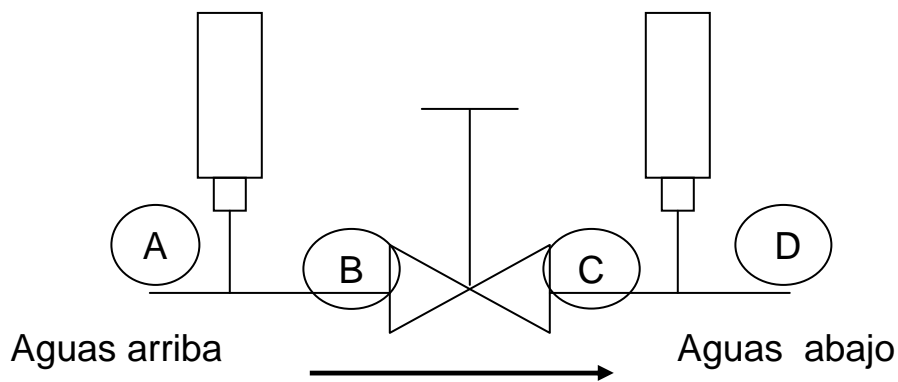
2.2.1 Objetivo del monitoreo con tecnología ultrasonido. Evaluar la condición actual de estructuras, pórticos, subestaciones, máquinas eléctricas con sus elementos de control y potencia y demás equipo y/o elementos eléctricos, líneas y tuberías de agua, gas u otros fluidos, con sus respectivos elementos que las conforman; mediante la inspección de ultrasonido propagado en aire/estructura utilizando el equipo Ultraprobe 10.000.

2.2.2 Procedimiento. Para el desarrollo de la inspección se toman los siguientes registros de la falla.

- Decibeles.
- Sensibilidad.
- Frecuencia.
- Voltaje de funcionamiento del equipo, elemento o sitio a inspeccionar.
- Temperatura y Humedad.
- Foto(s) de la(s) falla(s).

2.2.3 Método de inspección. Las válvulas abierto/cerrado son normalmente revisadas por posición, abierto ó cerrado, ó por fugas en la posición cerrada. Las válvulas son probadas en contacto directo con el equipo UP 10000, escogiendo 4 puntos, 2 aguas arriba (A y B) y 2 aguas abajo (C y D), luego se comparan los puntos y dependiendo del estado (abierto/cerrado), se concluye el tipo de falla.

Figura 19. Puntos de medición análisis ultrasonido.



Posición Cerrada. La válvula cuando esta en posición cerrada, los puntos A y B deben tener un incremento en dB muy similares ó una diferencia de 3 ó 4 dB, comparando un punto con el otro. Si la válvula se encuentra en buen estado los puntos C Y D son mucho menores que los puntos A y B, y si de lo contrario la válvula presenta paso los puntos C y D son muchos mas altos que los puntos A y B.

Posición Abierta. La válvula cuando esta en posición abierta, los puntos A, B, C y D deben tener un incremento en dB muy similares ó una diferencia mínima de 3 ó 4 dB comparando un punto con el otro. Si la válvula se encuentra en buen estado presenta un flujo continuo con los mismos dB en cada punto ó muy parecidos. Y si de lo contrario hay una obstrucción en la




válvula los puntos C y D presentan un incremento considerable comparándolos con A y B.





2.2.4 Resultados monitoreo con tecnología ultrasonido. El informe se divide en dos partes; una primera parte donde se indican los resultados según el método de inspección anteriormente explicado, y una segunda donde se analiza el espectro del sonido.






En la primera parte, los resultados se muestran en columnas las cuales representan lo siguiente: nombre del elemento y sistema al que pertenece, fotografía del elemento en cuestión, puntos de inspección según método explicado anteriormente, y diagnóstico o resultado de la inspección.

En la segunda parte se brinda el sonido del cual se hace el análisis espectral adjuntando sus gráficas y un diagnóstico con comentarios y recomendaciones. Se realizaron las inspecciones con válvulas abiertas, con una frecuencia de 3KHZ.



Cuadro 20. Resultados según el método de inspección análisis ultrasonido.

No.	Elemento	Decibeles				Resultado
		Punto A	Punto B	Punto C	Punto D	
Bomba 1 Valv #1		31	29	29	31	Buen estado
Bomba 1 Valv #2		43	40	48	43	Buen estado
Bomba 1 Cheque		41	40	44	42	Obstrucción, posible inicio de daño en su compuerta

Bomba 1 Valv #3		33	37	34	33	Buen estado
Bomba 2 Valv #1		33	28	41	46	Obstrucción, revisar cierre de la válvula y sedimentación
Bomba 2 Valv #2		48	40	52	52	Obstrucción, revisar cierre de la válvula y sedimentación
Bomba 2 Cheque		32	35	35	39	Obstrucción, posible daño en la compuerta

No.	Elemento	Decibeles				Resultado
		Punto A	Punto B	Punto C	Punto D	
Bomba 2 Valv #3		25	32	26	22	Buen estado
Bomba 3 Valv #1		42	38	39	41	Buen estado
Bomba 3 Valv #2		49	46	50	51	Obstrucción, revisar cierre de la válvula y sedimentación
Bomba 3 Cheque		22	28	33	26	Obstrucción, posible daño en la compuerta
Bomba 3 Valv #3		21	21	21	21	Buen estado

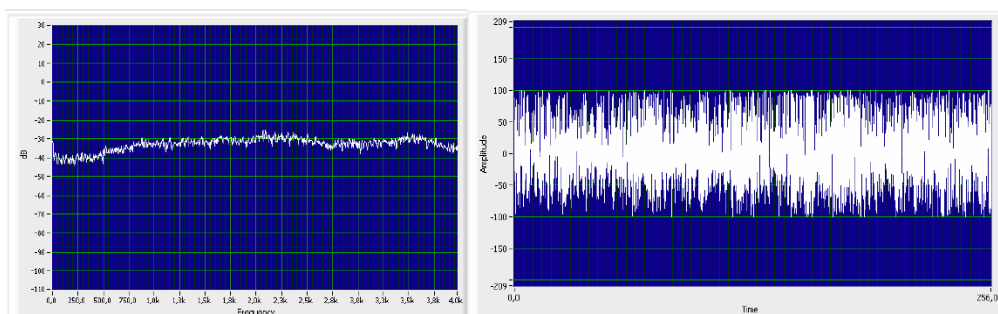
Bomba 4 Valv #1		37	39	45	44	Obstrucción, revisar cierre de la válvula y sedimentación
Bomba 4 Valv #2		52	50	55	53	Obstrucción, revisar cierre de la válvula y sedimentación

No.	Elemento	Decibeles				Resultado
		Punto A	Punto B	Punto C	Punto D	
Bomba 4 Cheque		47	50	51	50	Obstrucción, posible daño en la compuerta
Bomba 4 Valv #3		34	41	38	35	Buen estado

Fuente: Informe CBM, SUPPLY CHAIN SERVICES Ltda.

Se hizo necesario el análisis del espectro de sonido de los cheques de las bombas 1, 2 y 3 de la estación LA CUMBRE, ya que presentaron sonidos extraños. Adicionalmente se analizó el espectro de sonido de la bomba 4, la cual parece tener problemas de recirculación.

Figura 20. Presentación espectro cheque bomba 1.



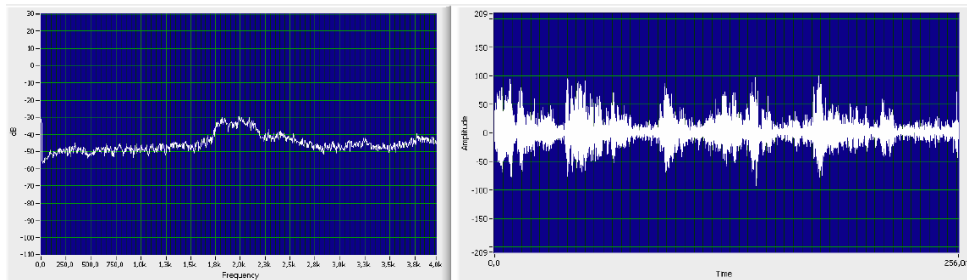
Fuente: Informe CBM, SUPPLY CHAIN SERVICES Ltda.

Comentarios y Recomendaciones de los espectros.

Cheque sistema bomba 1 Estación LA CUMBRE Al igual que en el cuadro de resultados de datos, donde se indica un inicio de un daño en la compuerta, se aprecia con los espectros (figura 20); unos leves altibajos que comprueban que en el mecanismo de cierre de compuerta, se está iniciando un deterioro.

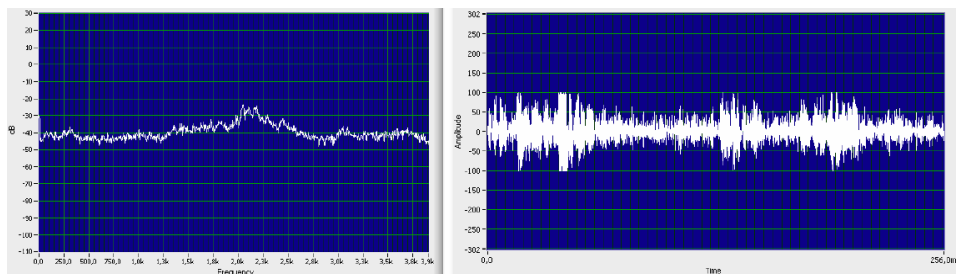
En este estado se alcanza a afectar levemente el caudal que viaja por la tubería. No es motivo de preocupación, pero se recomienda realizarle mantenimiento antes de que sufra más daño dicho sistema de compuerta.

Figura 21. Presentación espectro cheque bomba 2



Fuente: Informe CBM, SUPPLY CHAIN SERVICES Ltda.

Figura 22. Presentación espectro cheque bomba 3.

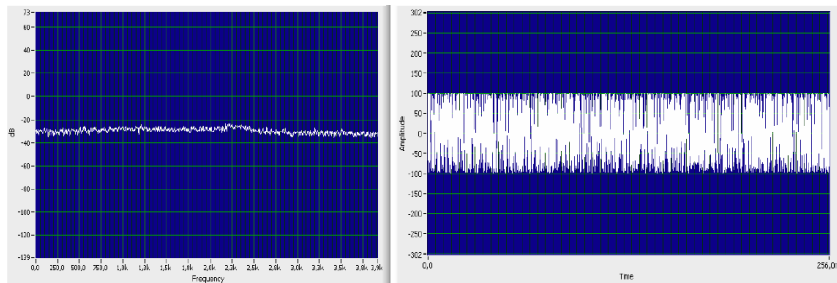


Fuente: Informe CBM, SUPPLY CHAIN SERVICES Ltda.

Cheques sistemas bombas 2 y 3 Estación LA CUMBRE Se confirma con los espectros el daño en la compuerta de los cheques. Existe un daño más avanzado en el cheque de la bomba 3 que en la 2, el cual su nivel de decibeles es más alto.

Se recomienda desmontar los dos cheques y arreglar o cambiar el sistema de compuerta (si es posible), o en su defecto cambiar los cheques.

Figura 23. Presentación espectro bomba 4.



Fuente: Informe CBM, SUPPLY CHAIN SERVICES Ltda.

Bomba 4 Estación LA CUMBRE Cuando se encendió la bomba parecía que tuviera cavitación, pero después de unos segundos se estabilizó y se comportó correctamente. Sin embargo se grabó su sonido para analizar su espectro y así verificar su estado. Los resultados que brinda el espectro indican que la bomba se encuentra en buen estado, sin embargo los resultados de la prueba de vibraciones dan un diagnóstico más detallado y exacto.

Sistema de control estación LA CUMBRE, respondió satisfactoriamente al monitoreo de su condición con ultrasonidos.

Figura 24. Monitoreo del panel y sistema de control con ultrasonidos.



2.3 DIAGNÓSTICO ANÁLISIS DE VIBRACIONES

El análisis de vibraciones se hizo con el fin de conocer de manera más puntual la condición de las configuraciones bomba-motor, como complemento del diagnóstico de desempeño. De esta forma, junto con el análisis de ultrasonido, se tendrá informe del estado de los equipos que conforman la estación de bombeo LA CUMBRE, que de manera consecuente,

especificará cuales son las labores de mantenimiento necesarias para alcanzar el óptimo desempeño de la estación de bombeo.

Figura 25. Monitoreo Vibraciones estación de bombeo LA CUMBRE



2.3.1 Objetivo monitoreo vibraciones. Evaluación actual del desempeño y condición mecánica de bombas y motores eléctricos pertenecientes a la estación de bombeo LA CUMBRE, mediante el monitoreo y análisis de vibraciones mecánicas utilizando el equipo COMMTEST Vb3000.

2.3.2 Procedimiento. Los límites de alarmas y parámetros de análisis utilizados fueron generados mediante el Método Comprobado de los Asociados Técnicos de Charlotte. Adicionalmente, utilizamos como referencia los límites de alarmas para operación normal, advertencia, alerta y fallo, con base en las normas ISO 2372 y 10816 rev.2003.

Para los motores, adicionalmente a los puntos de medición normales, se incluyen varias mediciones adicionales para detección de problemas relacionados con barras del rotor (Alta frecuencia), problemas eléctricos (baja frecuencia / alta resolución) y captura de ondas en el tiempo con alto número

de muestreos. Se incluye un punto con filtro de desmodulación de 2da. Generación para detección de problemas relacionados con las frecuencias de los rodamientos.

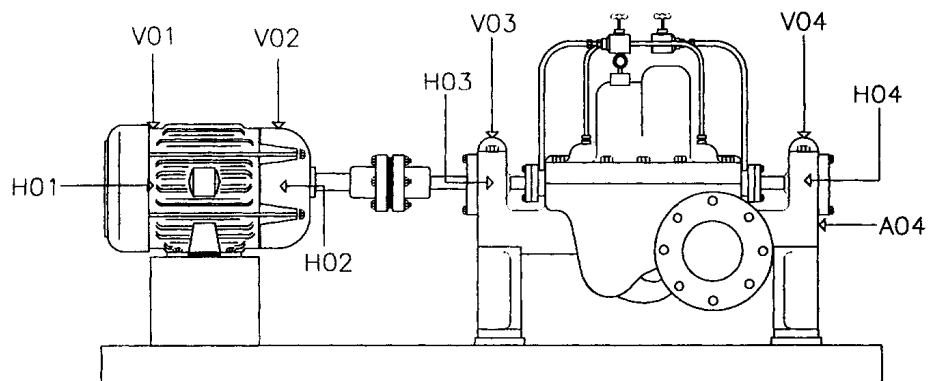
Para el desarrollo del monitoreo fue necesario realizar todo el procedimiento establecido para la toma de información y respectiva medición en campo de la unidad.

Después del estudio realizado se determinó ubicar:

- Dos (2) puntos de medición en el Motor Eléctrico.
- Dos (2) puntos de medición en la Bomba.

Cada punto de medición esta conformado por tres ubicaciones en los sentidos Horizontal, Vertical y Axial, logrando con esto una mejor respuesta de vibración en la maquina.

Figura 26. Esquema puntos de medición de vibraciones



Fuente: Engineering vibration Fundamentals, R Keith Mobley, 1999.

2.3.3 Especificaciones equipo utilizado

Cuadro 21. Especificaciones equipo COMMTEST Vb3000

Specifications	Model vb3000	Remarks
Sensor Input Number of channels Accelerometers Velocity sensors Displacement sensors Current sensors Connector Input impedance Voltage swing Sensor excitation current Sensor excitation voltage Sensor detection	2 2-wire, low impedance piezoelectric, 100 mV/g nominal 100 mV/in/s (4 mV/mm/s) nominal 100 mV/mil (4 mV/ μ m) nominal 100 mV/amp nominal BNC >100 k Ω 16 V peak-peak 0 mA or 2.2 mA (configurable) 24 V maximum Warns if short circuit or not connected	Commonly termed 'ICP® type'. Sensitivity (8.5 to 2300) mV/g Sensitivity (8.5 to 2300) mV/in/s = (0.34 to 90.55) mV/mm/s Sensitivity (8.5 to 2300) mV/mil = (0.34 to 90.55) mV/ μ m Sensitivity (0.1 to 2300) mV/amp Safety feature: Break-free inline connector AC coupled input, allows for \pm 8 V sensor output swing (\pm 80 g) 2.2 mA required for ICP® type accelerometer At sensor terminals with sensor attached Channel 1 only
Tachometer Input Sensor Laser sensor range Sensor supply Input type Pulse rating Speed range Display	Laser sensor with reflective tape included in kit 10 cm to 2 m nominal 7.2 V nominal 6.0 V to 9.5 V instrument battery Optically isolated, accepts TTL pulse 2.5 V (4 mA) min, 10 V (27 mA) max, off-state < 0.8 V 30 RPM to 65 000 RPM (0.5 Hz to 1.08 kHz) RPM, Hz, 1X amplitude and phase angle	Sensor triggers when the tape reflects its beam Dependent on size of reflective tape Available to power sensor. Protected by 0.1 A PTC Triggers on negative edge For selected amplitude type, phase angle in degrees
Parameter Indication Displays Maximum levels Dynamic signal range Harmonic distortion Units Graph types Magnitude display Warnings Cursors Accuracy Frequency response	Acceleration, velocity, displacement, demodulation and current \pm 80 g (800 m/s ²), \pm 4 in/sec (100 mm/s), \pm 800 amps \pm 400 mil (10 mm) \geq 95 dB (typical at 400 line resolution) Less than -70 dB typical g or m/s ² , in/s or mm/s, mil or mm or μ m, amps AdB, VdB Spectrum (freq domain), waveform (time domain) Overall rms value, cursor-position value % change in overall since baseline Standard cursor Dual cursors Harmonic cursor \pm 1% (0.1 dB) \pm 0.1 dB from 10 Hz to 15 kHz; \pm 3 dB from 1 Hz to 40 kHz	User selectable \emptyset -peak. Typical, dependent on individual calibration Acceleration and velocity. Greater with higher resolution and averaging Dependent on input level and type. Other distortions and noise are lower \emptyset -peak, peak-peak or rms AdB ref. 1 μ g rms, VdB ref. configurable 1.0e-5 mm/s rms or 1.0e-6 mm/s rms Solid histogram for spectrum, line graph for waveform Digital readout on chart Tolerances: Tight 50% to 150%, relaxed 25% to 200% Vary x position to display x and y values Lock standard cursor as reference and display difference Up to 32 whole-number multiples of standard-cursor frequency Measured at 100 Hz, 23 \pm 5 °C, 400 lines, 400 Hz range Acceleration and velocity: From value measured at 100 Hz

Specifications	Model vb3000	Remarks																																				
Spectrum Display Fmax possible ranges Fmin possible range Resolution Frequency scale Amplitude scale Window shapes Overlap Number of averages Averaging types Demod bandwidths	0 to (100, 125, 150, 200, 300, 400, 500, 600, 800) Hz 0 to (1, 1.2, 1.6, 2, 2.5, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 15, 20, 30, 40) kHz 0 to Fmax 400, 800, 1600, 3200, 6400 lines (configurable) Hz, CPM, orders Acceleration, velocity, displacement or current Hanning, rectangular (0, 12.5, 25, 37.5, 50, 62.5, 75, 87.5) % 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128 Linear, exponential, peak hold, synchronous 20 bandwidth options	Or equivalent CPM values Or orders-based from 1X to 30 000X vb instrum zeroes all spectral lines below Fmin 3200 lines maximum for dual channel measurements Linear scale. Can zoom in to display individual spectral lines Linear or log scales Dependent on Fmax and number of lines Increases sampling time proportionally From 125 Hz to 1250 Hz up to 16 kHz to 20 kHz																																				
Waveform Display Number of samples Long time waveform Time scale Time synchronous averages	1024, 2078, 4096, 8192, 16 384 Up to 15 kHz Fmax. Over 17 hours duration or until memory full 10 ms to 32 seconds/ 1 rev to 30 000 revs 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128	Only available when tachometer triggered																																				
Keypad Entry Prompt and unit strings Input value range	16 characters each \pm 59 999																																					
Time Intervals Measuring time in seconds (example ranges) Typical recording time	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th colspan="5">Lines</th> </tr> <tr> <th>Range</th> <th>400</th> <th>800</th> <th>1600</th> <th>3200</th> <th>6400</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0 Hz to 100 Hz</td> <td>4</td> <td>8</td> <td>16</td> <td>32</td> <td>64</td> </tr> <tr> <td>0 Hz to 800 Hz</td> <td>0.5</td> <td>1</td> <td>2</td> <td>4</td> <td>8</td> </tr> <tr> <td>0 Hz to 4 kHz</td> <td>0.1</td> <td>0.2</td> <td>0.4</td> <td>0.8</td> <td>1.6</td> </tr> <tr> <td>0 Hz to 40 kHz</td> <td>0.01</td> <td>0.02</td> <td>0.04</td> <td>0.08</td> <td>0.16</td> </tr> </tbody> </table> 5 s for 1600 lines, 1600 Hz, 8 averages, 50% overlap		Lines					Range	400	800	1600	3200	6400	0 Hz to 100 Hz	4	8	16	32	64	0 Hz to 800 Hz	0.5	1	2	4	8	0 Hz to 4 kHz	0.1	0.2	0.4	0.8	1.6	0 Hz to 40 kHz	0.01	0.02	0.04	0.08	0.16	Dependent on number of lines and number of averages (values shown in table for no overlap, no averaging, maximum display update rate of 4 per second) Not including initial startup and settling time
	Lines																																					
Range	400	800	1600	3200	6400																																	
0 Hz to 100 Hz	4	8	16	32	64																																	
0 Hz to 800 Hz	0.5	1	2	4	8																																	
0 Hz to 4 kHz	0.1	0.2	0.4	0.8	1.6																																	
0 Hz to 40 kHz	0.01	0.02	0.04	0.08	0.16																																	

Trigger Modes	Single (key press), free run	Trigger status displayed (busy, done, run, stop)
Logging Features		
Output formats	vb screen, transfer to Ascent PC-based software	Total of 11 000 spectra at 800 line resolution or 4000 spectra at 3200 line resolution User-specified machine, point, and axis names (16 characters) entered from PC or keypad. Each recording has a unique time/date stamp
Data storage	32 MB non-volatile	
Data storage format	Up to 30 folders Up to 200 named machines per folder Up to 780 named machines for all folders Up to 30 multi-axial points per machine Up to 8 routes per folder	
Balancing		
Planes	1, 2	∅-peak. Typical, dependent on calibration e.g. attach weights on fan blades, linear distance around circumference
Speed range	30 RPM to 60 000 RPM	
Measurement type	Acceleration, velocity, displacement	Allows re-entry of previous balance jobs
Min and Max values	(0.0004 to 4) in/s = (0.01 to 100) mm/s	
Weight modes	Angle 0° to 360°, fixed position, circumference arc	
Remove trial weights	Yes, No	
Filter bandwidths	15 CPM, 150 CPM	
Manual data entry	Yes	
Storage	10 balance jobs total	

Revised 13 October 2006. While every effort has been made to provide the most accurate information we advise that information in this document may contain technical inaccuracies or typographical errors. Commtest Instruments Ltd may at any time and without notice make improvements and/or changes in the products described in this information.

Fuente: www.commtest.com

2.3.4 Resultados monitoreo vibraciones estación LA CUMBRE. El informe de resultados se presentará en función de cada equipo electromecánico (configuración bomba-motor), en caso de presentarse alguna condición de mal funcionamiento, se mostrará el espectro de vibraciones donde se observa la anomalía.

Reporte de monitoreo configuración bomba-motor 1:

Cuadro 22. Ficha de reporte monitoreo vibraciones bomba 1

Tipo Reporte	Reporte Análisis de Vibraciones Equipo Rotativo		Consecutivo N°	SI-RT-FFT-007
Sitio	Bucaramanga	Lugar:	Estación Cumbre AMB	
Tag Maquina	N/A			
Equipo	Bomba Inyección Agua 01			
Condición	En funcionamiento al 100%		Equipo de Medición.	COMMTEST Vb3000
Fecha monitoreo	Julio 06, 2007		Fecha de Reporte	Julio 19, 2007
Horómetro	N/A		Orden de Trabajo	N/A

Fuente: Informe CBM, SUPPLY CHAIN SERVICES Ltda.

Resultados: como se pudo observar en los espectros de vibración, las condiciones mecánicas y eléctricas del motor son aceptables, sin embargo el

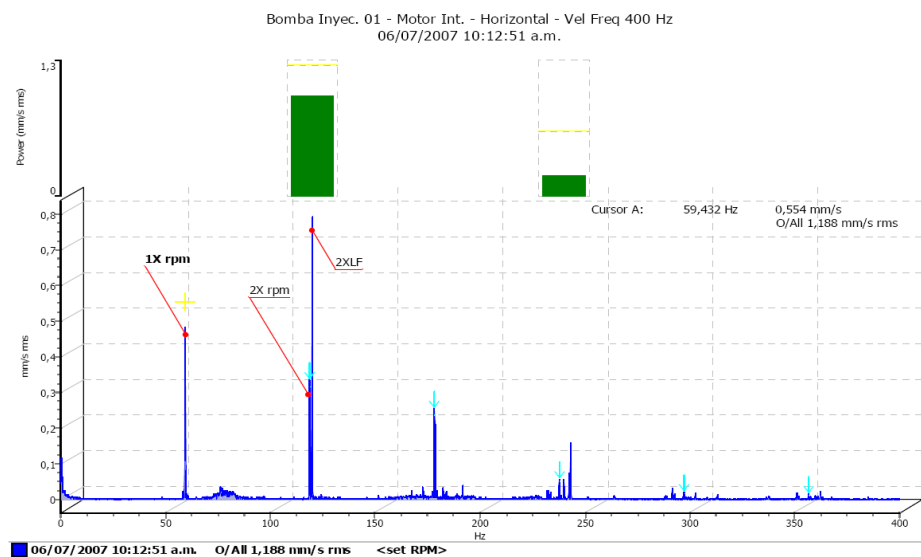
patrón eléctrico relacionado con desbalance de fases y problemas en el entrehierro (2XLF) presenta leve amplitud, aunque los niveles aun están dentro de norma. Es importante realizar pruebas eléctricas al motor para descartar posibles problemas.

La bomba presenta buenas condiciones de operación, sin embargo se observa patrón por desalineamiento que debe ser corregido.

Recomendaciones:

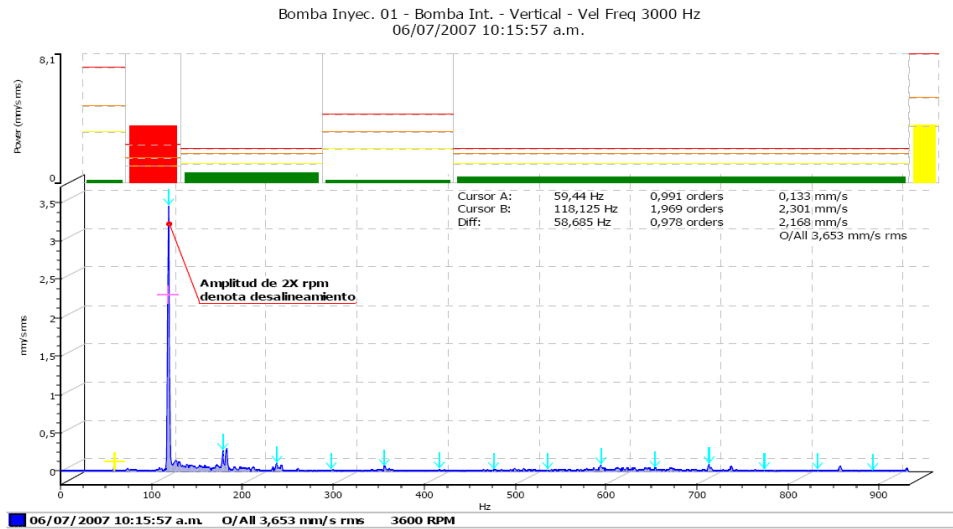
- Realizar alineación de la unidad con equipo láser.
- Realizar verificación del balanceo de las fases del motor.
- Programar una prueba de Medición de Índice de Polaridad y Nivel de Aislamiento, para conocer el estado actual del rotor y estator.
- Mantener en observación y control mediante seguimiento CBM.

Figura 27. Espectro capturado, motor configuración bomba 1.



Fuente: Informe CBM, SUPPLY CHAIN SERVICES Ltda.

Figura 28. Espectro capturado, bomba, configuración bomba 1.



Fuente: Informe CBM, SUPPLY CHAIN SERVICES Ltda.

Reporte monitoreo configuración bomba-motor 2:

Cuadro 23. Ficha reporte monitoreo configuración bomba-motor 2.

Tipo Reporte	Reporte Análisis de Vibraciones Equipo Rotativo		Consecutivo N°	SI-RT-FFT-008
Sitio	Bucaramanga	Lugar:	Estación Cumbre AMB	
Tag Maquina	N/A			
Equipo	Bomba Inyección Agua 02			
Condición	En funcionamiento al 100%		Equipo de Medición.	COMMTEST Vb3000
Fecha monitoreo	Julio 06, 2007		Fecha de Reporte	Julio 19, 2007
Horómetro	N/A		Orden de Trabajo	N/A

Fuente: Informe CBM, SUPPLY CHAIN SERVICES Ltda.

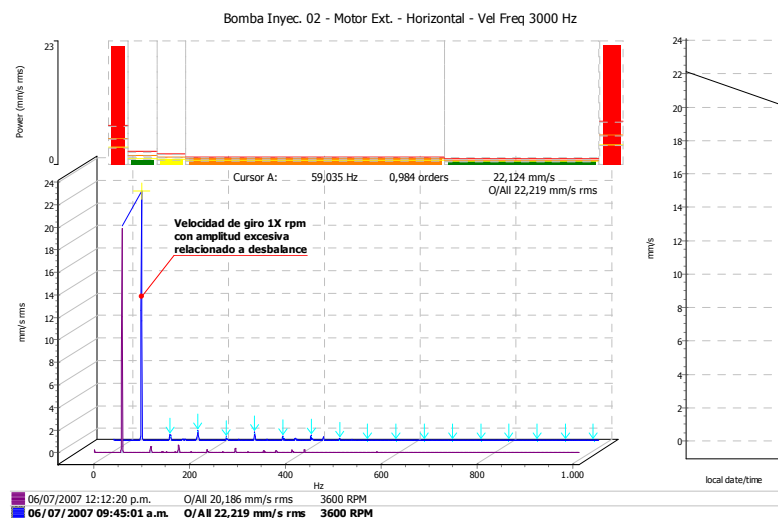
Resultados. Como se pudo observar en los espectros, se realizaron mediciones en la unidad en condiciones de operación normal en donde los niveles de vibración relacionados a desbalance de masas en el rotor del motor son excesivos, al realizar una nueva medición con la unidad operando en condiciones de carga (“hora pico”), el desbalance presente se incremento como resultado de su gravedad.

Eléctricamente la unidad presenta buenas condiciones, sin embargo es recomendable realizar revisión a través de pruebas especializadas para determinar el estado real. La bomba presenta buenas condiciones tanto en operación normal como en operación bajo carga, no se observa cavitación ni recirculación en la unidad. Los rodamientos presentan condiciones y parámetros aceptables.

Recomendaciones:

- Programar paro INMEDIATO de la unidad para realizar balanceo dinámico del rotor del motor y verificación del estado del acople.
- Realizar alineamiento láser una vez corregido el desbalance de la unidad.
- Programar una prueba de Medición de Índice de Polaridad y Nivel de Aislamiento, para conocer el estado actual del rotor y estator.
- Mantener en observación y control mediante seguimiento CBM.

Figura 29. Espectro capturado, motor, configuración bomba 2.



Fuente: Informe CBM, SUPPLY CHAIN SERVICES Ltda.

Reporte monitoreo de vibraciones configuración bomba-motor 3:

Cuadro 24. Ficha reporte monitoreo configuración bomba-motor 3.

Tipo Reporte	Reporte Análisis de Vibraciones Equipo Rotativo		Consecutivo N°	SI-RT-FFT-009
Sitio	Bucaramanga	Lugar:	Estación Cumbre AMB	
Tag Maquina	N/A			
Equipo	Bomba Inyección Agua 03			
Condición	En funcionamiento al 100%		Equipo de Medición.	COMMTTEST Vb3000
Fecha monitoreo	Julio 06, 2007		Fecha de Reporte	Julio 19, 2007
Horómetro	N/A		Orden de Trabajo	N/A

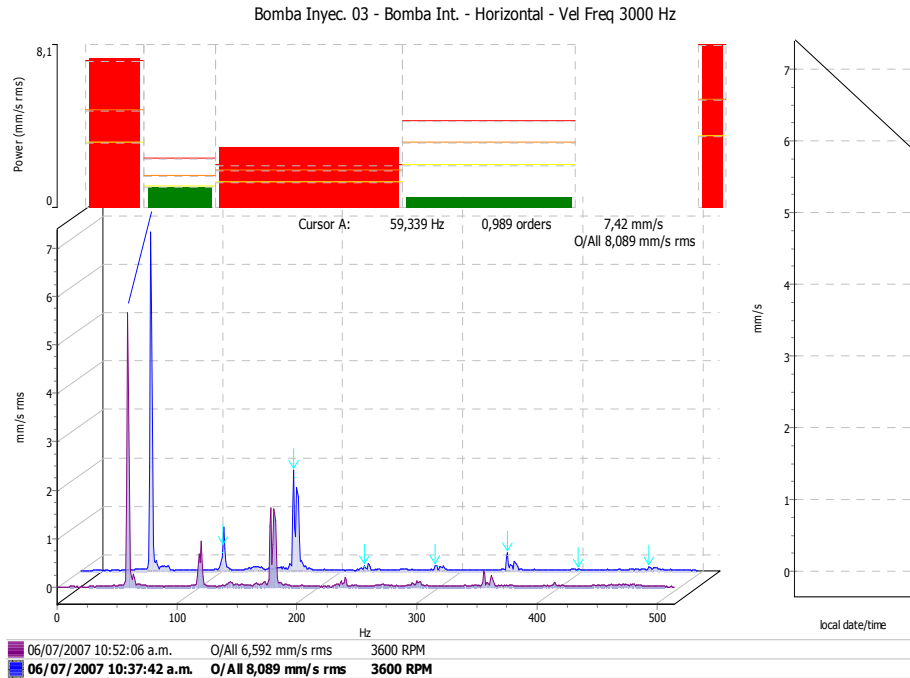
Fuente: Informe CBM, SUPPLY CHAIN SERVICES Ltda.

Resultados. De acuerdo al análisis realizado a los espectros de vibración capturados durante las pruebas realizadas con carga y sin carga (gráficas azul y morado, respectivamente, figura 30) en la unidad, se puede observar que las condiciones del motor son aceptables, los niveles y parámetros encontrados con normales. Eléctricamente el motor presenta rangos dentro de la norma.

La bomba presenta condiciones de desbalance por deficiencias en el impeler posiblemente por roces o deterioro interno lo que genera incremento de vibración.

Las condiciones de desbalance se mantienen estables para ambas pruebas realizadas por lo que es recomendable verificar el estado interno de la bomba para descartar problemas más serios que puedan generar una parada de la unidad inesperadamente.

Figura 30. Espectro capturado, bomba, configuración bomba 3.



Fuente: Informe CBM, SUPPLY CHAIN SERVICES Ltda.

Recomendaciones:

- Programar paro de la unidad para realizar revisión del estado interno de la bomba y verificar roces, desgastes o marcas de cavitación que pueden estar desbalanceando la bomba.
- Realizar alineamiento láser una vez corregido el desbalance de la unidad.
- Programar una prueba de Medición de Índice de Polaridad y Nivel de Aislamiento, para conocer el estado actual del rotor y estator.
- Mantener en observación y control mediante seguimiento CBM.

Reporte monitoreo vibraciones configuración bomba-motor 4

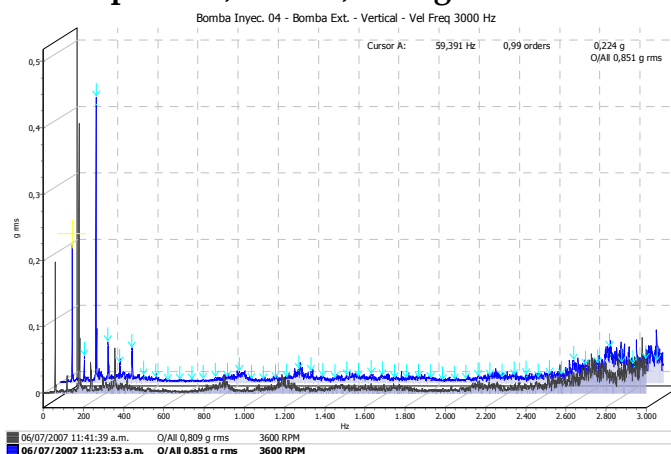
Cuadro 25. Ficha reporte monitoreo configuración bomba-motor 4

Tipo Reporte	Reporte Análisis de Vibraciones Equipo Rotativo		Consecutivo N°	SI-RT-FFT-010
Sitio	Bucaramanga	Lugar:	Estación Cumbre AMB	
Tag Maquina	N/A			
Equipo	Bomba Inyección Agua 04			
Condición	En funcionamiento al 100%		Equipo de Medición.	COMMTTEST Vb3000
Fecha monitoreo	Julio 06, 2007		Fecha de Reporte	Julio 19, 2007
Horómetro	N/A		Orden de Trabajo	N/A

Fuente: Informe CBM, SUPPLY CHAIN SERVICES Ltda.

Resultados. Como se puede observar en las mediciones capturadas, la unidad presenta varias condiciones en la operación dependiendo de la carga que se presente. Los niveles de vibración muestran variaciones significativas y amplitudes elevadas relacionadas a deficiencias en la bomba (impeler), posiblemente por roce o desgaste del mismo así como por cavitación moderada. Los rodamientos presentan deficiencia de lubricación por lo que es recomendable verificar la cantidad y el tipo de grasa que se está utilizando. El motor presenta buenas condiciones de operación y los niveles de vibración observados y registrados son buenos, las condiciones eléctricas están normales, sin embargo es recomendable programar las pruebas eléctricas.

Figura 31. Espectro capturado, bomba, configuración bomba 4.



Fuente: Informe CBM, SUPPLY CHAIN SERVICES Ltda.

Recomendaciones:

- Programar paro de la unidad para realizar revisión del estado interno de la bomba y verificar roces, desgastes o marcas de cavitación que pueden estar desbalanceando la bomba.
- Realizar alineamiento láser una vez corregido el desbalance de la unidad.
- Programar una prueba de Medición de Índice de Polaridad y Nivel de Aislamiento, para conocer el estado actual del rotor y estator.
- Mantener en observación y control mediante seguimiento CBM.

2.4 CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos por el diagnóstico CBM indican que se requiere programar una parada global de la estación de bombeo LA CUMBRE, con el fin de realizar tareas de mantenimiento. Las tareas de mantenimiento consisten en una inspección visual de todas las válvulas de esta estación (de succión, descarga y cheques), con el objeto de dar valoración acerca reparar las válvulas afectadas o reemplazarlas. Debe aprovecharse la parada para hacer mediciones de índices de polaridad y niveles de aislamiento en todos los motores eléctricos de la estación, un URGENTE balanceo dinámico del motor que impulsa la bomba 2. Con respecto a las bombas, es necesaria la inspección visual, aunque es evidente la necesidad de reconstruirlas, sobre todo las bombas 3 y 4, las bombas 1 y 2 tienen problemas de alineación.

Los resultados del diagnóstico también reflejan la necesidad de establecer políticas de mantenimiento sobre estos equipos. Se hace necesario que el acueducto metropolitano de Bucaramanga realice este tipo de diagnósticos de manera periódica en un futuro.

3. EVALUACIÓN DE LAS POLÍTICAS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

3.1 OPERACIÓN

El sistema de bombeo LA CUMBRE cuenta con una estación altamente tecnificada, cuyas políticas de operación son aceptables en cuanto al control de encendido-apagado de las bombas, instrumentación y visualización de las variables medidas. Sin embargo existen algunas objeciones, en lo que se refiere a las condiciones de operación de las bombas, la muy discutida configuración en paralelo, la baja eficiencia de los equipos mencionada en anteriores informes, y otras, serán presentadas a continuación en esta sección del informe.

3.1.1 Condiciones de succión. Al desarrollarse las curvas de desempeño para cada bomba estudiada, se observó, que una de las variables intermedias, la velocidad de flujo, tenía valores muy altos, dichos valores duplican los máximos invocados por la norma colombiana referente.

Las bombas Patterson bombean en promedio un caudal de 55 litros por segundo, dicho caudal pasa a través de una tubería tipo cédula 40, con un diámetro nominal de 6 pulgadas (diámetro interno: 6.065 pulgadas), eso quiere decir que el flujo viaja a través de la tubería de succión a una velocidad aproximada de **2.95 m/s**.

Cuadro 26. Velocidad máxima aceptable en la tubería de succión, según el diámetro.

Diámetro de la tubería de succión (mm)	Velocidad máxima (m/s)
50	0.75
75	1.00
100	1.30
150	1.45
200	1.60
250	1.60
300	1.70
Mayor que 400	1.80

Fuente: Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico RAS 2000.

Como pudo observarse en el cuadro anterior, la velocidad de flujo en la succión excede en demasía los límites propuestos por la reglamentación. Y teniendo en cuenta además, que en cada tubería de succión existe un conjunto de dos válvulas tipo compuerta (ver figura 18), implicando algún tipo de restricción u obstáculo en el flujo de agua, que puede ser inconveniente para conservar un patrón adecuado de flujo en la succión de las bombas para garantizar el buen desempeño de las mismas.

Un diámetro de tubería más pequeño que el recomendado también se traduce en riesgo de cavitación, y en un mayor consumo de energía debido a que las bombas deben cumplir con los requerimientos de carga demandada, partiendo de una presión de succión más baja que la de diseño. Conservándose la carga de descarga, y haciéndose más pequeña la carga de succión, tenemos un aumento en la carga total, y por consiguiente, un mayor consumo de potencia por parte de los equipos implicados.

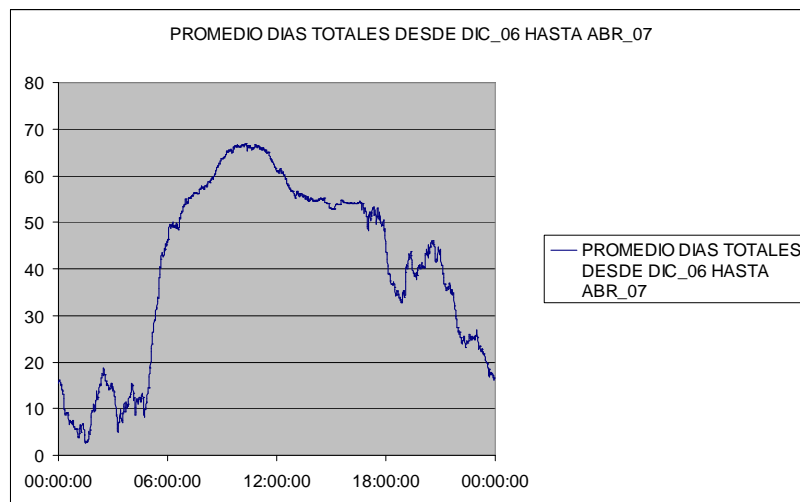
Recomendación: realizar una valoración económica, donde se sustente mantener el diámetro de succión actual o cambiarlo por otro de mayor

tamaño, teniendo en cuenta todas modificaciones de infraestructura pertinentes. Si se realiza el proyecto de renovación de la estación, es necesario ser consistentes con la reglamentación en este aspecto.

3.1.2 Configuración en paralelo y consumo de energía. Como se demostró en el informe primero, la operación de bombeo bajo la configuración en paralelo es la más costosa, debe bombearse en esta condición la menor cantidad de tiempo posible.

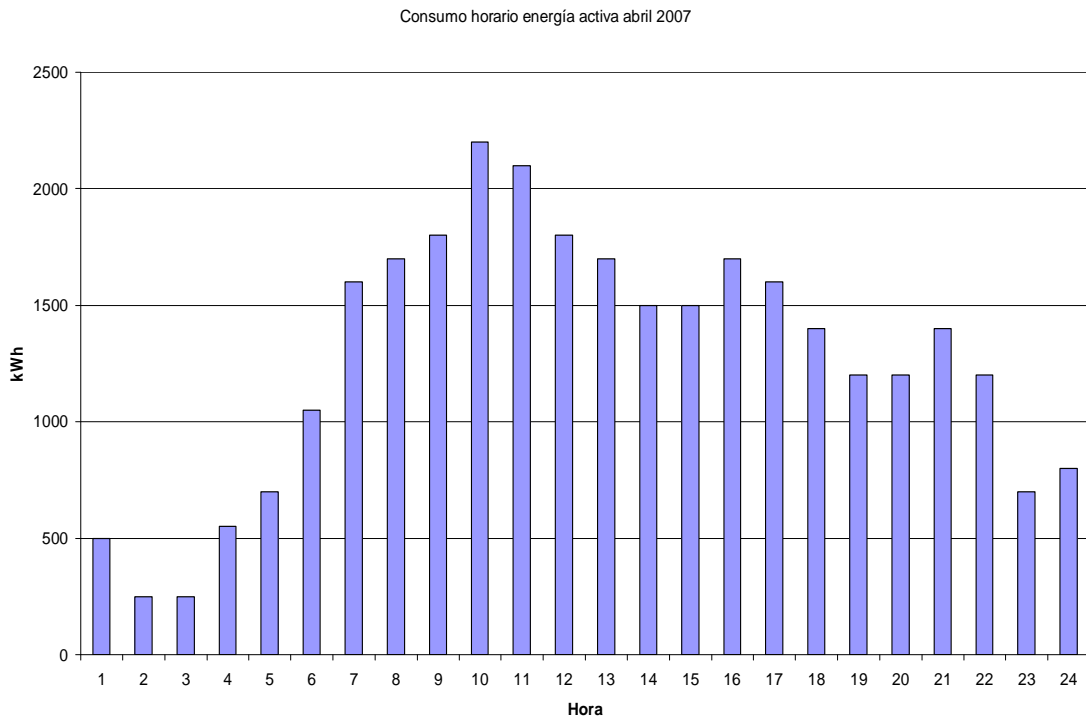
Como se ha dicho anteriormente, cuando la demanda del sistema es alta, una segunda bomba entra en operación para suplir, junto con la bomba mayor, las necesidades requeridas por el sistema. Las horas de demanda más alta coinciden con las horas más costosas de la mañana según la facturación eléctrica. En pocas palabras, el sistema de bombeo LA CUMBRE funciona de manera mas ineficiente cuando el costo de la energía eléctrica es el más alto de la mañana.

Figura 32. Promedio caudal bombeado diciembre 06-abril 07.



Fuente: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A. E.S.P

Figura 33. Consumo horario energía activa abril 2007.

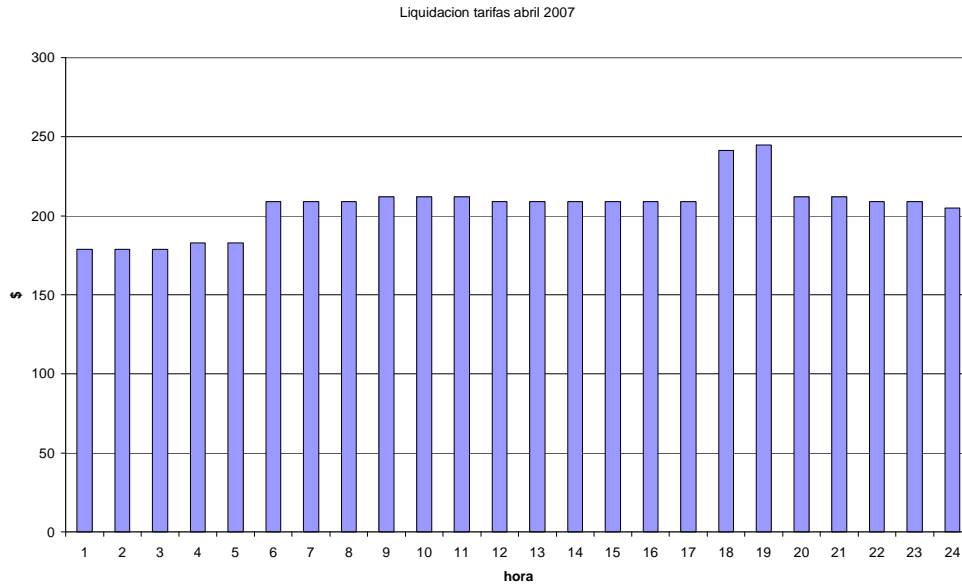


Fuente: Comercializadora Energética Nacional Colombiana S.A. E.S.P.

La figura 32 muestra el promedio de caudal bombeado por la estación LA CUMBRE desde diciembre de 2006 hasta abril de 2007, se observa en ella que el bombeo en paralelo ocurre con mayor frecuencia entre las 9 a.m. y la 1 p.m. dichas horas coinciden con las tarifas más altas según la facturación eléctrica (figura 34), por corresponder a horas pico de consumo de energía por la localidad (esta diferencia no es muy alta con respecto a la tarifa del resto de la mañana, pero puede ser apreciable a largo plazo).

También en la figura 34 puede notarse el elevado costo de la energía en la jornada de 6 a 8 p.m.

Figura 34. Liquidación tarifas abril 2007.



Fuente: Comercializadora Energética Nacional Colombiana S.A. E.S.P.

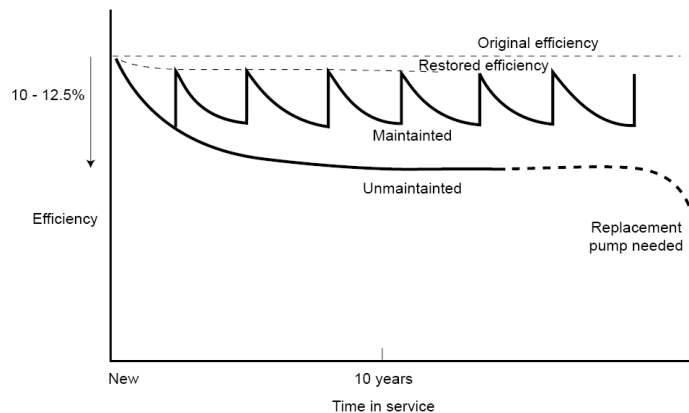
Recomendación: El acueducto metropolitano de Bucaramanga tiene registros de caudal bombeado, pero no cuenta con información suficiente referente al caudal demandado por la localidad LA CUMBRE. En este sistema de bombeo, el caudal bombeado no es igual al caudal demandado por los usuarios. Este sistema cuenta con un tanque elevado (tanque LA CUMBRE), que cumple con dos funciones básicas, exigir al sistema de bombeo una cabeza mínima requerida, y servir como recurso de emergencia cuando fallen los equipos de bombeo. Sin embargo, otra de sus funciones consiste en ser sensor del grado de demanda del sistema. El control de apagado y encendido de las bombas está sustentado en el nivel del tanque LA CUMBRE. Esto tiene la desventaja de que al ocurrir una alta demanda, el control no reaccionará de manera inmediata, el sistema debe esperar que el tanque LA CUMBRE alcance niveles bajos para que la bomba de refuerzo entre en acción.

Es importante que el acueducto recopile información acerca el caudal consumido por parte de los usuarios. Con estos datos la empresa tendrá los recursos suficientes para plantear una política de operación, donde los equipos funcionen eficientemente consumiendo energía de la forma más económicamente posible.

3.2 MANTENIMIENTO

En la actualidad, las políticas de mantenimiento de la estación de bombeo LA CUMBRE son insuficientes, si se trata de conservar los equipos bajo altos niveles de eficiencia. Esto ha podido observarse en la evaluación de desempeño realizada (informe primero), la cual muestra una caída de alrededor de 25 puntos de eficiencia en comparación con la condición óptima posible. Las acciones de mantenimiento se reducen a lubricación de rodamientos, apriete de prensaestopas y limpieza. La estación de bombeo LA CUMBRE requiere de una política de mantenimiento clara que permita su buen desempeño durante una larga vida útil.

Figura 35. Evolución de la eficiencia con respecto al mantenimiento y vida útil de las bombas.



Fuente: Energy Efficiency Enquiries Bureau (England)

Tal como se ve en la figura 35, una bomba a la cual no se le han hecho labores de mantenimiento adecuadas a lo largo de su vida útil, exige reemplazo debido a falla o a causa de una muy baja eficiencia.

3.2.1 Costos actuales de mantenimiento. Como se mencionó anteriormente, las labores de mantenimiento para la estación de bombeo LA CUMBRE se resumen simplemente en lubricación, limpieza, apriete o cambio de empaquetaduras, y cambio de rodamientos.

Las bombas son equipos que muy rara vez fallan si se mantienen en una constante y adecuada operación, sin embargo su eficiencia se decreta de manera silenciosa a causa del desgaste interno con el paso del tiempo.

El costo y labores de mantenimiento para esta estación son mínimos, a costa de una disminución brusca de la eficiencia a lo largo de sus 15 años de servicio. Los elementos internos de la bomba (de cuyo estado depende en gran medida la eficiencia de la bomba) han sido descuidados, y es posible que ya hayan sufrido deterioro las piezas internas de valor como son la carcasa, el impulsor y el eje.

Los costos de mantenimiento son bajos en comparación con los de energía, pero esto no implica que las labores de manutención deban ser descuidadas. Una labor sencilla de mantenimiento, que implique cambio de elementos internos de desgaste, cambio de empaquetaduras, cambio de rodamientos tanto de la bomba como del motor, cuesta alrededor de 2.5 millones de pesos por bomba cada año. Realizar una labor de mantenimiento actualmente con el fin de restablecer (posiblemente) la eficiencia del sistema implica asumir los

costos de una reconstrucción completa para cada bomba, cuyos valores si son apreciables.

3.2.2 Reconstrucción. Las acciones de reconstrucción corresponden al reemplazo de las partes desgastadas, y en muchos casos a su recuperación, dependiendo del tamaño y costo de las mismas. La reconstrucción de las bombas es una opción de alta consideración, sin embargo, el gigantesco transcurso de tiempo sin reconstruirlas, el elevado costo de un impulsor nuevo en caso de que éste se encuentre desgastado en sus bordes y aspas a causa de posibles contactos con las partes fijas de la bomba, y la poca información que se tiene acerca los repuestos de varios equipos cuyas referencias están descontinuadas, hacen que exista la posibilidad de que las labores de reconstrucción no entreguen resultados favorables, y sea preferible reemplazarlas por equipos nuevos.

Recomendación. Debe hacerse una inspección completa de las bombas de la estación, en dicha parada se debe describir el estado de cada elemento interno de la bombas, como lo son los sellos, anillos de desgaste, ejes y camisas, impulsores y carcasas. Previo a esta parada, debe saberse si existe la posibilidad de conseguir los repuestos requeridos a través del fabricante, si este no es el caso, la empresa debe recopilar la información suficiente, y encargar a personal idóneo la fabricación de dichas piezas.

Una vez hecha la inspección, se establecen, según el daño, cuales son los accesorios que requieren reconstrucción y cuales requieren reemplazo, se proyectan las labores de reconstrucción para las piezas que lo requieran, y se solicitan o se fabrican las piezas de reemplazo, según la disponibilidad del fabricante. Es importante conocer el costo de estas labores, ya que si dichas

labores y accesorios superan la mitad del costo inicial de un equipo nuevo, es preferible comprar bombas nuevas.

Costos de reconstrucción. Aunque no se encontró información concreta con respecto a los repuestos acordes con la referencia de las bombas grandes (Patterson), el fabricante, a través de su distribuidor autorizado en Colombia, nos hizo llegar una cotización de la reconstrucción completa del rotor para una bomba de características parecidas. En el cuadro de cotización se presenta a continuación.

Cuadro 27. Lista costo de reconstrucción bombas Patterson.

ITEM.	PARTE NUMERO	DESCRIPCION	CAN.	VALOR UNIT.	VALOR TOTAL
1	N.A	<i>ROTOR ASSEMBLY (incluye)</i>	1	\$24,796,200	\$ 24,796,200
		<i>Shaft, Impeller, Deflector</i>			
		<i>Casing ring, Casing gasket</i>			
		<i>Lantern ring, Shoulder ring</i>			
		<i>Shaft sleeve nut, Gland</i>			
		<i>Fitting, Shaft sleeve o-ring</i>			
		<i>Packing, Impeller key</i>			
		<i>Inboard bearing</i>			
		<i>Outboard bearing</i>			
		<i>Bearing end cover</i>			
		<i>Stuffing box o-ring</i>			
SUBTOTAL	\$ 24,796,200				
IVA	\$ 3,967,392				
NETO	\$ 28,763,592				

Fuente: Ignacio Gómez IHM S.A.

Teniendo en cuenta que el costo de un equipo nuevo con la misma referencia tiene un valor aproximado a 35 millones de pesos, se concluye que puede ser preferible para el acueducto adquirir un nuevo equipo, en lugar de cometer el

riesgo de implementar repuestos de una referencia parecida esperando que la reconstrucción de buenos resultados.

3.2.3 Monitoreo de desempeño. La mayoría de los diseñadores de bombas y los especialistas consideran que una bomba centrífuga no necesita abrirse para inspeccionarla, concuerdan en que existen algunas evidencias positivas que denotan el estado de la bomba, como la declinación del funcionamiento de la bomba, ruido y temperatura excesiva en los rodamientos. La instrumentación apropiada es de primordial importancia para la operación satisfactoria y larga vida del equipo de bombeo centrífugo. El equipo para determinar las capacidades y presiones de las bombas es tan importante como cualquier otra herramienta de mantenimiento y siempre deberá tenerse a mano.

Se debe establecer un programa para pruebas frecuentes de la unidad de bombeo y los resultados de estas pruebas se comparan con el funcionamiento de la bomba en su condición inicial. Cualquier declinación repentina en el funcionamiento se puede advertir inmediatamente. Esta comparación de funcionamiento, y no el transcurso de un periodo de tiempo fijo, deberá ser la base para determinar si es o no suficiente el desgaste interno que ha ocurrido para que se requiera una reconstrucción completa. El correr una prueba completa es menos costoso que abrir la bomba para inspección y no se requiere sacar de servicio la unidad.

Recomendación. El diagnóstico de desempeño presentado en el informe primero nos muestra todas las pautas a seguir para conocer el desempeño actual de una bomba. No es necesario realizar trazos de la curva de desempeño, pero si se requiere un permanente monitoreo de las condiciones

de operación (capacidad, carga, potencia y eficiencia total) para determinar el grado de escurrimiento de la bomba monitoreada, una vez determinado el escurrimiento solo se requiere hacer un simple análisis económico que me permita saber si es viable o no reconstruir (para entender adecuadamente esta política, es necesario que el lector haya leído y comprendido en su totalidad el informe primero).

El SCADA del acueducto metropolitano de Bucaramanga puede tomar y registrar los datos de desempeño contando con la instrumentación adecuada, además de los instrumentos ya instalados (vatímetro, medidor de caudal) se requieren sensores de presión tanto en la succión como en la descarga de cada bomba. En la medida de lo posible, también es requerido ubicar sensores de temperatura en las cajas de los rodamientos. Sería responsabilidad del departamento de mantenimiento interpretar la información suministrada por el SCADA y realizar las acciones debidas de manera oportuna.

3.2.4 CBM, mantenimiento predictivo. Además de una permanente evaluación de desempeño de las bombas, deben hacerse monitoreos de la condición de los equipos de forma periódica. Como se observó en el informe segundo, un diagnóstico CBM me permite conocer el estado de los equipos, y las acciones pertinentes a realizar, sin la necesidad de hacer una parada y hacer tediosas inspecciones, pero lo mas importante, esta técnica del mantenimiento predictivo me permite conocer las posibilidades de falla de manera temprana, así las acciones de reparación serán eficaces, eliminando imprevistos y paradas costosas.

Recomendación. Una de las desventajas de realizar este tipo de diagnóstico es su alto costo, esto se debe a que es desempeñado por personal altamente

calificado y los equipos de monitoreo tienen costos elevados. El acueducto debe hacer una valoración económica para decidir entre contratar una empresa encargada para este fin, adquirir los equipos y capacitar al personal encargado de dichas operaciones, o sencillamente no realizar este tipo de procedimientos. Es necesario realizar este tipo de diagnósticos por lo menos una vez al año.

El análisis por ultrasonido puede realizarse una vez al año con el objeto de examinar las válvulas y cheques, junto con el sistema eléctrico de la estación. El análisis de vibraciones es necesario realizarlo cada tres meses, esto con el fin de hacerle seguimiento a los rodamientos, detección de problemas de alineación y desbalance rotodinámico, inclusive problemas electromecánicos involucrados con las máquinas eléctricas.

4. ANÁLISIS DE COSTO DE CICLO DE VIDA

4.1 INTRODUCCIÓN

El costo de ciclo de vida de cualquier equipo o sistema es el costo total de tiempo vital correspondiente a la compra, instalación, operación, mantenimiento, y desecho de dicho equipo.

Cuando el costo de ciclo de vida es usado para comparar posibles diseños o revisar alternativas, su cálculo proporciona la solución más efectiva con respecto al costo, dentro de los límites de los datos disponibles.

El costo de la energía consumida es, para un sistema de bombeo que opera más de 2000 horas al año, el elemento de mayor importancia durante la vida útil del sistema. El sistema de bombeo LA CUMBRE funciona 17 horas al día, es decir, alrededor de 6000 horas cada año. Esto hace que las estimaciones de consumo de energía, se conviertan en el elemento decisivo para el desarrollo del análisis de costo de ciclo de vida frente a otros costos concurrenciosos durante su vida útil, como lo son los de mantenimiento y desmantelamiento.

Los costos estimados para los varios elementos que componen el costo de ciclo de vida total necesitan ser agregados para permitir una comparación de los diseños que están siendo considerados. Una manera práctica de recopilarlos y procesarlos consiste en tabularlos, donde se identificaría cada ítem junto con el valor correspondiente.

Los elementos que componen el costo de ciclo de vida son los siguientes:

$$LCC = C_{ic} + C_{in} + C_e + C_o + C_m + C_p + C_{amb} + C_d$$

Donde:

- LCC : Life Cycle Cost, costo de ciclo de vida.
- C_{ic} : Costo inicial.
- C_{in} : Costo instalación.
- C_e : Costo de energía.
- C_o : Costo de operación (costo de supervisión)
- C_m : Costo de mantenimiento y reparación.
- C_p : Costo de paradas (perdidas de producción)
- C_{amb} : Costos ambientales.
- C_d : Costo de desmantelamiento y desecho.

Factores financieros deben ser considerados en el desarrollo del LCC. Estos incluyen:

- Precio actual de la energía.
- Incremento anual del precio de la energía durante la vida de las bombas.
- Taza de descuento.
- Taza de interés.
- Expectativa de vida de los equipos.

No es necesario que el usuario deba calcular o determinar todos los elementos del LCC, debe decidir, cuales entre todos tienen importancia predominante en el costo de ciclo de vida.

4.2 REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA DE BOMBEO LA CUMBRE.

Los requerimientos se refieren a las necesidades de carga y caudal que el sistema de bombeo LA CUMBRE debe solucionar.

Los requerimientos de carga y caudal son los siguientes:

- Demanda media: 60 litros por segundo @ 46 metros, durante 16 horas.
- Demanda alta: 85 litros por segundo @ 57 metros, durante una hora.

Los requerimientos presentados son producto del monitoreo de la operación del sistema de bombeo LA CUMBRE, traducidos en datos recopilados de caudal bombeado y nivel del tanque LA CUMBRE. Debe tenerse en cuenta que dicha condición obedece a los requerimientos actuales del sistema de bombeo LA CUMBRE, por lo tanto fue necesario realizar un análisis económico adicional donde la demanda alta era exigida por mayor cantidad de tiempo a una hora.

4.3 CONDICIONES

Además de los requerimientos de caudal anteriormente establecidos, el análisis de costo de ciclo de vida se expone a las siguientes condiciones:

- El tiempo de proyecto se establece para 20 años (vida útil de las bombas).
- El estudio no contemplará cambios en la tubería principal.

4.4 ALTERNATIVAS ESCOGIDAS PARA EL ANÁLISIS DE COSTO DE CICLO DE VIDA.

4.4.1 Bomba 60 LPS + Bomba 85 LPS. La primera alternativa obedece al uso de dos bombas únicamente, donde la bomba de 60 LPS (mas su repuesto) suplirá la demanda media de la localidad, mientras la bomba de 85 LPS operará cuando la demanda aumente. Las bombas mencionadas operarán de manera individual, es decir, no funcionarán en paralelo, como lo hace en la actualidad el sistema de bombeo LA CUMBRE.

Con respecto a los motores que impulsarán las bombas, se presentarán dos opciones; una donde estos motores son de eficiencia ordinaria, y la otra, donde los motores utilizados son de alta eficiencia.

A continuación se presentan las características de desempeño de cada equipo.

Bomba-Motor 60 LPS

La bomba de 60 LPS cuenta con las siguientes características:

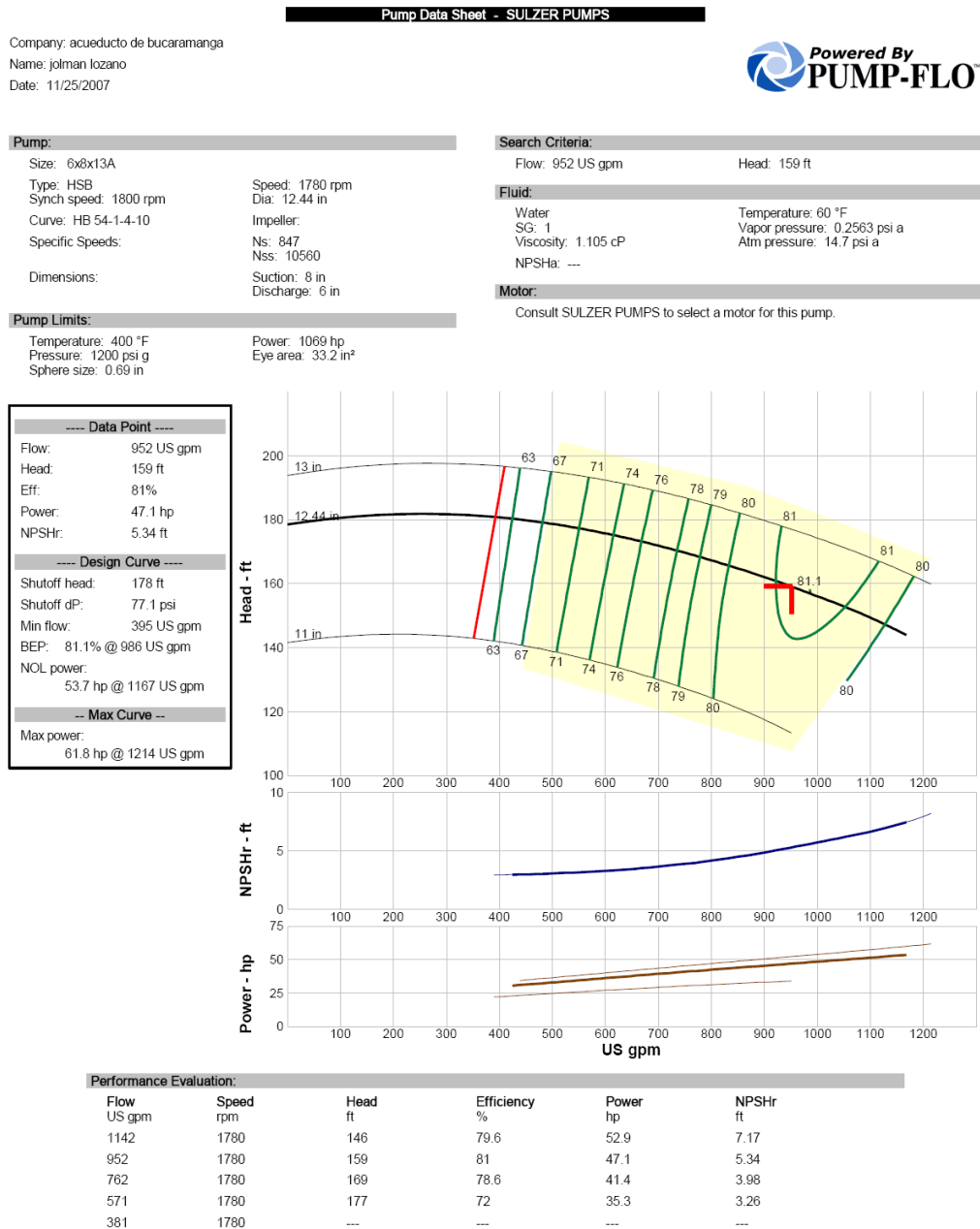
- Punto de operación: 60 litros por segundo @ 46 metros de carga total.
- Eficiencia de la bomba en el punto de operación: 81%.
- Potencia de freno requerida por la bomba: 47.1 hp.
- RPM de giro: 1780.

El motor eléctrico cuenta con las siguientes características:

- Marca de fabricante: WEG.
- Potencia de placa: 60 hp.

- RPM asíncrona: 1780.
- Eficiencia: 92.5% (eficiencia estándar); 93.7% (alta eficiencia).
- Voltaje: 440 Volts.

Figura 36. Hoja de datos bomba 60 LPS



Selected from catalog: Sulzer Pumps MDL-5.60 Vers: 6.1

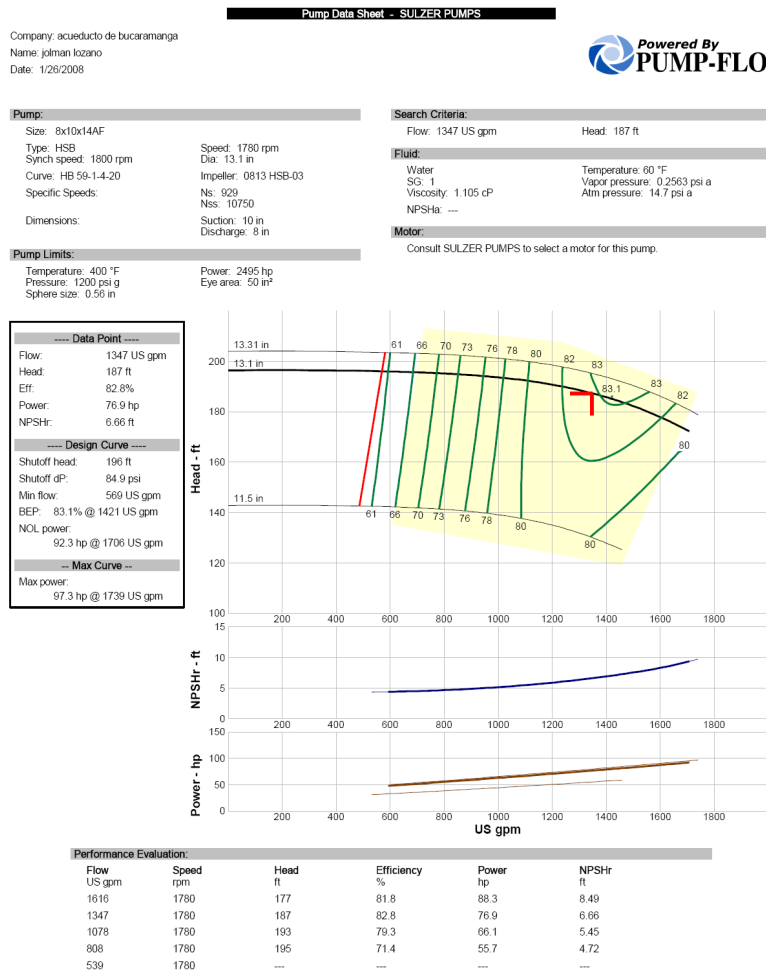
Fuente: PUMP-FLO software.

Bomba-Motor 85 LPS

La bomba de 85 LPS cuenta con las siguientes características.

- Punto de operación: 85 LPS a 57 metros de carga total.
- Eficiencia de la bomba en el pto de operación: 82.8%.
- Potencia al freno requerida: 77 hp.
- RPM : 1780

Figura 37. Hoja de datos bomba 85 LPS



Selected from catalog: Sulzer Pumps MDL-5.60 Vers: 6.1

Fuente: PUMP-FLO software

El motor eléctrico cuenta con las siguientes especificaciones:

- Marca del fabricante: WEG.
- Potencia de placa: 100 hp.
- RPM asíncrona: 1780.
- Voltaje: 440 Volts.
- Eficiencia: 93.5% (eficiencia estándar); 94% (alta eficiencia).

Estimación de costos. Los costos iniciales que se presentan a continuación fueron conseguidos con base en cotizaciones y asesoría por parte de distribuidores y fabricantes de bombas centrífugas y motores eléctricos (SULZER pumps, para las bombas; WEG motors, para los motores eléctricos).

La diferencia de costos iniciales entre un motor de alta eficiencia y otro de eficiencia estándar, radica en que el motor de alta eficiencia es un 30% más costoso que un motor de eficiencia estándar. Esto debe considerarse en el análisis de costo de ciclo de vida.

Cuadro 28. Costo inicial equipos propuesta uno.

Equipo	Número equipos	Costo unitario \$
Bomba 60 LPS	2	58'700.000
Bomba 85 LPS	1	70'200.000
Motor 60 hp. Ef Estándar	2	4'200.000
Motor 100 hp. Ef Estándar	1	6'680.000
Motor 60 hp. Alta Ef	2	6'000.000
Motor 100 hp. Alta Ef	1	9'540.000

Costos de energía. Como primera medida, determinamos la energía específica E_s para cada alternativa.

Cuadro 29. Resultados energía específica alternativa 1

Configuración	Caudal (LPS)	Potencia al freno bomba (hp)	Eficiencia motor	Potencia consumida (kW)	E_s (kWh/m ³)
Bomba 60 LPS + Motor ef estd	60	47,1	0,925	37,45	0,173
Bomba 60 LPS + Motor Alta ef	60	47,1	0,937	36,97	0,171
Bomba 85 LPS + Motor ef estd	85	77	0,935	60,57	0,198
Bomba 85 LPS + Motor Alta ef	85	77	0,94	60,248	0,197

Cuadro 30. Costos energía configuraciones alternativa 1

Configuración	Potencia de consumo (kW)	Horas de operación (año)	Energía Consumida (kWh/año)	Costo energía/año (\$)
Bomba 60 + Motor ef estd	37,45	5.760	215.712	45'299.520
Bomba 60 + Motor Alta ef	36,97	5.760	212.947	44'718.912
Bomba 85 + Motor ef estd	60,57	365	22.108	4'642.690
Bomba 85 + Motor Alta ef	60,25	365	21.991	4'618.162

El cuadro presentado anteriormente muestra el costo de energía, donde la alta demanda ocurre durante una hora. Sin embargo, como la expectativa del proyecto tiene veinte años, es posible que con el paso del tiempo, la bomba proyectada para el alto consumo deba mantenerse encendida por un lapso mayor de tiempo, esto debe considerarse.

4.4.2 Bomba 85 LPS + Variador de frecuencia. Esta alternativa cuenta con un solo equipo de bombeo (mas su repuesto), dicha bomba es similar a la presentada en la primera propuesta para suplir las necesidades de la alta demanda; sin embargo, esta configuración viene acompañada de un variador de frecuencia, que permitirá reducir las rpm de la bomba con el fin de disminuir su capacidad, supliendo así las necesidades de la demanda media.

Sin embargo, el uso de un variador de frecuencia requiere de motores especiales para esta aplicación (Inverter Duty, ventilación forzada), el motor utilizado será de alta eficiencia.

Para conocer las condiciones de operación de la bomba con el uso del variador de frecuencia se hizo empleo de la herramienta software de modelación para sistemas de bombeo PSIM, ella contiene entre sus diversas aplicaciones, la opción de implementar un variador de frecuencia y conocer su comportamiento con respecto al sistema.

La bomba en uso, es idéntica a la presentada en la primera alternativa, si desea ver las especificaciones, tome nota de la figura 37.

Las características del motor son las siguientes:

- Marca de fabricante: WEG motors.
- Potencia: 100 hp.
- Tipo de motor: Inverter Duty, ventilación forzada, alta eficiencia.
- RPM asíncrona: 1780.
- Voltaje: 440 Volts.

- Eficiencia: 94%.

Las características del variador siguen a continuación:

- Marca de fabricante: WEG motors.
- Potencia máxima: 100 hp.
- Variador de frecuencia con protección contra armónicos.
- Eficiencia: 97%.
- Voltaje: 440 Volts.

Estimación de costos.

Cuadro 31. Costo inicial equipos propuesta 2.

Equipo	Numero equipos	Costo unitario (\$)
Bomba 85 LPS	2	70'200.000
Motor Inv Duty	2	13'580.000
VFD	1	10'950.000

Cuadro 32. Resultados energía específica alternativa 2.

Configuración	Potencia al freno bomba (hp)	Eficiencia Motor	Eficiencia VFD	Potencia consumida (kW)	E_s (kWh/m ³)
Bomba @ 85 LPS	77	0,94	0,97	62,11	0,20
Bomba @ 60 LPS	50	0,94	0,97	40,33	0,186

Comparando los resultados obtenidos de energía específica presentados en este cuadro con los del cuadro 28, observamos que los valores de energía

específica correspondientes a la alternativa 2 son mayores con respecto a los mostrados en la alternativa 1, aunque no es considerable la diferencia. Una de las principales razones por la cual esto sucede se debe a que, al emplearse un variador de frecuencia, debe considerarse su consumo de energía, que se ve reflejado al introducir otra eficiencia en el sistema.

Cuadro 33. Resultados costo de energía alternativa 2

Configuración	Potencia de consumo (kW)	Horas de operación (año)	Energía Consumida (kWh/año)	Costo energía/año (\$)
Bomba @ 85 LPS	62,11	365	22.670	4'760.731
Bomba @ 60 LPS	40,33	5760	232.300	48'783.168

Ya presentadas cada alternativa con su respectiva estimación de costos iniciales y de energía, tenemos los suficientes argumentos para realizar un análisis de costo de ciclo de vida.

4.5 ANÁLISIS DE COSTO DE CICLO DE VIDA

Para un sistema de bombeo donde el líquido bombeado es agua potable bajo condiciones estables, y cuyo tiempo de operación supera las 2000 horas al año, el costo de energía se convierte en el costo de mayor atención si lo que se pretende es hacer una comparación de alternativas con respecto a la selección de equipos y configuraciones. Esto no significa que los demás costos carezcan de importancia, estos costos deben establecerse de manera precisa en un presupuesto, pero ese no es el objeto de este trabajo. El análisis de costo de ciclo de vida comienza por detectar cuales son los costos que harán la diferencia comparativa durante toda la vida del proyecto.

El análisis de costo de ciclo de vida que se presenta a continuación trata de resolver las siguientes cuestiones: ¿Será rentable asumir el costo de equipos nuevos, o es preferible pagar los costos de energía causados por los actuales equipos cuya eficiencia es baja? Y ¿Entre todas las alternativas descubiertas, cuál es la que menos cuesta a la empresa?

Este trabajo confrontará los costos iniciales de las nuevas alternativas y su respectivo consumo de energía, contra el consumo de energía alcanzado por los equipos que actualmente operan en la estación de bombeo LA CUMBRE.

Ignorar los costos de mantenimiento en este análisis no significa que no sea importantes tenerlos en cuenta, de hecho es importante que se implementen las políticas de mantenimiento antes señaladas, lo cierto es que dichos costos de mantenimiento son pequeños comparándolos con los costos de energía, y son similares para cada alternativa, por lo tanto, no corresponden a un costo que haga la diferencia.

Con respecto a los costos iniciales que corresponden a la compra de válvulas, accesorios, tubería y adecuación eléctrica tampoco se consideraron en este análisis, se ignoraron de manera previa. Si la diferencia entre los valores presentes de la alternativa más económica y la configuración actual resultara corta, se haría necesario calcular estos costos para tomar una decisión entre invertir o no hacerlo. Sin embargo se estima que dicho costo puede alcanzar como máximo hasta un tercio del costo de cada alternativa, dependiendo cual sea el caso estudiado.

El análisis de costo de ciclo de vida realizado presenta tres escenarios: el primer escenario, consiste en utilizar como base de los costos de energía los

requerimientos actuales del sistema de bombeo LA CUMBRE. El segundo escenario estima un aumento de consumo por parte de la población, lo que haría prolongar la operación de la bomba de 85 LPS hasta el triple de tiempo durante los veinte del proyecto. El último escenario, busca determinar el posible beneficio de aprovechar al máximo las oportunidades de ahorro de energía que ofrece el empleo de una estrategia de bombeo sustentada en una adecuada política de operación.

La estrategia de cálculo es simple, se calcula el valor presente de todos los gastos anuales realizados,-que en este caso específico corresponde al costo de energía- sumados al costo inicial de cada alternativa, y se comparan todos los valores presentes correspondientes a cada una de las mismas, la alternativa que mayor beneficio ofrece a la empresa es aquella que menos le cuesta, es decir, aquella cuyo costo de ciclo de vida sea el mas bajo.

Para efectos de cálculo de estos valores se consideró una tasa de interés del 9.5% y una inflación estimada del 5.5%.

4.5.1 Metodología de Cálculo. La estrategia de cálculo consiste en tomar los costos de energía anuales y calcular el valor presente de los mismos. Conociendo la tasa de interés (9.5%) y la de inflación estimada (5.5%) tenemos una tasa real de descuento del 4% (tasa de interés - inflación estimada).

A través de las cartas para el cálculo del valor presente consultadas en el texto *Pump Life Cycle Costs: A guide to LCC analysis for pumping systems* del Instituto Hidraulico, en la página 13 de este libro, para nuestra tasa real de descuento, obtenemos un factor de descuento (df) igual a 13.59. Este valor multiplicado

al valor anual de energía calculado nos ofrece como resultado el valor presente de los costos de energía.

Una vez calculado el valor presente de los costos de energía, sumamos a este valor los costos iniciales, y de esta forma tenemos un estimativo del costo de ciclo de vida de cada alternativa presentada.

4.5.2 Primer escenario.

Cuadro 34. Resultados primer escenario.

	Alternativa1 Alta eficiencia	Alternativa1 ef estándar	Alternativa 2 VFD	Configuración actual
Costo Inicial	209'140.000	204'480.000	178'510.000	0
Costo Energía 1^{er} año @ 85 LPS	4'618.162	4'642.690	4'760.731	7'224.000
Costo Energía 1^{er} año @ 60 LPS	44'718.912	45'299.520	48'783.168	71'131.620
LCC	879'630.835	883'194.633	906'171.587	1.064'852.876

De los resultados arrojados por el análisis de este primer escenario se puede concluir que es rentable el reemplazo de equipos para este sistema de bombeo. Entre todas las alternativas, la que mayor beneficio ofrece bajo esta consideración obedece a la alternativa 1, cuyos motores utilizados son los de alta eficiencia.

Es posible que bajo las condiciones actuales no sea necesario invertir en un motor de alta eficiencia cuando es requerida la máxima capacidad de 85 LPS, por lo tanto se incluye en la siguiente cuadro una comparación entre la alternativa 1 con alta eficiencia (a), con eficiencia estándar (b), y con eficiencia mixta (c).

Cuadro 35. Resultados propuestas alternativa 1.

	Alternativa 1 ^a	Alternativa 1b	Alternativa 1c
Costo Inicial	209'140.000	204'480.000	206'280.000
Costo Energía 1^{er} año @ 85 LPS	4'618.162	4'642.690	4'642.690
Costo Energía 1^{er} año @ 60 LPS	44'718.912	45'299.520	44'718.912
LCC	879'630.835	883'194.633	877'104.171

Como lo muestra en el cuadro, la mejor inversión que puede realizar el acueducto si las condiciones se mantienen consiste en la correspondiente a la alternativa 1c, que obedece a las siguientes especificaciones:

- Bomba centrífuga 60 LPS + bomba repuesto.
- Bomba centrífuga 85 LPS.
- Motor 100 hp, eficiencia estándar.
- Motor 60 hp, alta eficiencia + motor repuesto.

A continuación se presenta el análisis bajo un segundo escenario donde se considera un posible aumento de la operación de la bomba de 85 LPS.

4.5.3 Segundo escenario. Como se mencionó antes, este escenario considera un aumento en el consumo de la población a lo largo de los veinte años del proyecto, que se traduce en un incremento en las horas de operación de la bomba de 85 LPS. En este trabajo se supone triplicarse.

La estrategia de cálculo es similar a la expuesta para el primer escenario, a excepción de que los costos de energía ligados con la bomba de 85 LPS tendrán un incremento aritmético cada año, hasta llegar al triple el duodécimo año.

Cuadro 36. Resultados segundo escenario

	Alternativa 1a	Alternativa 1b	Alternativa 1c	Alternativa 2	Configuración actual
Costo Inicial	209'140.000	204'480.000	206'280.000	178'510.000	0
Costo Energía 1^{er} año @ 85 LPS	4'618.162	4'64.2690	4'642.690	4'760.731	7'224.000
Costo Energía 1^{er} año @ 60 LPS	44'718.912	45'299.520	44'718.912	48'783.168	71'131.620
LCC	977'567.117	981'651.075	975'560.612	1.007'131.297	1.218'050.555

El segundo escenario continúa a favor de la alternativa 1c, sin embargo, observe que la diferencia entre la alternativa antes mencionada y la 1ª se mantiene estrecha. Ambas bajo esta condición son una buena opción para el acueducto metropolitano de Bucaramanga.

4.5.4 Tercer escenario. Hasta ahora se ha presentado el análisis de costo de ciclo de vida sustentado en los requerimientos sugeridos, que son producto de las políticas de operación actuales. Como pudo observarse en el capítulo 3, la operación del sistema de bombeo LA CUMBRE depende del nivel de su tanque elevado, y los registros que se obtuvieron para obtener los requerimientos son resultado de la operación actual de la estación en estudio.

Una de las recomendaciones trazadas en el anterior capítulo consistía en sugerir que la empresa recopilara y procesara información referida al consumo (no al caudal bombeado) de la estación de bombeo, debido a que dicha información podría proporcionar alternativas más afines y oportunidades más importantes de ahorro de energía. Este escenario pretende presentar la magnitud de estas oportunidades si se trazan aspectos de la política de operación antes sugerida.

Podríamos partir del indicio que bombear a menos caudal resulta menos costoso para la estación, dicho indicio se sustenta en las energías específicas calculadas para los caudales de 60 y 85 litros por segundo.

Cuadro 37. Energía específica correspondiente al bombear a 60 y 85 litros por segundo.

Configuración	E_s (kWh/m³)
Bomba @ 60 LPS	0.171
Bomba @ 85 LPS	0.197

Esto es consistente debido que a medida que aumenta la velocidad de flujo en una tubería las pérdidas de energía se incrementan con una proporción al cuadrado.

Podría aprovecharse esta tendencia para bombear a menor caudal la misma cantidad de agua, aunque eso implique un mayor tiempo de operación, los ahorros de energía pueden ser considerables.

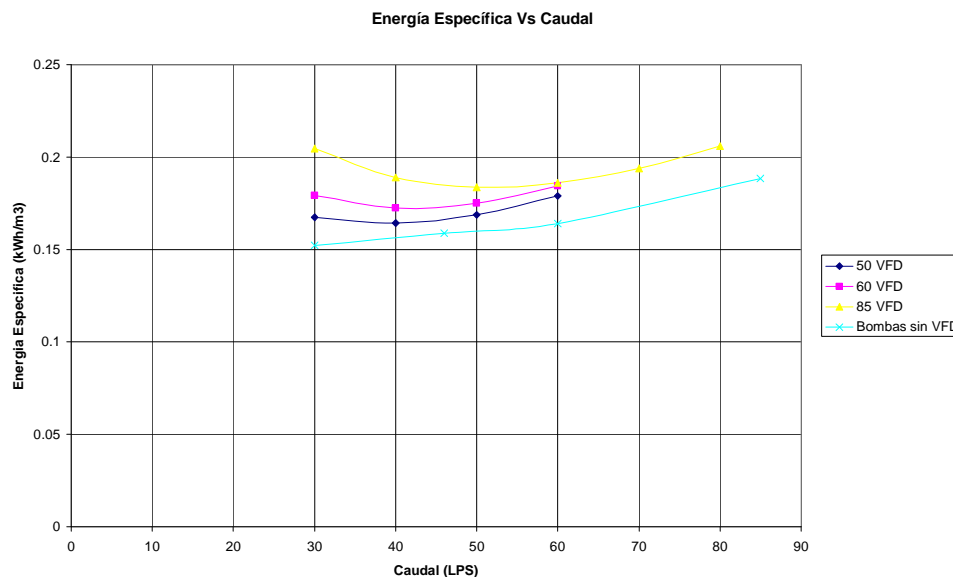
Por ejemplo, bombear 60 litros por segundo durante el lapso de 16 horas significa transportar alrededor de 3456 m³ al día, si la operación de bombeo se extendiera hasta 21 horas, el caudal promedio de servicio resultaría de 46 litros por segundo, con un índice energético más bajo, lo que representaría ahorro para el acueducto de Bucaramanga.

Una de las alternativas apropiadas para alcanzar este propósito consiste en el empleo de un variador de frecuencia, que en pocas palabras, es capaz de convertir una bomba con una capacidad especificada, en otra múltiple,

ofreciendo varias capacidades con un solo equipo. Otra de las alternativas favorables consiste en el empleo de múltiples bombas cuya operación depende del nivel de demanda de caudal por parte del usuario, esta alternativa es similar a la propuesta uno, con la diferencia de que podrían implementarse más de dos niveles de demanda.

Deben considerarse algunos aspectos a la hora de implementar un convertidor de frecuencia en una bomba, como el de la variación de la eficiencia de la bomba a medida que se cambian sus condiciones con el uso del convertidor. Debe seleccionarse la bomba con las cualidades adecuadas para acertar con los requerimientos sin afectar considerablemente la eficiencia del equipo. En el cuadro siguiente se presentan las curvas de energía específica correspondientes con cada alternativa de implementación del convertidor de frecuencia según el tamaño de la bomba, también se presenta la curva de energía específica resultante de utilizar la metodología de bombas múltiples de diferente capacidad.

Figura 38. Curvas de energía específica para las alternativas propuestas.



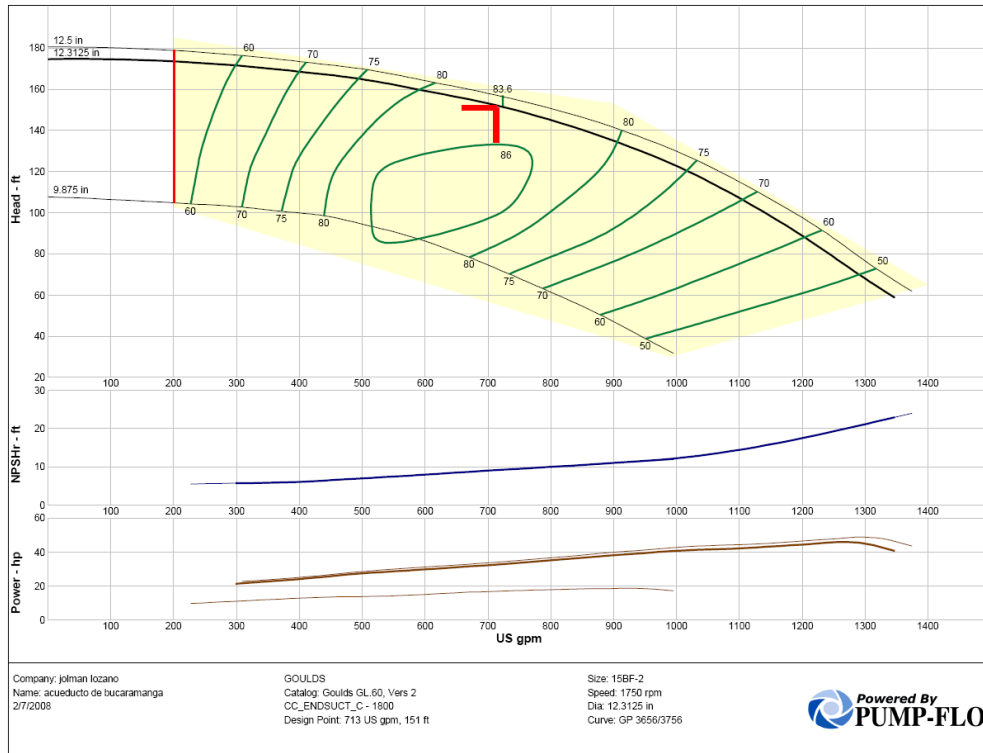
Como puede notarse en la gráfica, para el rango de valores evaluados (30 a 85 LPS) el convertidor de frecuencia mejor ajustado corresponde al de una bomba cuyo caudal nominal es de 50 litros por segundo, debe tenerse en cuenta que su rango es limitado, ya que por límites de potencia no puede ajustarse a valores mayores de 60 litros por segundo.

Sin embargo puede tomarse como principal conclusión que utilizar la configuración de múltiples bombas es la alternativa más económica de bombear frente al empleo del variador de frecuencia, esto se debe fundamentalmente al consumo de energía que requiere el convertidor, que se traduce en una pérdida de energía por parte del sistema, además de la influencia causada por el mismo sobre la bomba al cambiar su capacidad con la variación de las rpm.

Como la última alternativa (múltiples bombas) presenta las mejores oportunidades de ahorro de energía, se presenta a continuación los resultados del estudio de este tercer escenario. Donde las características se describen como sigue:

- Bomba de 85 LPS + motor (operando bajo condiciones del segundo escenario).
- Bomba de 60 LPS + motor (bombeando el 40% de la cantidad de agua demandada, durante 6.4 horas).
- Bomba de 46 LPS + motor (bombeando el 60% de la cantidad de agua demandada, durante 12.5 horas).

Figura 39. Curva de desempeño bomba 46 LPS.



Fuente: PUMP-FLO software.

La propuesta presentada anteriormente obedece a una estimación, carece de fundamentos sólidos debido a que no se tienen registros de consumo de agua por parte de la localidad que aprovecha el servicio, sin embargo no deja de ser una propuesta cercana a las posibilidades y conservativa en cierta forma, ya que de una expectativa de extensión de la operación de bombeo supuesta de 21 horas, sólo se muestra una prolongación del tiempo de operación hasta 19 horas, de las 16 que presenta en la actualidad.

A continuación se presentan los resultados que arroja el análisis de costo de ciclo de vida de la presente propuesta, frente a la alternativa con menor costo formulada en los anteriores escenarios.

Cuadro 38. Resultados LCC, escenario tres.

	Alternativa 3	Alternativa 1c
Costo inicial	182'580.000	206'280.000
Costo Energía 1^{er} año @ 85 LPS	4'642.690	4'642.690
Costo Energía 1^{er} año @ 46 LPS	24'844.251	0
Costo Energía 1^{er} año @ 60 LPS	17'134.488	44'718.912
Costo Mantenimiento 1^{er} año	10'500.000	7'000.000
LCC	1.057'316.668	1.070'690.613

Como puede observarse en el cuadro, fue necesario incluir los costos de mantenimiento debido a que son diferentes con respecto a cada alternativa, y este podría ser el costo diferencial junto con el de energía. El costo de mantenimiento correspondiente a la alternativa 3 se estimó un 50% mayor al presentado para la alternativa 1c, esto se debe al incremento en las horas de operación por parte de estos equipos. Los costos establecidos corresponden al costo de los repuestos requeridos como son anillos de desgaste, rodamientos, empaquetaduras, lubricación, y los servicios técnicos de instalación y puesta a punto para dichos equipos (bombas de 46 y 60 litros por segundo, el costo de mantenimiento para la bomba con caudal nominal de 85 litros por segundo es igual en ambas alternativas).

Aunque la diferencia en costos de mantenimiento parezca sobredimensionada con respecto al incremento de las horas de operación (la diferencia son sólo tres horas en comparación con la alternativa 1c), el costo de ciclo de vida más bajo corresponde a la alternativa 3, y esto muestra indicios importantes de las oportunidades de ahorro de energía y costos que podrían conseguirse si se reestructuran las políticas de operación, sustentadas

en el conocimiento del consumo de agua por parte de la localidad favorecida por el servicio de suministro de agua potable.

4.5.5 Conclusiones. La alternativa que debe escoger el acueducto de Bucaramanga para desarrollarla como proyecto de inversión, debe ser consistente con el escenario que considere más afín a sus requerimientos.

El primer escenario, que no considera las posibilidades de incremento en las horas de operación por parte de la bomba de 85 litros por segundo, sugiere la inversión en la alternativa 1c, frente a la alternativa 2 que propone el empleo de un variador de frecuencia.

El segundo escenario, que supone un aumento en el tiempo de operación de la bomba de 85 litros por segundo a lo largo de los veinte años de vida útil, continúa presentando como alternativa favorable la correspondiente a la propuesta 1c.

El tercer escenario es una propuesta de carácter flexible, propone la implementación de un equipo de capacidad menor a la especificada en los requerimientos de caudal. Su resultado muestra que dicha propuesta (alternativa 3) podría proporcionarle a la empresa el mayor beneficio a menor costo. Sin embargo, no deja de ser una estimación, y para confrontarla, es necesario que se realice la gestión de toma y procesamiento de datos correspondientes a la demanda de caudal generada por la localidad LA CUMBRE.

5. OBSERVACIONES

Grado de error de las simulaciones. Para validar los resultados obtenidos por las simulaciones, se determinó un porcentaje de error de la misma con respecto a los datos tomados por la operación del sistema en sus dos configuraciones de servicio (operación simple y combinación en paralelo).

Cuadro 39. Error de las simulaciones configuración bombeo con una sola bomba (bomba 1)

Conf. Sencilla			
Bomba 1	Real	Simulado	Error %
Caudal (LPS)	58	54	6.9
Presión (PSI)	74	73	1.35
Potencia eléctrica (kW)	57.3	56.412	1.55

Cuadro 40. Error de las simulaciones configuración bombeo en paralelo (bombas 1 & 3).

Conf. Paralelo		
PRESIÓN (PSI)	Bomba 1	Bomba 3
Presión real	84	82
Presión simulación	84	84
Error presión (%)	0	-2.4

CAUDAL (LPS)	Real	Simulado	Error (%)
Bombas 1 & 3	82	77	6.1

POTENCIA Eléctrica (kW)	Real	Simulado	Error (%)
Bombas 1 & 3	93.9	93.76	0.15

Teniendo en cuenta que es un sistema de bombeo cuya infraestructura de tuberías tiene más de quince años de servicio, la complejidad del sistema, y en general, la diferencia entre los resultados obtenidos matemáticamente y los datos que arroja la práctica experimental, dan sustento al porcentaje de error determinado para dar validez a las simulaciones realizadas con el fin de determinar los posibles comportamientos y resultados producto de cambiar las condiciones al implementar otros equipos de bombeo.

Si la decisión tomada por el acueducto es consistente con la recomendación presentada en este informe, es necesario que a la hora de proyectar se tenga en cuenta el error encontrado al validar las simulaciones si desea realizar una selección de equipos más precisa y cuidadosa.

Con respecto al escenario tres. El escenario tres es un escenario que presenta una oportunidad de ahorro de energía y costo de vida. Es una recomendación, ya que dicho escenario propone bombear por debajo de los requerimientos sugeridos por los criterios de operación que rigen el sistema de bombeo LA CUMBRE. Los dos escenarios que le presiden corresponden de manera rígida a los requerimientos de la estación.

La capacidad de trabajo se escogió de 46 litros por segundo debido a que este sería el caudal medio si el bombeo de 60 litros por segundo se extendiera desde 16 horas hasta 21 horas al día, que sumado al tiempo de operación de la bomba de caudal nominal de 85 litros por segundo, mantendrían la estación en operación mínimo 20 horas al día.

Costo de propiedad. Debe reconocerse que un sistema de bombeo es un proyecto dinámico, que no se mantiene estático durante los veinte años de

vida útil de sus equipos. Este sistema de bombeo está sujeto al incremento de la demanda, y a modificaciones requeridas para aumentar la cobertura de servicio de suministro de agua potable. Por lo tanto es necesario que la empresa haga un acompañamiento permanente sobre el sistema de bombeo mencionado, que reestructure y ponga en práctica las políticas de mantenimiento propuestas, de tal forma que garantice que los equipos funcionarán adecuadamente durante toda su vida útil. El análisis de costo de ciclo de vida y la adquisición de equipos es apenas el primer paso. El acueducto metropolitano de Bucaramanga debe ser cuidadoso con el costo de propiedad de la estación de bombeo.

Proyección de los equipos. Seguramente con el paso del tiempo, la demanda de agua por parte de la localidad crecerá, y será necesario disponer de equipos con mayor capacidad para cumplir los requerimientos. Por tal razón, a la hora de seleccionar los equipos para esta tarea, se consideró esta futura necesidad. La mayoría de los fabricantes ofrecen un modelo de bomba junto con impulsores de diferente tamaño, de tal forma una sola unidad puede aumentar su capacidad si se le incorpora un impulsor de mayor diámetro, y el costo asumido será únicamente el del rotor y no será necesario reemplazar la bomba. Los motores seleccionados operarán a $\frac{3}{4}$ de plena carga, para que en un futuro puedan asumir las exigencias de potencia que demandará la estación.

CONCLUSIONES

1. El sistema de bombeo LA CUMBRE presenta en la actualidad una baja eficiencia electromecánica (47% para operación individual y 43% para operación en paralelo). La causa principal de estos bajos niveles de eficiencia se deben en gran parte al desgaste de los elementos internos de las bombas, condición evidenciada por el degeneramiento de las curvas de desempeño de los equipos en operación producto de un mantenimiento deficiente. Las bombas de mayor servicio presentan un escurrimiento de caudal aproximado del 20% y una pérdida de eficiencia electromecánica estimada en 25 puntos con respecto a los mismos equipos en óptimas condiciones.

2. Los resultados que arroja el diagnóstico CBM muestran que además del desgaste evidenciado en las bombas, también existe deterioro en algunas válvulas de la estación de bombeo, junto con problemas de alineación, balanceo, recirculación, y leves problemas eléctricos en los equipos bombamotor. Se recomienda realizar una parada de planta donde se evalúe de manera concreta el estado de las válvulas con el fin de estimar reparación o reemplazo de las mismas, solucionar los problemas rotodinámicos de algunos equipos de bombeo cuyas causas son el desalineamiento y desbalance, y realizar pruebas de Índice de polaridad y nivel de aislamiento en los motores eléctricos para verificar su estado y realizar las acciones pertinentes.

3. Conociendo de manera previa las condiciones de operación del sistema de bombeo LA CUMBRE y determinado su consumo de potencia eléctrica, se estimó un costo de energía eléctrica demandada por la estación cercano a los

80 millones de pesos anuales, lo cual fue corroborado por la facturación eléctrica diligenciada por la empresa prestadora de dicho servicio, denotándose una diferencia poco considerable. Se estimó una expectativa de ahorro de costos de energía mínima del 30%.

4. Las labores de mantenimiento en el sistema de bombeo LA CUMBRE son insuficientes, la cantidad de capital invertida en mantenimiento es mínima a expensas del degeneramiento de los equipos de bombeo a lo largo de sus 15 años de vida útil.

5. Según registros del SCADA la operación del sistema de bombeo cumple con los siguientes requerimientos:

- Operación demanda media: 57 litros por segundo durante 16 horas diarias.
- Operación demanda alta: 78 litros por segundo durante 1 hora diaria.

Los nuevos equipos deben cumplir con las siguientes necesidades:

- Operación demanda media: 60 litros por segundo durante 16 horas diarias.
- Operación demanda alta: 85 litros por segundo durante 1 hora diaria.

6. Los equipos seleccionados tienen la posibilidad de ampliación de su capacidad, en caso de que se requiera, pueden cambiarse los impulsores por otros de mayor tamaño. Los motores eléctricos fueron seleccionados para soportar estas condiciones.

7. El acueducto metropolitano de Bucaramanga requiere implementar entre su sistema de datos los registros de caudal consumido por el usuario del

servicio, con el fin de llevar seguimiento histórico, y con el objeto de realizar una estrategia de operación afín con el consumo.

8. El acueducto metropolitano de Bucaramanga requiere realizar un monitoreo de desempeño periódico o permanente sobre los equipos de la estación. Así tendrá conocimiento pleno de éste y sabrá cuando debe realizar las labores de mantenimiento de manera oportuna.

9. Debido a que la información recopilada acerca las especificaciones de las bombas es limitada, con el fin de adquirir repuestos para una reconstrucción, y considerando los costos de reconstrucción de cada bomba, se concluye que si el acueducto tiene preferencia por la acción de reconstruir en lugar de reemplazar por nuevos equipos, debe asegurarse que los repuestos conseguidos a través del proveedor sean afines con las bombas a reconstruir, de tal forma que garantice la condición óptima de los equipos reparados; y debe tener en cuenta además el costo-beneficio de reconstruir frente al reemplazo.

10. Debido a que los equipos ya se encuentran en etapa terminal de su vida útil, las oportunidades de ahorro de energía requieren cantidades considerables de capital, sin embargo se visualizan pequeñas oportunidades de ahorro de costos de energía si se modifican las condiciones de operación.

11. El análisis de costo de ciclo de vida precisa que asumir el costo de nuevos equipos con mayor eficiencia es más rentable que continuar la operación con los equipos actuales.

12. El análisis de costo de ciclo de vida muestra que es más rentable la implementación de una bomba por cada requerimiento de demanda (media y alta) frente a la aplicación de bomba con un convertidor de frecuencia para suplir ambos niveles de demanda.

13. El análisis de costo de ciclo de vida da evidencias de que el empleo de un motor de alta eficiencia es una buena alternativa para el equipo de bombeo que opera a 60 litros por segundo, sin embargo, no se alcanza beneficio cuando el motor de alta eficiencia es implementado para impulsar la bomba especificada para la alta demanda, el motor de eficiencia estándar es la opción mas económica bajo esa condición.

14. El estudio económico realizado presentó un escenario especial donde se muestran las oportunidades de ahorro de energía que podría alcanzar el acueducto de Bucaramanga si su operación acoge más de dos niveles de demanda, partiendo del indicio que es más económico bombear a bajo caudal.

BIBLIOGRAFÍA

BLANK, Leland y TARQUIN, Anthony. Ingeniería Económica. Mc GRAWN HILL. 1999.

Energy Efficiency Enquiries Bureau (England). Energy savings in industrial water pumping systems, good practice guide 249. First edition. 1998.

FERNÁNDEZ, Pedro. Apuntes Bombas centrífugas y volumétricas. Universidad de Cantabria.

Hydraulic Institute & Europump. Pump life cycle costs: A guide to LCC analysis for pumping systems. Hydraulic Institute and Europump. First edition. 2001.

KARASSIK, Igor J. Bombas centrífugas: Selección, operación y mantenimiento. Segunda edición. Compañía Editorial Continental. 1985.

KARASSIK, Igor J. MESSINA, Joseph P. COOPER, Paul. HEALD, Charles C. Pump Handbook. Third edition. Mc GRAWN-HILL. 2001.

SANKS, Robert L. Pumping Station design. Second edition. Butterford-Heinemann. 1998.

U.S. Department of Energy & Hydraulic Institute. Improving pumping system performance: A sourcebook for industry. U.S. Department of Energy. 2006.

Internet:

www.pump-zone.com

ANEXOS

ANEXO A. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Los fundamentos presentados aquí son una instrucción básica acerca las bombas centrífugas y su relación con el sistema de tuberías implícito, también se habla un poco del cambio del comportamiento de las bombas cuando sufren un cambio en su velocidad de rotación, o cuando se les modifica con un impulsor más grande o más pequeño. Todo esto tiene el fin de hacer que el lector se familiarice con ciertos conceptos que son necesarios conocer para entender el informe presentado si no se tiene algún conocimiento previo acerca el funcionamiento de las bombas centrífugas y sistemas de bombeo.

A.1 Bombas Centrífugas

A.1.1 Funcionamiento y componentes básicos.

Las bombas centrífugas mueven un cierto volumen de líquido entre dos niveles; son pues, máquinas hidráulicas que transforman un trabajo mecánico en otro de tipo hidráulico.

Los elementos de que consta una instalación son:

- a) *Una tubería de aspiración*, que concluye prácticamente en la brida de aspiración.
- b) *El impulsor o rodete*, formado por un conjunto de álabes que pueden adoptar diversas formas, según la misión a que vaya a ser destinada la bomba, los cuales giran dentro de una carcasa circular. El rodete es accionado por un motor, y va unido solidariamente al eje, siendo la parte móvil de la bomba.

El líquido penetra axialmente por la tubería de aspiración hasta la entrada del rodete, experimentando un cambio de dirección más o menos brusco, pasando a radial, (en las centrífugas), o permaneciendo axial, (en las axiales), acelerándose y absorbiendo un trabajo.

Los álabes del rodete someten a las partículas de líquido a un movimiento de rotación muy rápido, siendo proyectadas hacia el exterior por la fuerza centrífuga, creando una altura dinámica de forma que abandonan el rodete hacia la voluta a gran velocidad, aumentando también su presión en el impulsor según la distancia al eje. La elevación del líquido se produce por la reacción entre éste y el rodete sometido al movimiento de rotación.

- c) *La voluta* es un órgano fijo que está dispuesta en forma de caracol alrededor del rodete, a su salida, de tal manera que la separación entre ella y el rodete es mínima en la parte superior, y va aumentando hasta que las partículas líquidas se encuentran frente a la abertura de impulsión.

Su misión es la de recoger el líquido que abandona el rodete a gran velocidad, cambiar la dirección de su movimiento y encaminarle hacia la brida de impulsión de la bomba.

La voluta es también un transformador de energía, ya que frena la velocidad del líquido, transformando parte de la energía dinámica creada en el rodete en energía de presión, que crece a medida que el espacio entre el rodete y la carcasa aumenta, presión que se suma a la alcanzada por el líquido en el rodete.

En algunas bombas existe, a la salida del rodete, una corona directriz de álabes que guía el líquido antes de introducirlo en la voluta.

d) Una tubería de impulsión, instalada a la salida de la voluta, por la que el líquido es evacuado a la presión y velocidad creadas en la bomba.

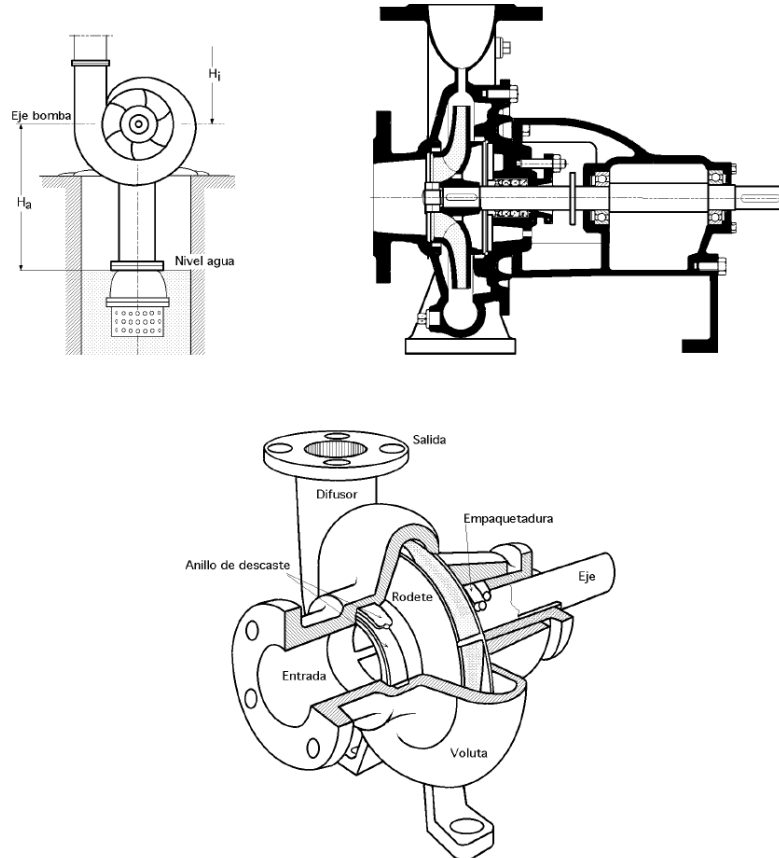


Fig 1.1.- Bomba centrífuga, disposición, esquema y perspectiva

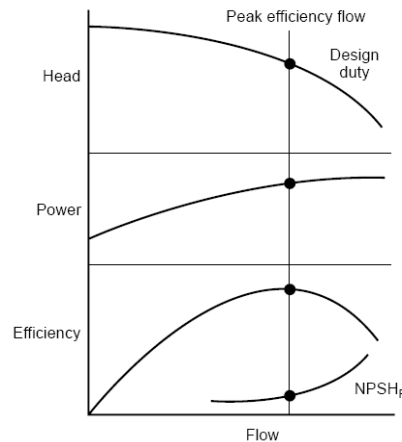
Fuente: Bombas centrífugas y volumétricas. Pedro Fernández Díez.

Este es, en general, el funcionamiento de una bomba centrífuga aunque existen distintos tipos y variantes.

La estructura de las bombas centrífugas es análoga a la de las turbinas hidráulicas, salvo que el proceso energético es inverso; en las turbinas se aprovecha la altura de un salto hidráulico para generar una velocidad de rotación en la rueda, mientras que en las bombas centrífugas la velocidad comunicada por el rodete al líquido se transforma, en parte, en presión, lográndose así su desplazamiento y posterior elevación.

A.1.2 Curvas características de las bombas centrífugas.

Estas aparecen en varias formas, entre las más comunes se encuentra la mostrada en la próxima figura. Las curvas características son simplemente una representación gráfica de cómo cambian con respecto al flujo parámetros de operación importantes como lo son la carga total, la potencia requerida por la bomba, la eficiencia de la misma, y el caudal de operación.



Fuente: Energy Efficiency Enquiries Bureau (England)

Es importante que estos parámetros y su interdependencia sean claramente entendidos, se mencionan a continuación.

Cabeza o Carga Total, es una medida de la diferencia de presiones generada a través de la bomba.

Potencia, es la potencia absorbida por la bomba para desarrollar la presión y flujo requerido.

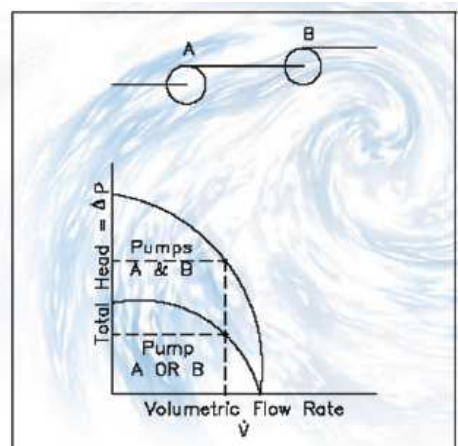
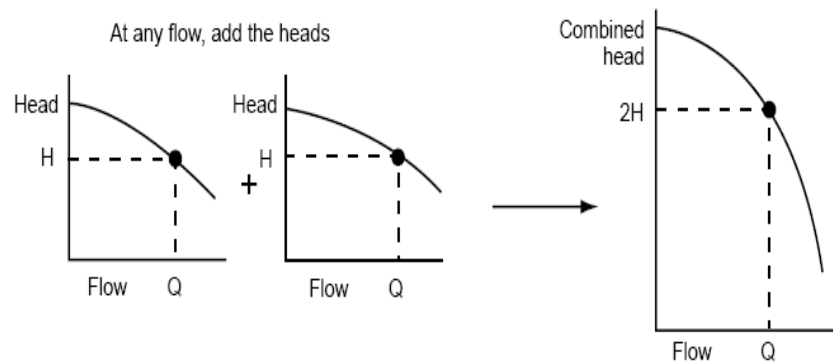
Eficiencia, es la eficiencia con la que la potencia absorbida por la bomba es convertida en energía de presión y flujo.

Caudal o Capacidad, corresponde al flujo a través de la bomba.

A.1.3 Combinaciones de bombas.

A.1.3.1 Combinación en serie.

Si la salida de una bomba es conectada a la entrada de una segunda bomba, entonces se obtiene una combinación de sus curvas características producto de la suma de sus cabezas a un valor de flujo especificado, tal como se observa en la siguiente figura.



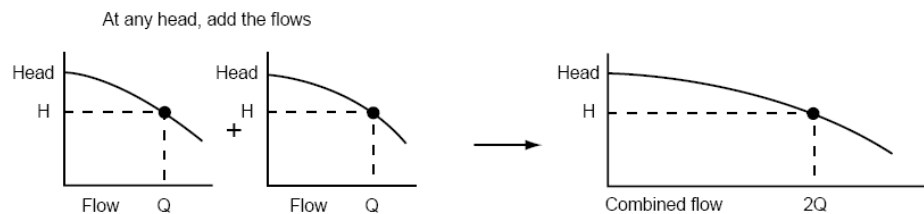
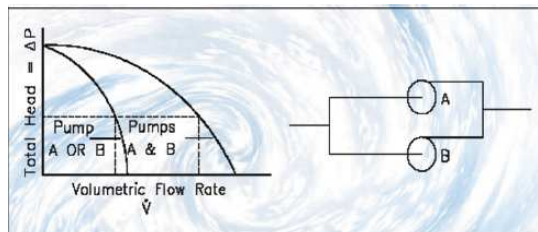
Fuente: Energy Efficiency Enquiries Bureau (England)

Lo anterior es consistente con el hecho de que la cabeza desarrollada por una bomba es el incremento de presión entre su entrada y su salida.

Por lo general, esta combinación se utiliza en aplicaciones donde los requerimientos de presión son altos y no es posible satisfacerlos con una sola bomba en operación.

A.1.3.2 Combinación en paralelo.

Si dos bombas están configuradas en paralelo, de tal forma que sus succiones están conectadas a una entrada común, y sus descargas a una salida común, entonces la curva combinada resulta de la suma de los caudales de cada bomba a una carga especificada, tal como lo muestra la siguiente figura.



Fuente: Energy Efficiency Enquiries Bureau (England)

Esta configuración se utiliza a menudo cuando existen aplicaciones donde hay requerimientos de caudal múltiples, una bomba funcionaría cuando la demanda es baja, y cuando esta alcanza niveles que una sola bomba en operación no puede suplir, entra en operación conjunta con la otra.

A.1.4 Relaciones fundamentales de las bombas centrífugas.

Las curvas características de una bomba centrífuga son aquellas que relacionan las variables que intervienen en el funcionamiento de las mismas.

Por consiguiente, la curva característica de una bomba válida para una determinada velocidad de giro (n) sin variar su diámetro, puede dar lugar a un cambio en sus curvas característica y a una modificación de las variables Q , H y P , cuando se la hace trabajar a distintas velocidades. La curva de la bomba varía según las **leyes de semejanza o ley de afinidad** cuyas relaciones mencionamos a continuación.

El caudal (Q) que maneja una bomba, aumenta o disminuye proporcionalmente al aumento o disminución de la velocidad (n). O bien, el caudal (Q) es directamente proporcional al cambio de velocidad.

$$Q_2 = Q_1 \times \frac{n_2}{n_1}$$

La carga o cabeza (H) aumenta o disminuye con el cuadrado de la velocidad. O bien, la cabeza es proporcional al cuadrado del cambio de velocidad.

$$H_2 = H_1 \times \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2$$

La potencia absorbida (P) crece o disminuye con el cubo de la velocidad. O bien, la potencia absorbida es proporcional al cubo del cambio de velocidad.

$$P_2 = P_1 \times \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^3$$

A.1.1.5 Cambios en el diámetro del impulsor.

A fin de cubrir económicamente una amplia gama de caudales con el mínimo número de tamaños distintos de bombas y de diseños de rodets, los fabricantes acostumbran a tener un intervalo de rodets para cada carcasa o voluta. En general estos rodets tienen aspiración idéntica y sólo varía el diámetro de salida, lo cual se suele conseguir por rebaje mecanizado del diámetro. Para determinar el efecto producido por la variación del diámetro del impulsor pueden emplearse las siguientes ecuaciones, que son menos exactas que las correspondientes a las leyes de afinidad.

$$Q_2 = Q_1 \times \frac{D_2}{D_1} ; \text{Caudal (Q), Diámetro (D)}$$

$$H_2 = H_1 \times \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^2 ; \text{Cabeza (H), Diámetro (D)}$$

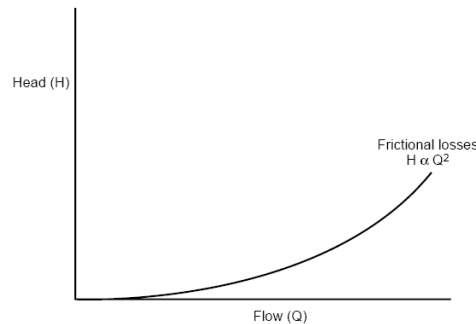
$$P_2 = P_1 \times \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^3 ; \text{Potencia absorbida (P), Diámetro (D)}$$

A.2 Interacción bomba centrífuga-sistema de tubería.

A.2.1 Curva de resistencia del sistema de tuberías (requerimiento)

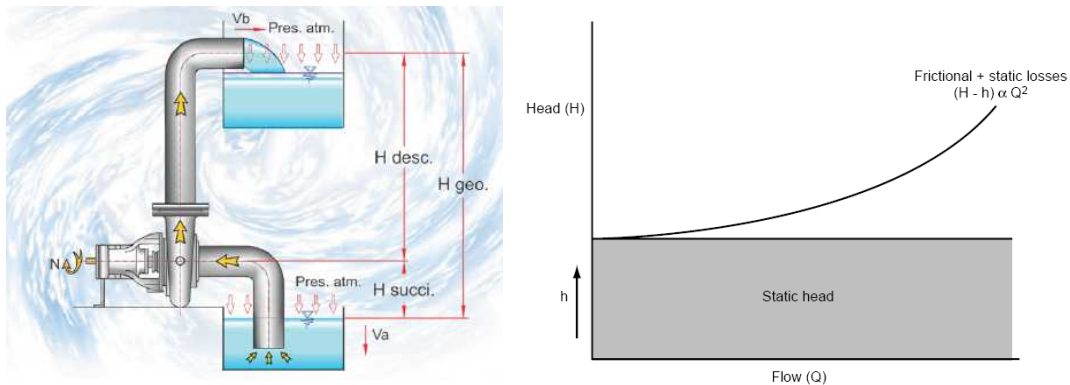
Se requiere algo más que una bomba centrífuga para que el agua llegue a su destino. Es necesario un sistema de tuberías adecuadamente diseñadas para tal fin.

Para conducir agua a través de la tubería, se requiere cierta cantidad de presión generada por la bomba para superar la resistencia producida por el sistema, y superar una diferencia de altura entre el nivel de succión y el nivel de descarga o lugar donde se desea recaudar líquido. Si no existe dicha diferencia de altura, la resistencia del sistema es puramente fricción, y el flujo que puede ser conducido por el sistema de tubería variará con la presión aplicada desde la bomba de acuerdo a una proporción cuadrática.



Fuente: Energy Efficiency Enquiries Bureau (England)

Sin embargo, existen muchos sistemas de bombeo donde existe esta diferencia de alturas, para esos casos, la bomba no entregará flujo hasta haber desarrollado la presión suficiente para superar la carga debida a la columna de agua implicada (conocida como cabeza estática), entonces los dos componentes (fricción y cabeza estática) son agregados a la curva de resistencia del sistema (o requerimiento) como se observa en la siguiente figura.



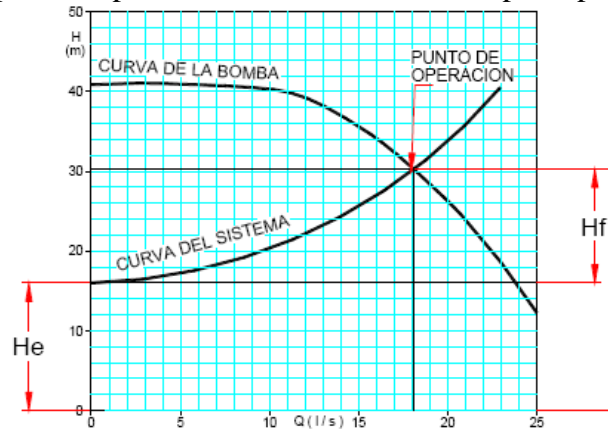
Fuente: Energy Efficiency Enquiries Bureau (England) y curso de bombas centrífugas, por Ing. Francisco Guerrero.

El trazo de la curva debida a la resistencia por fricción es dictada por factores como el diámetro del sistema de tuberías y su rugosidad interna, el número de dobleces de la tubería y su respectiva curvatura, y el grado de abertura de las válvulas que componen dicho sistema. Un incremento en la resistencia del sistema causado por cerrar

parcialmente la válvula en la tubería de descarga tenderá a incrementar la pendiente de la curva.

A.2.2 Punto de operación del sistema de bombeo.

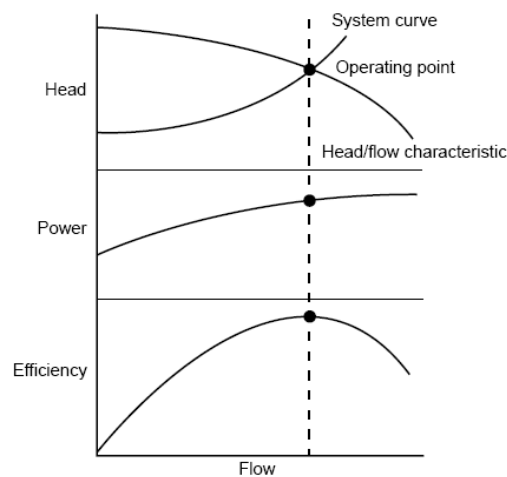
Una bomba (o una combinación de bombas) pueden operar únicamente a presiones y flujos acordes con su curva característica, de manera similar el sistema de tuberías implicado puede entregar líquido condicionado por su curva de resistencia. Por lo tanto el punto de operación puede ser determinado si se superimponen ambas curvas.



Fuente: Curso bombas centrífugas por Ing. Francisco Guerrero.

A.2.3 Punto de máxima eficiencia (BEP)

Entre todos los puntos que conforman la curva característica de una bomba centrífuga existe uno, donde la transferencia de energía entre el impulsor y el líquido manejado es mas eficiente que cualquier otra condición de operación, este punto es conocido por la mayoría de usuarios y fabricantes de bombas centrífugas como punto de máxima eficiencia, o punto de diseño de operación de una bomba centrífuga.



Fuente: Energy Efficiency Enquiries Bureau (England)

ANEXO B. INTRODUCCIÓN AL SISTEMA DE BOMBEO LA CUMBRE

B.1 Generalidades.

El sistema de bombeo LA CUMBRE es el mecanismo encargado de suministrar agua potable a la población que lleva su nombre, en la actualidad tiene capacidad de bombear hasta 80 litros por segundo, a una altura geométrica de 45 metros.

Las bombas succionan agua del tanque “El Carmen” (capacidad, 1500 metros cúbicos) que a su vez proviene de la planta de tratamiento FLORIDA, dichas bombas dirigen la impulsión hacia la localidad LA CUMBRE, y utilizan el tanque LA CUMBRE (capacidad, 248 metros cúbicos) para garantizar una presión confort y reserva en caso de parada o emergencia. La tubería de impulsión es de asbesto cemento clase 25 y diámetro nominal de 10 pulgadas.

La instalación consta de 2 bombas de diferente tamaño, de las cuales, cada una tiene su respectiva bomba de reserva, y funcionan en configuración sencilla o paralela según el requerimiento. En operación normal la bomba de mayor tamaño se encuentra encendida transportando aproximadamente 60 litros por segundo, cuando la demanda del sistema se incrementa de tal forma que la bomba encendida no abastece el requerimiento, se enciende una bomba de menor tamaño, que junto con la bomba de mayor tamaño previamente encendida, configuradas en paralelo, alcanzan un caudal entre los 70 y 80 litros por segundo, dependiendo de la pareja que se encuentre combinada.

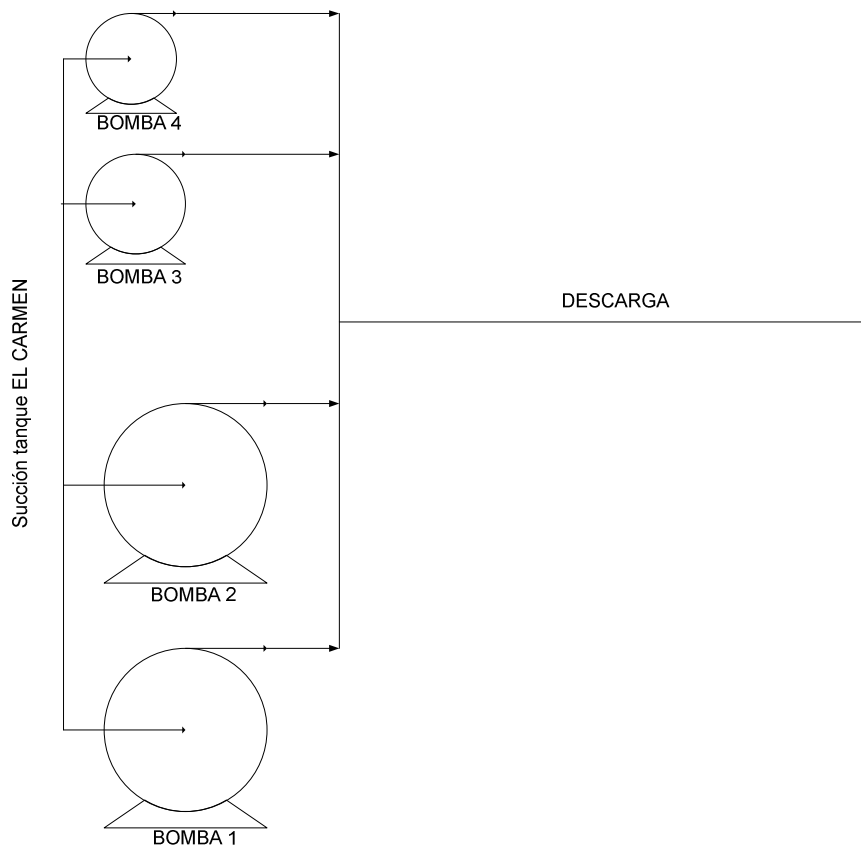
La estación de bombeo LA CUMBRE es un sistema automatizado, su control es realizado por un autómata programable, el cual es monitoreado a través del SCADA ubicado en la sede principal del acueducto metropolitano de Bucaramanga, su control se resume en monitoreo de variables como caudales bombeados, parámetros eléctricos, nivel del tanque EL CARMEN, y nivel del tanque LA CUMBRE, esta

última variable, es el elemento de control principal para discriminar el encendido-apagado de las bombas, y para condicionar el tipo de configuración que debe adoptar la estación para cumplir con la demanda de agua potable.

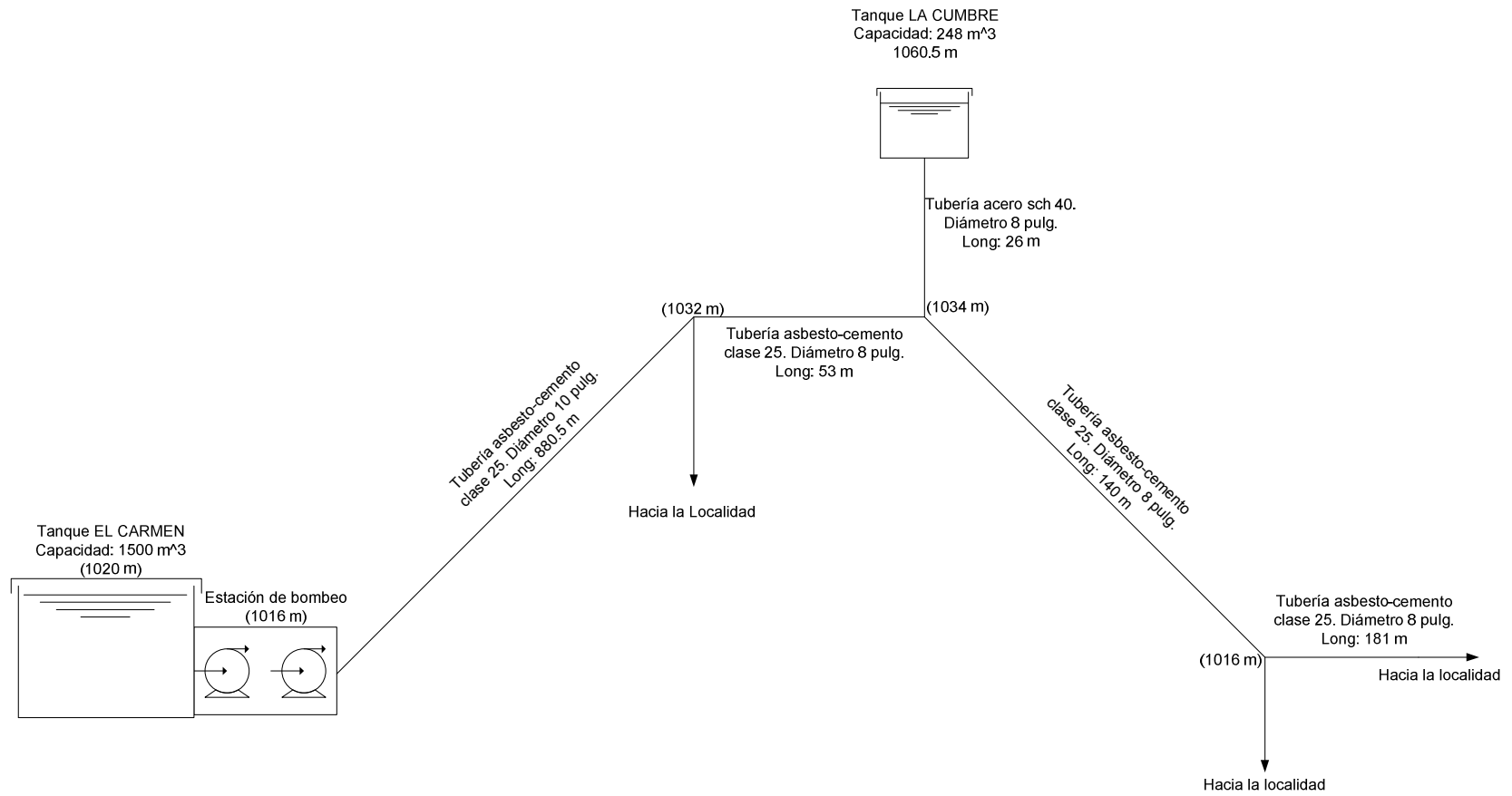
B.2 Punto de referencia de los equipos.

Con el fin de hacer mas didáctico el texto informe, se presenta la siguiente referencia que numera las bombas, para conseguir el reconocimiento de los equipos de manera sencilla. A continuación se presentan dos esquemas, primero el esquema de referencia para la estación, seguido, el esquema general del sistema de bombeo LA CUMBRE.

Esquema referencia de la estación de bombeo



Esquema sistema de bombeo LA CUMBRE



B.3 Metodología básica de operación.

La operación del sistema de bombeo LA CUMBRE depende directamente del nivel del tanque elevado que lleva el mismo nombre. Esta variable es la que dictamina el encendido-apagado de los equipos y también es el criterio que argumenta el encendido de la bomba de refuerzo cuando la necesidad exige bombear en paralelo.

B.3.1 Operación Intermitente.

La estación cuenta con la disponibilidad de las cuatro bombas. La operación es intermitente entre una bomba y su reserva, es decir, una vez se haya apagado la bomba 1 después de una jornada de continuo servicio, cuando la operación de una bomba grande sea requerida, la próxima en encenderse será la bomba 2; de la misma manera ocurre con las bombas de refuerzo 3 y 4 cuando es exigida la configuración en paralelo.

B.3.2 Combinaciones.

Debe aclararse que las bombas 3 y 4 funcionan únicamente como equipos de refuerzo de las bombas 1 y 2 cuando los requerimientos del sistema son altos. Las bombas 3 y 4 no funcionan en paralelo, como tampoco las bombas 1 y 2. Las posibles configuraciones se presentan enseguida.

Configuración bomba única:

- Operación con bomba 1.
- Operación con bomba 2.

Configuración combinación en paralelo:

- Operación combinación bomba 1 y bomba 3.
- Operación combinación bomba 1 y bomba 4.
- Operación combinación bomba 2 y bomba 3.
- Operación combinación bomba 2 y bomba 4.

B.4 Especificaciones de los equipos.

Son las bombas de mayor tamaño, gemelas ambas. Su fabricante corresponde con la marca PATTERSON, y su tipo es doble succión carcasa partida axialmente. Las bombas pequeñas son tipo voluta caracol y su fabricante se denomina HIDROMAC.

Especificaciones bombas estación de bombeo LA CUMBRE.

	Bomba 1	Bomba 2	Bomba 3	Bomba 4
Marca	PATTERSON	PATTERSON	HIDROMAC	HIDROMAC
RPM	3550	3550	3500	3500
Cabeza operación (m)	52	54	48	46
Caudal operación (LPS)	53	56	32	27
Eficiencia (%)	N.D	N.D	N.D	N.D
Tamaño Succión	5 pulg	5 pulg	5 pulg	5 pulg
Tamaño Descarga	4 pulg	4 pulg	3 pulg	3 pulg

Fotografía bomba 1.



Fotografía bomba 2.



Fotografía bomba 3 (izquierda) y bomba 4 (derecha)



Los motores eléctricos que impulsan las bombas corresponden con el fabricante SIEMENS, las características básicas siguen a continuación.

	Motor 1 y 2	Motor 3 y 4
Marca	SIEMENS	SIEMENS
Potencia(HP)	70	50
RPM	3550	3450
Cos ϕ	0,91	0,87
Voltaje(Volts AC)	440	440
Corriente(AmperiosAC)	80	60